

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SULAMA SİSTEMİNDE KULLANILABİLECEK RÜZGAR ENERJİ
SİSTEMİNİN TASARLANMASI**

Kutbay SEZEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

2012

**BİR SULAMA SİSTEMİNDE KULLANILABİLECEK RÜZGAR ENERJİ
SİSTEMİNİN TASARLANMASI**

Kutbay SEZEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

2012

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SULAMA SİSTEMİNDE KULLANILABİLECEK RÜZGAR ENERJİ
SİSTEMİNİN TASARLANMASI**

Kutbay SEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez ../../2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından(.....) not takdir edilerek
Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hikmet RENDE (Danışman)

Prof. Dr. Osman YALDIZ

Yrd. Doç. Dr. S. Cem HANYALOĞLU

ÖZET

BİR SULAMA SİSTEMİNDE KULLANILABİLECEK RÜZGAR ENERJİ SİSTEMİNİN TASARLANMASI

Kutbay SEZEN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr Hikmet RENDE
Mayıs 2012, 72 Sayfa

Bu çalışmada, Antalya yöresindeki 50 metre yer altı suyu seviyesi dikkate alınarak seçilen 40 Watt gücündeki DC dalgıç pompayı çalıştırabilecek küçük ölçekli bir rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır.

Üç kanatlı, 67 cm rotor yarıçapına sahip ve rotorun DC jeneratöre doğrudan bağlandığı bir rüzgar türbini imal edilmiş ve bu türbinin değişik rüzgar hızlarındaki performansları incelenmiştir.

Yapılan deneyler, tasarlanan rüzgar türbininin 5,5 m/s – 6,5 m/s rüzgar hızı aralığında en yüksek verimi olan % 27,5'e ulaştığını göstermektedir. Ragheb'e (2009) göre rüzgar türbini tasarımında % 35'lik bir verim gerçekçi bir hedef olarak kabul edilebilir. Bu nedenle % 27,5'lik verim oldukça tatmin edicidir. Elde edilen makul sonuç, tasarımın doğru esaslar dahilinde yapıldığını ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Rüzgar türbini, rüzgar pompası, uç hız oranı, güç katsayısı

JÜRİ: Prof. Dr. Hikmet RENDE (Danışman)

.....

Prof. Dr. Osman YALDIZ

.....

Yrd. Doç. Dr. S. Cem HANYALOĞLU

.....

ABSTRACT

DESIGN OF A WIND ENERGY SYSTEM TO BE USED IN AN IRRIGATION SYSTEM

Kutbay SEZEN

M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering

Adviser: Prof. Dr. Hikmet RENDE

May 2012, 72 pages

In this study, a small-scale wind turbine is designed, that is capable of running a 40 Watt DC submersible pump, choosed by taking into consideration of the 50 meter deep ground water level in Antalya.

A wind turbine which has a 67 cm of rotor radius, three blades and DC generator directly connected to rotor, has been builded and the performances of these wind turbine in various wind speeds has been investigated.

The results of experiments indicated that the wind turbine reached its highest yield, 27.5%, in the range of 5.5 m/s – 6.5 m/s wind speeds. According to Ragheb (2009), 35% yield, based on the design of wind turbine can be considered as a realistic goal. Therefore, 27.5% is a very satisfactory yield. Obtained reasonable results show that the design has been done under correct principles.

KEY WORDS: Wind turbine, wind pump, tip speed ratio, power factor

COMMITTEE: Prof. Dr. Hikmet RENDE (Adviser)

Prof. Dr. Osman YALDIZ

Asst. Prof. Dr. S. Cem HANYALOĞLU

ÖNSÖZ

Günümüzde dünya enerji arzının %80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar çevreye verdikleri zararlar ve tükenecek olmaları nedeniyle sürdürülebilir birer enerji kaynağı değildirler. Güneş, rüzgar ve su gibi alternatif enerji kaynakları temiz ve yenilenebilir kaynaklardır. Alternatif enerji kaynaklarının enerji arzındaki paylarının arttırılması sadece fosil yakıtların kullanımına getirilecek kısıtlamalarla yapılamaz. Alternatif yakıtların kullanımları daha ucuz hale getirilmeli ve daha geniş uygulama alanları yaratılarak fosil yakıtlar karşısındaki rekabet güçleri arttırılmalıdır.

Rüzgar enerjisi, genel olarak büyük ölçekli rüzgar türbinleri ile elektrik üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin kullanımının arttırılması ve enerji arzında daha büyük bir paya sahip olmasının sağlanması için farklı alanlarda farklı boyutlarda uygulamalarının yaygınlaştırılması gerekir. Bu çalışmada ulaşımın ve iklimin zor olduğu, elektrik hattının bulunmadığı kırsal alanlarda diğer enerji kaynaklarına göre rekabetçi olabilecek rüzgar enerjisi ile çalışan küçük boyutlu bir su pompala sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışmanın rüzgar enerjisi uygulamalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlamasını dilerim.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren danışmanım Sayın Prof .Dr. Hikmet RENDE'ye (A.Ü.M.F.), elektrik ve elektronik alanında yardımlarını gördüğüm mesai arkadaşım Sayın Elektronik Mühendisi Muammer KAHVECİ ve Sayın Sinan KAHYA'ya ayrıca atolye çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen DSİ 13. Bölge Müdürlüğü sanat sınıfı personeline teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	2
2.1. Enerji Kaynakları.....	2
2.1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları.....	3
2.2. Rüzgâr Enerjisi.....	3
2.2.1. Rüzgâr enerjisinin avantajları.....	5
2.2.2. Rüzgâr enerjisinin dezavantajları.....	6
2.2.3. Dünyada rüzgar enerjisi.....	7
2.2.4. Türkiye’de rüzgar enerjisi.....	8
2.3. Rüzgar Türbinleri.....	11
2.3.1. Rüzgar türbinlerinin boyutlarına göre sınıflandırılması.....	12
2.3.2. Rüzgar türbinlerinin dönüş eksenlerine göre sınıflandırılması.....	13
2.3.2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	14
2.3.2.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	15
2.4. Rüzgar Türbini ile İlgili Formüller.....	18
2.4.1. Rüzgar gücünün hesabı.....	18
2.4.2. Betz teorisi.....	19
2.4.3. Kanat uç hız oranı ve kanat devir sayısı	21
2.4.3.1. Optimum kanat uç hız oranı hesabı.....	22
2.4.4 Güç Katsayısı C_p	24
2.4.4.1. Kanat profilinin yapısından kaynaklanan kayıplar.....	25
2.4.4.2. Kanat ucu kayıpları.....	25
2.4.4.3. Girdap kaybı.....	25

2.4.4.4. Kanat sayısından kaynaklanan kayıp.....	27
2.5. Rüzgar Pompaları.....	28
2.5.1. Mekanik rüzgar pompaları.....	29
2.5.2. Elektrikli rüzgar pompaları.....	33
3. MATERYAL ve METOT.....	34
3.1. Materyal.....	34
3.1.1. Rüzgar türbini	34
3.1.1.1. Rüzgar türbini kanatlarının boyutlandırılması.....	35
3.1.1.2. Jeneratör seçimi.....	35
3.1.1.3. Kanat sayısının ve profilinin seçimi	39
3.1.1.4. Aktarma organları.....	44
3.1.1.5. Dümen kuyruğu ve taşıyıcı diğer elemanlar.....	46
3.1.2. DC pompa.....	48
3.1.3. Elektrik kontrol elemanları ve diğer elektrik malzemeleri.....	49
3.1.3.1. Akü.....	50
3.1.3.2. Şarj regülatörü.....	51
3.1.3.3. Kablo.....	52
3.1.3.4. Jak.....	52
3.1.3.5. Ölçme cihazları.....	53
3.1.3.6. Deney düzeneği.....	55
3.2. Metot.....	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	60
5. SONUÇ.....	68
6. KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Kuyruk kanadı yüzey alanı
C_D	Sürüklenme kuvveti
C_L	Rüzgarın kanat üzerinde uyguladığı kaldırma kuvveti
C_p	Güç katsayısı
C_{pe}	Faydalanılabilir güç katsayısı
$C_{pschmitz}$	Schmitz güç katsayısı
E_k	Rüzgarın kinetik enerjisi
F	Rüzgar tarafından rotora uygulanan kuvvet
I_a	Akü şarj akımı değeri
I_j	Jeneratör akım değeri
m_h	Rüzgarın kütlesi
$\dot{m}_h$	Rüzgarın kütleli debisi
N	Rotor devir sayısı
N_{opt}	Optimum rotor devir sayısı
n	Kanat sayısı
P	Rüzgarın gücü
P_{maks}	Maksimum rüzgar türbini gücü
P_t	Rüzgar türbini gücü
P_{te}	Faydalanılabilir güç
R	Rotorun yarı çapı
r	Rotorun yarı çapı
S	Rotor süpürme alanı
s	Rotordan değişmeden geçen hava akımının boyu
S_1	Rüzgarın rotora giriş alanı
S_2	Rüzgarın rotordan çıkış alanı
t_s	Bir kanadın ardından gelen kanadın aynı konumu alması için geçen süre
t_w	Rüzgarın normale dönmesi için gereken süre
U_a	Akü gerilim değeri
U_j	Jeneratör gerilim değeri
V	Rüzgar hızı
V_1	Rüzgarın rotora giriş hızı
V_2	Rüzgarın rotordan çıkış hızı
$\eta_{uç}$	Kanat ucu kaybı
$\eta_{kanatlar}$	Kanat sayısına bağlı kayıp
$\eta_{sürtünme}$	Sürtünme kaybı
$\eta_{aktarma}$	Aktarma organlarındaki kayıp

$\eta_{elektrik}$	Elektriksel verim
η_{profil}	Kanat profilinin verimi
ε	Kayma sayısı
λ	Kanat uç hız oranı
λ_{opt}	Optimum kanat uç hız oranı
ρ_h	Havanın yoğunluğu
ω	Rotor açısal hızı
ω_{opt}	Rotorun optimum açısal hızı

Kısaltmalar

IEA	The International Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
DC	Doğru akım
EİE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
WWEA	World Wind Energy Association
AWEA	American Wind Energy Association
BWEA	British Wind Energy Association
BWE	Der Bundesverband WindEnergie
IEC	International Electrotechnical Commission
TPS	Tip Speed Ratio
AWG	American Wire Gauge

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yeni nesil bir rüzgar türbinin şematik resmi (Patel 2005).....	5
Şekil 2.2. Türkiye’deki rüzgar santralleri (Uyar 2009).....	9
Şekil 2.3. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası (EİE 2009).....	11
Şekil 2.4. Önden rüzgarlı ve arkadan rüzgarlı yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	14
Şekil 2.5. İki savonius tipi rüzgar türbin ile başlatılan bir darrieus tipi rüzgar türbini (Ragheb 2010).....	16
Şekil 2.6. Giromill veya H-rotor rüzgar trübini (Jorgensen ve Nielsen 2008).....	17
Şekil 2.7. Savonius tipi rüzgar türbini (Jorgensen ve Nielsen 2008).....	17
Şekil 2.8. Betz teorisine göre Rüzgar türbinindeki hava akışı.....	19
Şekil 2.9. $C_{pschmitz}$ - λ eğrisi (Çetin vd 2005).....	26
Şekil 2.10. Değişik tipte rüzgar türbinlerinin güç katsayısı – kanat uç hız oranı eğrileri (Ragheb 2009).....	28
Şekil 2.11. Mekanik rüzgar pompası.....	30
Şekil 2.12. Çift etkili pistonlu pompa (Güngör 2005).....	31
Şekil 2.13 Pnmatik hava kaldırma prensibine göre çalışan su pompası (Güngör 2005).....	32
Şekil 2.14 Uygun yükseklik ve konuma monte edilmiş rüzgar türbini örneği (Argaw vd 2001).....	33
Şekil 3.1. Rüzgar Türbini.....	34
Şekil 3.2. Ametek 50 V DC Jeneratör.....	37
Şekil 3.3. Jeneratör deney düzeneği.....	38
Şekil 3.4. Jeneratör devir testi.....	39
Şekil 3.5. NACA 4412 kanat tipi.....	40
Şekil 3.6 NACA 4412 kanat profilinin 0 derece burulma açısındaki formlarının devir sayıları (Vardar 2005).	41
Şekil 3.7. Rüzgar türbin kanadının önden görünüşü.....	42
Şekil 3.8. Kanadın A kesiti.....	42
Şekil 3.9. Kanadın B kesiti.....	43
Şekil 3.10. Kanadın C kesiti.....	43
Şekil 3.11. Rüzgar türbini kanadı.....	44

Şekil 3.12. Rüzgar türbini kanatları.....	44
Şekil 3.13. Hız dönüştürücü olmadan kanatların bağlanması.....	45
Şekil 3.14. Hub.....	45
Şekil 3.15. Teflon hub'un üç boyutlu çizimi ve boyutları.....	46
Şekil 3.16. Dümen kuyruğu.....	47
Şekil 3.17. Konteynır tekeri.....	48
Şekil 3.18. SCHURflo 9300 pompa.....	49
Şekil 3.19. Jel akü 80 Ah kapasiteli.....	50
Şekil 3.20. Şarj regülatörü.....	51
Şekil 3.21. Şarj regülatörü şematik resmi.....	51
Şekil 3.22. Jak.....	53
Şekil 3.23. Multimetre (Volt ve Amper ölçer).....	54
Şekil 3.24. Anemometre (Rüzgar hızı ölçer).....	54
Şekil 3.25. Takometre.....	55
Şekil 3.26. Deney düzeneği.....	56
Şekil 3.27. Rüzgar türbinin monte edildiği yer	57
Şekil 3.28. Şarj akımı – jeneratör devir sayısı.....	58
Şekil 4.1. Elektriksel verimin türbin gerilimi ile değişimi.....	61
Şekil 4.2. Rüzgar türbini gücünün rüzgar hızıyla değişimi.....	62
Şekil 4.3. Kanat uç hız oranının rüzgar hızına göre değişimi.....	63
Şekil 4.4. Güç katsayısı değerinin rüzgar hızına göre değişimi.....	65
Şekil 4.5. Güç katsayısı değerinin kanat uç hız oranına göre değişimi.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Enerji kaynaklarının dünya enerji arzındaki payları (IEA, 2008).....	2
Çizelge 2.2. Dünya rüzgar enerjisi kapasitesinin değişimi (WWEA 2010).....	7
Çizelge 2.3. En yüksek kurulu rüzgar enerjisine sahip on ülke (WWEA 2010).....	8
Çizelge 2.4. Türkiye’deki rüzgar santralleri (Uyar 2009).....	10
Çizelge 2.5. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin değişik enstitülere göre tanımları (Kühn 2010).....	13
Çizelge 2.6 Girdap kayıpları için $C_{pschmitz}$ - λ değerleri (Çetin vd 2005).....	26
Çizelge 3.1. Ametek 50 V DC Jeneratörün devir sayısına bağlı olarak aküyü şarj ederken ürettiği elektrik akımı ve gerilimi.....	38
Çizelge 3.2. SCHURflo 9300 pompaya ait teknik veriler.....	49
Çizelge 3.3. Şarj regülatörünün teknik verileri.....	52
Çizelge 4.1. Rüzgar hızına göre ölçülen ve hesaplanan değerler.....	60

1. GİRİŞ

Enerji iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanır. İnsanlar tarih boyunca en büyük ihtiyaçlarından biri olan enerjiye ulaşmak için çaba sarf etmişler ve değişik enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Sanayi devrimi ile beraber fosil kaynaklar endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış, teknolojinin gelişmesi ve artan üretim, fosil kaynaklara olan ihtiyacı daha da arttırmıştır. Günümüzde dünyanın enerji arzının yaklaşık %80'i fosil kaynaklardan karşılanmaktadır.

Fosil kaynakların yoğun olarak kullanılmasının zararlı etkileri zamanla ortaya çıkmaya başlamıştır. Atmosfere salınan karbon gazları sera etkisi yaratmakta ve dünyanın iklimini etkilemektedir, kutuplardaki buzulların erimesi nedeniyle küresel bir iklim değişikliği ve bazı kıyı bölgelerin sular altında kalması artık bir tahmin olmaktan çıkıp yakın zamanda meydana gelecek kaçınılmaz bir gerçek haline gelmiştir. Fosil kaynaklar tükenir enerji kaynaklarıdır. Önümüzdeki 100, 150 yıl içinde tükenecek olmaları ve çevreye verdikleri zarar nedeniyle yerlerine dolduracak alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi şarttır. Alternatif enerji kaynaklarının enerji arzındaki paylarının arttırılması sadece fosil yakıtların kullanımına getirilecek kısıtlamalarla yapılamaz. Alternatif yakıtların kullanımları daha ucuz hale getirilmeli ve daha geniş uygulama alanları yaratılarak fosil yakıtlar karşısındaki rekabet güçleri arttırılmalıdır.

Başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi, genel olarak büyük ölçekli rüzgar türbinleri ile elektrik üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin kullanımının arttırılması ve enerji arzında daha büyük bir paya sahip olmasının sağlanması için farklı alanlarda farklı boyutlarda uygulamalarının yaygınlaştırılması gerekir. Ulaşımın ve iklimin zor olduğu, elektrik hattının bulunmadığı kırsal alanlarda su pompalama amacıyla rüzgar enerjisinin kullanımı diğer enerji kaynaklarına kıyasla rüzgar enerjisini daha uygulanabilir yapabilecek bir yöntem olarak belirlenmiştir. Bu sayede tarım ve hayvancılık için gereken su en ucra bölgeler de bile sağlanabilecek ve ekonomiye önemli bir katkı sağlanmış olacaktır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

2.1. Enerji Kaynakları

Teknolojik gelişmeler ile enerjiye olan ihtiyaç daha da artmıştır. Sanayi devrimi ile hızlanan bu süreçte, iki yüzyıldan daha uzun bir süredir fosil yakıtlar temel enerji kaynakları olmuştur. 18. yüzyıldan başlayıp 19. yüzyılın ortalarına kadar kömür temel enerji kaynağı olarak ihtiyacı karşılamış, bu tarihten sonra petrokimyasal maddeler de enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde kullanılan enerjinin %80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Güneş, rüzgâr, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları günümüzde enerji üretiminde toplam %5'lik bir paya sahip olsalar da geleceğin enerji kaynakları olarak görülmektedirler ve bu nedenle bu alanda yapılan yatırımlar hızla artmaktadır (Patel 2006).

Dünyanın sürekli artan enerji talebini karşılamak için kullanmış olduğu kaynaklar ve bu kaynakların toplam enerji arzı içindeki payları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Enerji kaynaklarının dünya enerji arzındaki payları (IEA, 2008)

Enerji Kaynakları (OECD)	1973 (%)	2008 (%)	2030 Tahmini (%)
Petrol	52,5	37,3	30,0
Kömür	22,6	20,9	16,6
Gaz	19,0	23,7	20,5
Nükleer	1,3	10,9	9,5
Hidro	2,1	2,0	3,9
Yenilenebilir Kaynaklar	2,5	5,2	19,5
Enerji Kaynakları (Dünya)	1973 (%)	2008 (%)	2030 Tahmini (%)
Petrol	48,1	34,3	30,1
Kömür	28,5	32,6	28,8
Gaz	19,6	22,9	21,6
Nükleer	1,9	5,9	5,3
Hidro	1,8	2,2	2,4
Yenilenebilir Kaynaklar	0,1	2,1	11,8

2.1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları

1970'lerdeki petrol krizi enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve enerji arzının güvenliğini konularını gündeme getirmiş ve bu kaynakların tükenir kaynaklar olduklarını hatırlatmıştır. Fosil yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azotoksit (N₂O) gibi gazlar atmosferde sera etkisi yaratmakta, küresel ısınma ve iklim değişikliği sorununa neden olmaktadır. Dünya enerji üretiminin yaklaşık %5'ini karşılayan nükleer santrallerin kullandığı uranyum yenilenebilir değildir, ayrıca ortaya çıkarmış olduğu atıkların çevre kirliliği kaygı verici boyutlardadır. Bugün için 350 GW kurulu kapasiteye sahip olan dünyadaki nükleer enerji tesisleri, yılda yaklaşık 10 bin ton nükleer atık üretmektedir. 2050 yılı itibariyle, fosil kökenli enerjinin sadece % 10'unun nükleer enerjiden sağlanması durumunda bile, yaklaşık 1000 tane yeni nükleer santralin kurulması gerekmektedir. Oysa bugün bile dünya genelinde 436 nükleer santral bulunmaktadır. 1000 yeni santralin kurulması mümkün olsa dahi inşa edilmesi onlarca yıl sürecektir. Bu kadar çok sayıda santral kurulunca da uranyum rezervlerinin hızla tükeneceği belirtilmektedir. Nükleer santralin elektrik üretmeye başlaması en az 10 yıl sürmektedir. Bu da nükleer enerjini alternatif bir kaynak olarak kullanımının zor olduğunu göstermektedir (Kum 2009).

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar güneş ışığı, rüzgâr, su, biokütle ve jeotermal olarak sıralanabilir. Yenilenebilir olmaları nedeniyle gelecek kaygısını ortadan kaldırması, ayrıca fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlara neden olmamaları onları geleceğin alternatif enerji kaynakları haline getirmektedir. 2008 yılı itibariyle dünya enerji arzının %5 ini karşılayan yenilenebilir enerji kaynakları için yapılan yatırımlar 155,4 milyar dolarken bu miktarın 2020 yılına kadar 600 milyara ulaşması hedeflenmektedir (Barret 2009).

2.2. Rüzgâr Enerjisi

Bir fırtına veya hortum sırasında rüzgârın sahip olduğu enerji daha net bir şekilde görülebilir (Hansen 2008). Tarihte ilk olarak rüzgâr enerjisi 5000 yıl önce Nil

nehinde yelkenli gemilerin yüzdürülmesinde kullanılmıştır. Avrupalılar 1700’lü ve 1800’lü yıllarda rüzgâr değirmenlerini, ekinlerini öğütmekte ve su pompalamakta kullanmışlardır. Rüzgâr değirmenleri 20. yüzyılın başlarında elektrik jeneratörüne bir rotor eklenmesi ile rüzgâr türbinlerine dönüşmüş ve elektrik üretiminde kullanılmaya başlanmışlardır (Patel 2006).

Rüzgâr enerjisi hızla gelişen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. 1997 yılında 7,5 GW olan kurulu kapasite 2005 yılında 50 GW’a çıkmıştır. 1990’lı yıllarında başında en fazla 300 kW olan rüzgar türbin güçleri günümüzde 100 metre rotor çaplarıyla beraber 50 MW’a ulaşmıştır (Peinke vd 2007).

İlk elektrik şebekelerinde düşük voltajlı kablolar ve DC akım kullanılması nedeniyle kayıplar yüksek olmaktaydı, kayıpları azaltmak için elektrik üretildiği yere yakın mesafede tüketilmekteydi. Bu nedenle bu dönemde tarımsal alanda ihtiyaç olan elektriğin üretiminde rüzgar türbinlerinin kullanılması büyük avantaj teşkil etmiş ve yaygın kullanım alanı bulmuştur. Dizel motorların ve buhar kazanlarının elektrik üretiminde kullanılması ile rüzgar türbinlerine olan ihtiyaç azalmıştır, fakat iki dünya savaşı sırasında ve 1970’li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi nedeniyle sahip olduğu önem, petrole olan bağımlılıklarını azaltmak isteyen ülkeler tarafından tekrar fark edilmiştir. Almanya, ABD, Fransa, İngiltere ve Danimarka gibi ülkeler rüzgar türbinlerini geliştirmek için çalışmalarını sürdürmüşlerdir (Hansen 2008). Bu çalışmalar başlıca; yüksek dayanımlı, hafif, büyük boyutlu, verimli ve ucuz kanatların geliştirilmesi, güç elektroniği parçalarının fiyatlarının düşürülmesi, değişik rüzgar hızlarında yüksek verimde çalışabilecek elektrik jeneratörlerinin imalatı, rüzgar türbinlerinin montaj platformlarının geliştirilmesi ve böylece bakım ve kontrol olanaklarının arttırılması hususlarını kapsamaktadır (Şekil 2.1) (Patel 2005).



Şekil 2.1. Yeni nesil bir rüzgar türbinin şematik resmi (Patel 2005)

2.2.1. Rüzgâr enerjisinin avantajları

Rüzgar enerjisinin başlıca avantajı yenilenebilir temiz bir enerji kaynağı olmasıdır. Fosil yakıtların yarattığı kirlilik, rüzgar türbinleri için söz konusu değildir. Herhangi bir zehirli gaz emisyonu yoktur. Sürekli bir enerji kaynağıdır, dışa bağımlılığı

yoktur. Rüzgar türbinleri herhangi bir operatöre ihtiyaç duymayan otomasyon sistemlerinin kontrolünde çalışan, bakım ihtiyacı düşük makinelerdir. Sadece periyodik bakımlarının yapılması ile 20-30 yıla kadar çalışabilmektedirler.

Rüzgarın kuvvetli olduğu bölgelerde kWh başına üretim maliyetleri, kömür santralleri gibi birçok yaygın enerji tesisinden daha düşüktür. Rüzgar hızlarının çok yüksek olmadığı fakat ulaşımın zor olduğu alanlarda batarya şarjı, su arıtma, su pompalama gibi birçok konuda kullanılabilen önemli bir enerji kaynağıdır (Hansen 2008).

Rüzgar çiftlikleri kuruldukları alanın sadece %1'lik bir bölümünü kullanırlar. Geri kalan alan, tarımsal faaliyetlerde rahatlıkla kullanılabilir. Rüzgar türbinlerinin hurda değerleri söküm maliyetlerini karşılamaktadır. Bir bölgeden söküldüklerinde bölgenin doğal yapısı bozulmamış olur.

Üç ay gibi kısa bir sürede kuruluşları için harcanan enerjiyi üretebilirler bu bakımdan kısa dönemde enerji talebinin karşılanması için uygun bir çözümdür. Çok yer kaplamazlar, deniz üstünde kurulan yüksek kapasiteli modelleri üretilmektedir (Çınar 2002).

2.2.2. Rüzgâr enerjisinin dezavantajları

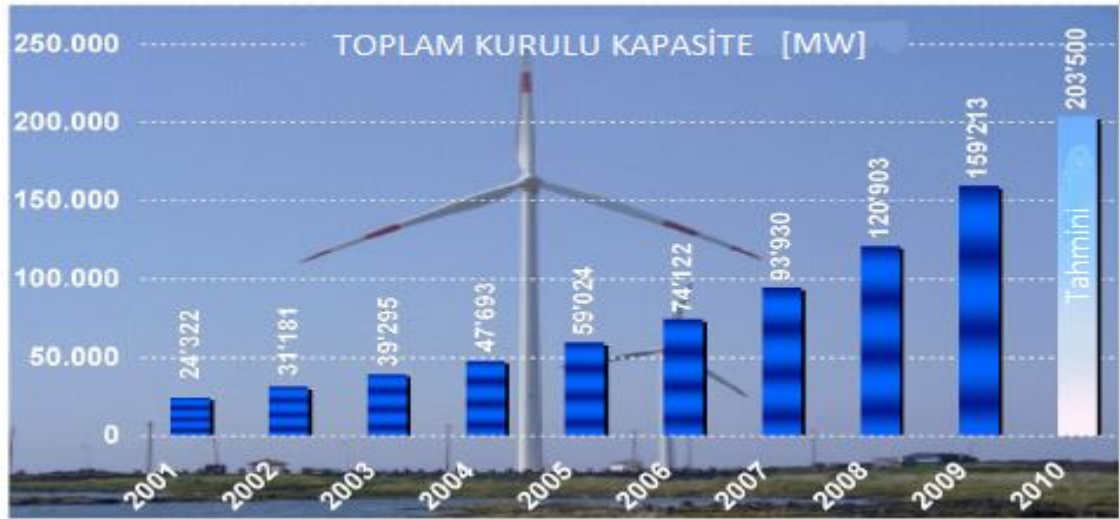
Rüzgar enerjisinin başlıca dezavantajı rüzgar hızlarının değişken olması ve her yerde aynı şiddette esmemesidir. Rüzgar türbinleri verimli çalışabilmeleri için çapları büyüdükçe daha yüksek rüzgar hızlarına ihtiyaç duyarlar. Belirli rüzgar hızlarının altında elektrik üretmezler. 1-3 km civarındaki yerleşim alanları için gürültüye neden olabilirler, yine bu alan için televizyon, radyo telsiz gibi elektromanyetik cihazların frekanslarını bozucu etki yaparlar. Kuş ölümlerine neden oldukları söylenmekteyse de, trafikte araçlar tarafından öldürülen kuş sayısı dikkate alındığında bunun önemsenmeyecek bir miktarda olduğu gözükmektedir. Cilalı kanatlara gelen güneş ışığı da civara yansiyarak parıltı etkisi yapabilir. Bu da türbin civarında yaşayan insanları rahatsız edebilir (Çınar 2002).

2.2.3. Dünyada rüzgar enerjisi

EİE'nin (2010) verilerine göre, Dünyadaki toplam rüzgar enerjisi 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmaktadır, 2020 yılı itibariyle dünya elektrik enerjisi talebi 25.579 TWh/yıl olması öngörülmektedir, bu durumda rüzgar enerjisinin tek başına dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabileceği görülmektedir (Yağlı 2005).

2009 yılı itibariyle dünyadaki kurulu rüzgar türbini gücü 159,2 GigaW, enerji üretimi ise 340 TWh'tir, bu dünya enerji üretiminin %2 sini oluşturmaktadır (Wikipedia 2010). Rüzgar enerjisindeki kurulu güç son yıllarda hızla artmış (Çizelge 2.2) ve son üç yılda ikiye katlamıştır (WWEA 2010).

Çizelge 2.2. Dünya rüzgar enerjisi kapasitesinin değişimi (WWEA 2010)



Dünyada en yüksek kurulu güce ABD sahiptir, onu son yıllarda yaptığı büyük atılımla Çin takip etmektedir, Çin gelişen ekonomisi ile beraber rüzgar enerjisinde de büyük gelişme göstermiş, 2008 yılındaki kurulu gücünü 2009 yılında ikiye katlayarak dünyada en yüksek kapasiteli ikinci devlet olmuştur (Çizelge 2.3). Danimarka ve Almanya'da km^2 'ye ve kişi başına düşen güç miktarlarının yüksek oluşu bu ülkelerin rüzgar gücünde potansiyellerini en üst düzey kullandıklarını göstermektedir (WWEA 2010). Almanya'daki büyümenin yavaşlamasının nedeni uygun kara üstü sahaların doyuma ulaşması ve rüzgar gücü için şebekeye elektrik besleme tarifelerindeki azalmadır (Uyar 2008).

Dünyada 2009 yılı itibariyle rüzgar türbinlerinden sağlanan 340 TWh'lik elektrik enerjisi, toplam elektrik talebinin %2 sini karşılamaktadır. Danimarka'da bu oran %20, Portekiz'de %15, İspanya'da %14, Almanya'da %9'dur (WWEA 2010).

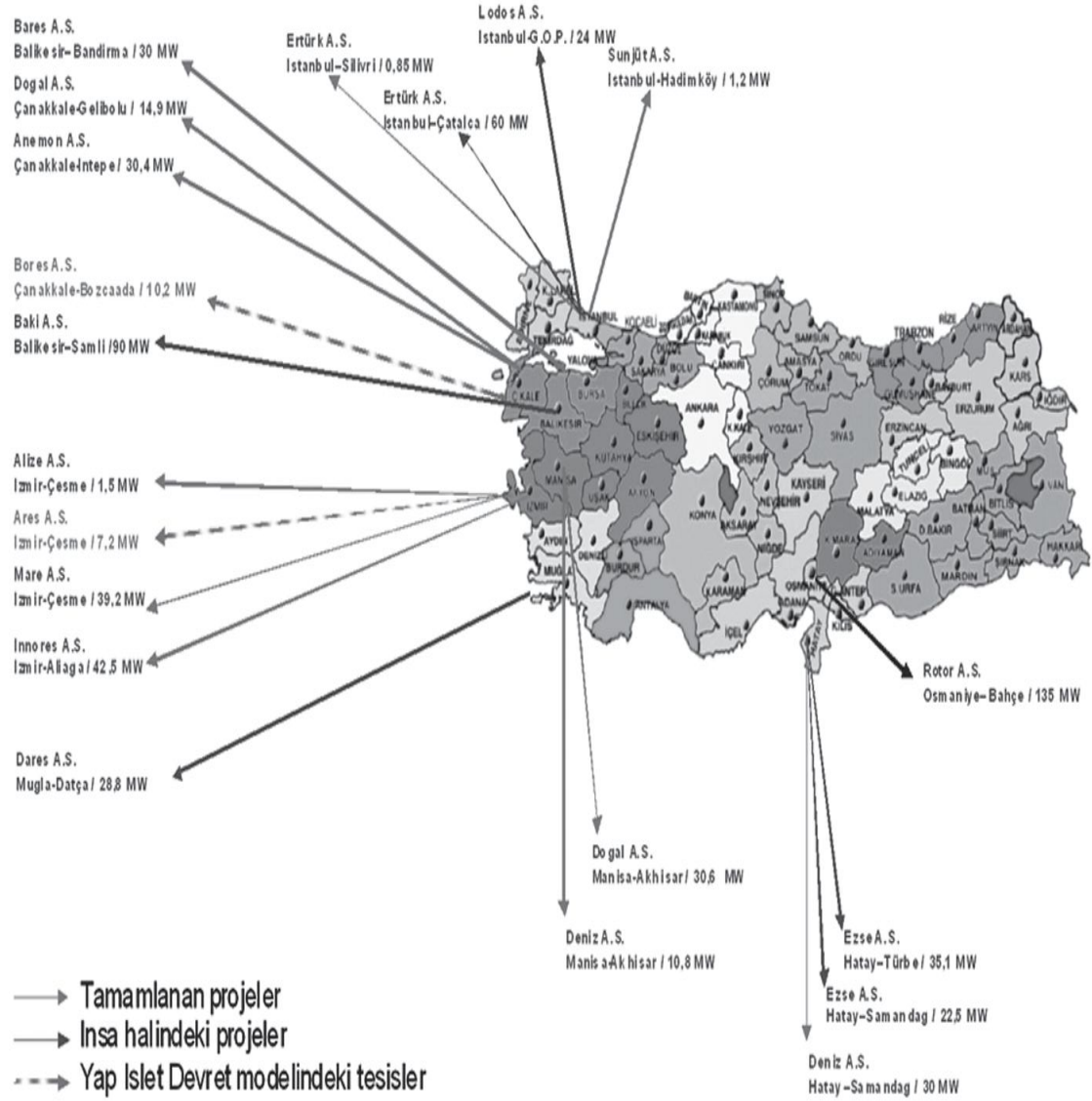
Çizelge 2.3. Dünya rüzgar enerjisi kapasitesinin değişimi (WWEA 2010)



2.2.4. Türkiye'de rüzgar enerjisi

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli tüm Avrupa ülkelerinden fazladır. Mevcut teknolojik gelişmeler ve ülkemizdeki rüzgar hızları dikkate alındığında ülkemizin rüzgar türbini teknik potansiyeli 150 GW civarındadır. 10/05/2005 tarih ve 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'la beraber değişen mevzuat ile özel teşebbüslerin rüzgar türbini kurmalarının önü açılmış, bir günle sınırlı olarak açılan rüzgar güç santrali lisans başvuruları 78 GW kapasiteye ulaşmıştır. Daha önceden yapılmış olan 5 GW lık başvuru ile beraber bu rakam ele alındığında ülkemizde rüzgar enerjisi yatırımları önemli bir gelecek vaat etmektedir (Uyar 2009).

TÜRKİYE'DEKİ RÜZGAR SANTRALLERİ



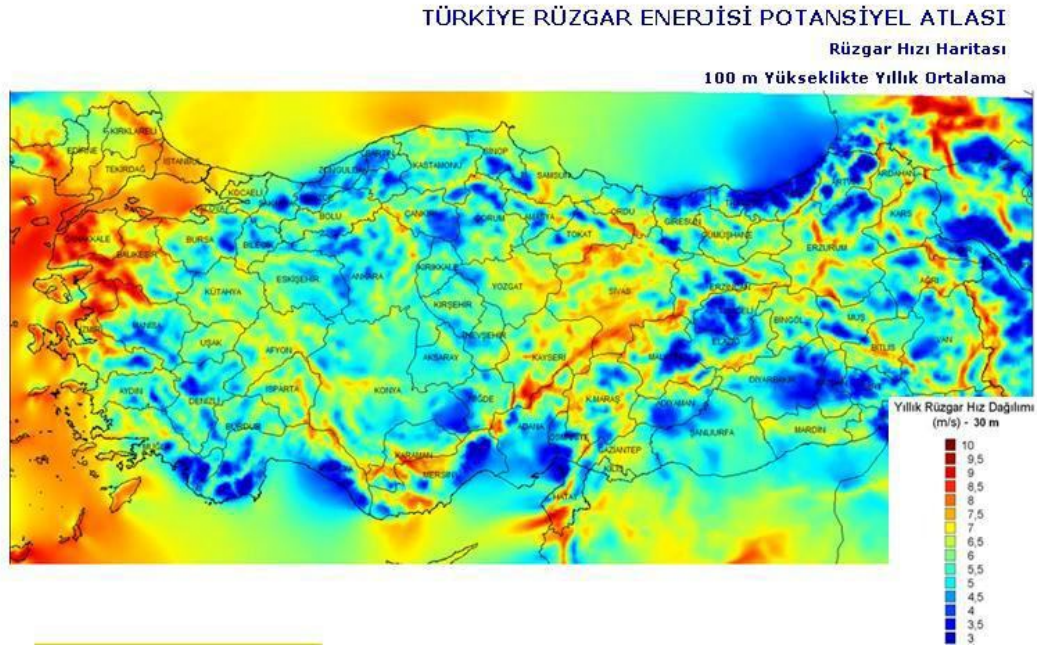
Şekil 2.2. Türkiye'deki rüzgar santralleri (Uyar 2009)

Çizelge 2.4. Türkiye’deki rüzgar santralleri (Uyar 2009)

TÜRKİYE’DEKİ RÜZGAR SANTRALLARI					
Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin imalatçısı	Türbin adet ve kapasitesi
İzmir-Çeşme	Alize A.Ş.	1998	1.50	Enercon	3 adet 500 kW
İzmir-Çeşme	Güçbirliği A.Ş.	1998	7.20	Vestas	12 adet 600 kW
Çanakkale-Bozcaada	Bores A.Ş.	2000	10.20	Enercon	17 adet 600 kW
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt A.Ş.	2003	1.20	Enercon	2 adet 600 kW
Balıkesir-Bandırma	Bares A.Ş.	I/2006	30.00	GE	20 adet 1.500 kW
İstanbul-Silivri	Ertürk A.Ş.	II/2006	0.85	Vestas	1 adet 850 kW
İzmir-Çeşme	Mare A.Ş.	I/2007	39.20	Enercon	49 adet 800 kW
Manisa-Akhisar	Deniz A.Ş.	I/2007	10.80	Vestas	6 adet 1.800 kW
Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30.40	Enercon	38 adet 800 kW
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	14.90	Enercon	13 adet 800 kW + 5 adet 900 kW
Hatay-Samandağ	Deniz A.Ş.	I/2008	30.00	Vestas	15 adet 2.000 kW
Manisa-Sayalar	Doğal A.Ş.	I/2008	30.60	Enercon	38 adet 800 kW
İzmir-İliğa	Innores A.Ş.	I/2008	42.50	Nordex	17 adet 2.500 kW
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos A.Ş.	I/2008	24.00	Enercon	12 adet 2.000 kW
İstanbul-Çatalca	Ertürk A.Ş.	I/2008	60.00	Vestas	20 adet 3.000 kW
İŞLETMEDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			33.35		
Balıkesir-Şamlı	Baki A.Ş.	II/2008	114.00	Vestas	30 adet 3.000 kW
Muğla-Datça	Dares A.Ş.	II/2008	28.80	Enercon	36 adet 800 kW
İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			142.80		
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	35.10	Nordex	900 kW
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	22.50	Nordex	2.500 kW
Aydın-Didim	Ayen A.Ş.	II/2008	31.50	Suzlon	2.100 kW
İzmir-Çeşme	Kores A.Ş.	II/2008	15.00	Nordex	2.500 kW
Balıkesir-Susurluk	Alize A.Ş.	II/2008	19.00	Enercon	17 adet 800 kW ve 6 adet 900 kW
Osmaniye-Bahçe	Rotor A.Ş.	I/2009	135.00	GE	54 adet 2.500 kW
İzmir - Çeşme	Mazı-3 Res Elk. Ür. A.Ş.	I/2009	22.50	Nordex	9 adet 2500 kW
Balıkesir-Bandırma	Borascio A.Ş.	I/2009	45.00	Vestas	15 adet 3000 kW
Tekirdağ-Şarköy	Alize A.Ş.	I/2009	28.80	Enercon	14 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Balıkesir-Havran	Alize A.Ş.	I/2009	16.00	Enercon	8 adet 2000 kW
Çanakkale-Ezine	Alize A.Ş.	I/2009	20.80	Enercon	10 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
Hatay-Belen	Belen A.Ş.	I/2009	30.00	Vestas	10 adet 3000 kW
Manisa-Kırkağaç	Alize A.Ş.	II/2009	25.60	Enercon	32 adet 800 kW
Manisa-Soma	Soma A.Ş.	II/2009	140.80	Enercon	176 adet 800 kW
Edirne-Enez	Boreas A.Ş.	II/2009	15.00		
İzmir-İliğa	Doruk A.Ş.	II/2009	30.00	Enercon	15 adet 2.000 kW
İzmir-İliğa	Yapısan İnş. Elk. San. Tic. A.Ş.	II/2009	90.00	Nordex	36 adet 2500 kW
İzmir-İliğa	Doğal A.Ş.	I/2010	30.00	Enercon	15 adet 2000 kW
İzmir-Foça	Doğal A.Ş.	I/2010	30.00	Enercon	15 adet 2000 kW
Balıkesir-Kepsut	Poyraz A.Ş.	I/2010	54.90	Enercon	61 adet 900 kW
Manisa-Soma-Kırkağaç	Bilgin Elektrik Üretim A.Ş.	I/2010	90.00	Nordex	36 adet 2500 kW
Balıkesir-Kepsut	Bares Elektrik Üretim A.Ş.	I/2010	142.50	Nordex	57 adet 2500 kW
TÜRBİN TEDARİK SÖZLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI			1,070.00		
GENEL TOPLAM			1,546.15	MW	

Rüzgar potansiyeli bakımından zengin olan bölgelerimiz Ege, Marmara, Batı Karadeniz ve Doğu Akdeniz kıyılarıdır. Elektrik İşleri Etüd idaresi tarafından hazırlanan “Türkiye Rüzgar Atlası” na göre yerleşim alanları dışında 50 m yükseklikteki rüzgar hızları, Marmara, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz kıyılarında 6.0 –

7.0 m/s, iç kesimlerde ise 5.5 – 6.5 m/s civarında, Batı Akdeniz kıyılarında 5.0 –6.0 m/s iç kesimlerde 4.5 – 5.5 m/s, Kuzey –Batı Egede ise kıyılarda 7.0 - 8.5 m/s, iç kesimlerinde ise 6.5 - 7.0 m/s'dir. Bu değerler ortalama değerlerdir, bazı dağlık alanlar, etrafı açık karasal alanlar ve su kütlelerinin kıyılarında yüksek rüzgar enerjisi potansiyelleri de bulunmaktadır (Şekil 2.3). Yapılan uydu araştırmaları, Türkiye'nin rüzgar enerjisi bakımından zengin olduğunu göstermektedir. Türkiye ile yakın coğrafyadaki diğer ülkelerin yaptığı ölçüm verileri de bu bulguyu desteklemektedir (Uyar 2009).



Şekil 2.3. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası (EİE 2009)

2.3. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar enerjisinin yelkenli gemilerde kullanımı gibi çok özel kullanımları dışında günümüzde asıl kullanımı rüzgar türbinleri marifetiyle olmaktadır. Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisinin kanatları döndürmesi ile shaftın dönmesi ve bu sayede su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma, yağ çıkarma ve en yaygın olarak elektrik jeneratörü ile elektrik enerjisi temin etme işlerinde kullanılmaktadır.

Bir elektrikli rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Pervane milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır.

Son iki yüzyılda rüzgar enerjisi alanında yapılan gelişmeler sonucunda rüzgar enerjisi endüstrisi dünyada çok önemli bir sektör haline gelmiştir. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği'nin (WWEA) 2010 yılındaki raporuna göre 2009 yılı sonu itibariyle dünya üzerindeki kurulu rüzgar gücü 160 GW' a, rüzgar enerjisi sektörü 50 milyar avroya ve bu sektörde çalışan kişi sayısı 550.000'e ulaşmıştır (Kühn 2010).

Rüzgar türbinleri 1980'li yıllarda ortalama 30 kW gücüne ve 15 metreden az rotor çapına sahipken, bugün 5 MW dan daha büyük güçte ve 125 metreden fazla rotor çapına sahip rüzgar türbinleri üretilmektedir. 2 MW ve daha büyük güçteki multi megawatt rüzgar türbini diye adlandırılan rüzgar türbinleri şu an markette hakim konumdadır.

2.3.1. Rüzgar türbinlerinin boyutlarına göre sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri boyutlarına, rotor dönüş hızlarına, dönme eksenlerine veya kullanım alanlarına göre sınıflandırılabilirler.

Rüzgar türbinleri boyutlarına göre büyük ölçekli ve küçük ölçekli olarak sınıflandırılabilirler. Küçük ölçekli rüzgar türbinleri hakkında değişik enstitüler tarafından güç değeri, süpürme alanı veya yükseklikleri dikkate alınarak bazı standartlar getirilmiştir (Çizelge 2.5). Birkaç yüz kW'lık batarya şarj eden sistemlerden 30 kW'lık uygulamalara kadar çok değişken kullanım alanları olan küçük ölçekli rüzgar türbinlerine olan ilgi son yıllarda daha da artmıştır. Özellikle kırsal bölgelerde ve elektrik sistemi bulunmayan yerlerde küçük ölçekli rüzgar türbinleri çok fazla potansiyel kullanım alanına sahiptir (Kühn 2010).

Çizelge 2.5. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin değişik enstitülere göre tanımları (Kühn 2010)

Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliği (AWEA)	Konutlar için: 1kW'dan 10 kW'a kadar Ticari sistemler için: 21 kW'dan 100 kW'a kadar
İngiliz Rüzgar Enerji Birliği (BWEA)	50 kW'dan küçük Mikro rüzgar türbinleri: rotor çapı 2,1 metreden küçük, çatıya 3-4 metre yükseğe veya ayrı bir direğe 16 metre yükseğe kadar dikilen. Küçük rüzgar türbinleri: rotor çapı 2,1 metreden büyük, 30 metreye kadar yükseğe, bağımsız veya büyük konutların üstüne dikilebilen.
Alman Rüzgar Enerji Birliği (BWE)	100 kW'a kadar Konutlarda 30 kW'a kadar
IEC 61400-2	Rotor süpürme alanı 200 m ² den küçük 1.000V AC veya 1.500V DC den küçük voltaj üreten 40 m ² den büyük sistemlerde manuel durdurma tuşu veya prosedürü olmalı
IEC 61400-11	Hub yüksekliği 30 metreden az ve en fazla 150 kW gücünde

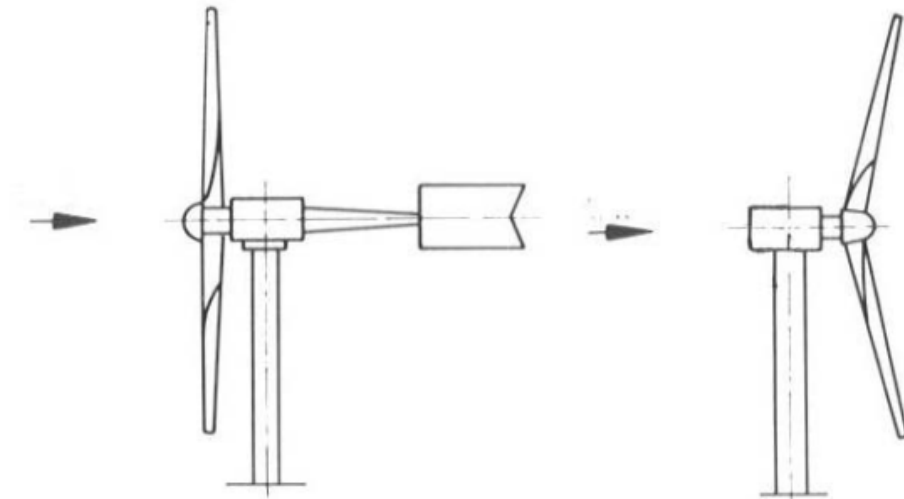
2.3.2. Rüzgar türbinlerinin dönüş eksenlerine göre sınıflandırılması

Rüzgar akışının asimetrik yüzeylere çarpması sonucunda oluşan kuvvet, dönme, salınma gibi hareketlere neden olmaktadır, bu husustan yararlanarak çok çeşitli rüzgar türbini tasarımları yapılmıştır. Bazı tasarımlar günümüz şartları için pek uygulanabilir gözükmesine de gelişecek teknoloji, uygun materyaller ve kontrol elemanları, bu tasarımları uygulanabilir hale getirebilir. Ragheb'e (2010) göre rüzgar içinde kinetik enerjiden daha fazla potansiyel enerji bulunduğu için, basınç farkından yararlanan rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri gelecekte daha uygun bir yaklaşım olacaktır.

Günümüzde genel olarak rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre sınıflandırılır. Bunlar yatay eksenli rüzgar türbinleri ve dikey eksenli rüzgar türbinleridir.

2.3.2.1.Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip rüzgar türbinlerinde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir, bu nedenle rüzgar yönüne dönük olmaları gerekir. Rotor mili ve elektrik jeneratörü kulenin üzerindedir. Ticari rüzgar türbinleri genelde yatay eksenlidir. Önden rüzgarlı rüzgar türbinlerinin yönlerinin rüzgara dönmesi için bir kuyruk dümenine veya elektronik kontrol sistemine ihtiyaçları vardır. Küçük ölçekli rüzgar türbinleri için kuyruk dümeni daha uygun bir çözümdür, büyük ölçekli rüzgar türbinleri için ise rüzgarın yönünü algılayıp buna göre rotoru döndüren servo motorlar kullanılır, bu sisteme kısaca YAW sistemi denilmektedir. Arkadan rüzgarlı rüzgar türbinleri rüzgar yönüne doğru kendiliğinden dönerler, herhangi bir kuyruk veya kontrol elemanına ihtiyaç yoktur. Kanatları daha esnek yapılabilir bu sayede daha hafif olarak üretilebilirler. Rotor kulenin arkasında olduğundan kanat kule hizasından geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgarlı türbinlerden daha çok zarar verebilir (Şekil 2.4) (Ragheb 2010, Emniyetli 2010). Enercon adlı şirketin ürettiği e-126 adındaki 126 m rotor çapında ve 7 MW gücündeki türbin şu an en büyük rüzgar türbinidir, Almanya ve Belçika'nın bir çok yerine kurulmuşlardır. Norveç 2011 yılında 10 MW gücünde ve 145 metre rotor çapında bir rüzgar türbini test amaçlı üretmeyi amaçlamaktadır (Jorgensen ve Nielsen 2008, Ecogeek 2008, Wikipedia 2010).

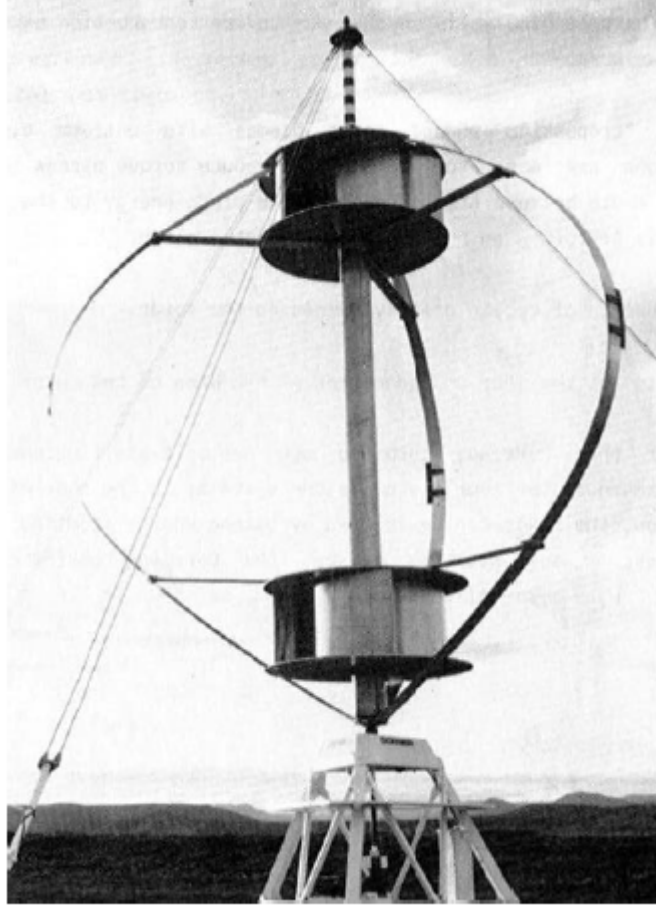


Şekil 2.4. Önden rüzgarlı ve arkadan rüzgarlı yatay eksenli rüzgar türbinleri

2.3.2.1.Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde rotor mili rüzgar yönüne diktir. Genelde deney amaçlı üretilirler, ticari kullanımı çok azdır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerine göre temel avantajları rüzgar yönünden bağımsız olmalarıdır. Yere monte edilebilirler, bir kuleye ihtiyaçları yoktur. Bu nedenle elektrik jeneratörü, dişli kutusu gibi parçaları yerde bulunacağından montaj ve bakım kolaylığı sağlanır. Fakat rotor milinin uzun oluşu ve aşırı yüklere maruz kalması sorunlara neden olmaktadır. En önemli dezavantajı verimlerinin düşük olmasıdır, türbin kanadının yarım tur rüzgar yönünün tersine dönmek zorunda kalması verimliliği düşürmektedir. Bazı tasarımlarda ilk hareketin dışarıdan verilmesi gerekir (Emniyetli 2007, Ragheb 2010).

Fransız mucit Georges Jean Marrie Darrieus kendi adıyla anılan Darrieus tipi rüzgar türbin için önce 1925 yılında Fransa’da sonra 1931 yılında ABD’de patent almıştır. Fakat o yıllar için bu buluş fazla ilgi görmemiştir (Jorgensen ve Nielsen 2008). Genelde yumurta çırpacağına benzer iki veya üç kanat kullanılır, kanatların aerodinamik yapıları sonucu oluşan rüzgarın kaldırma kuvveti ile çalışırlar. Kendi başlarına harekete geçemezler, bu nedenle Savonius tipi rüzgar türbinleri ile beraber karma sistemlerde kullanılırlar veya ilk başlangıç hareketi verecek bir indüksiyon motoru kullanılır (Şekil 2.5) (Ragheb 2010).



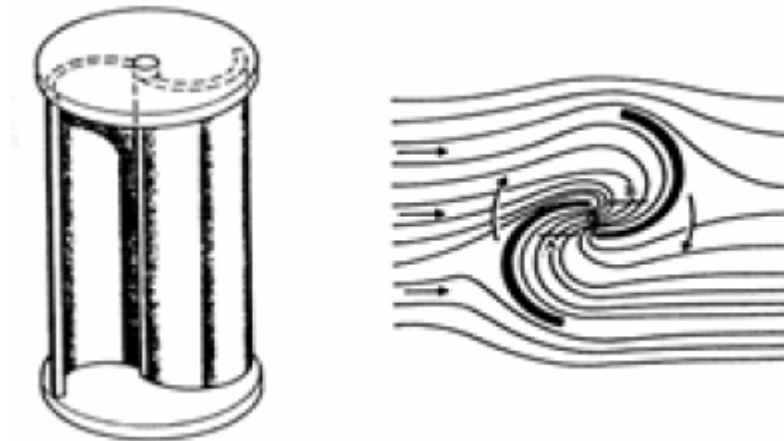
Şekil 2.5. İki savonius tipi rüzgar türbin ile başlatılan bir darrieus tipi rüzgar türbini (Ragheb 2010)

Giromill veya H-rotor olarak adlandırılan darrieus tipi rüzgar türbininin bir başka çeşidinde, yumurta çırpacağı benzeri kanatların yerini düz aerodinamik profiller almıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Giromill veya H-rotor rüzgar türbini (Jorgensen ve Nielsen 2008)

Bir diğer tip dikey eksenli rüzgar türbini olan savonius tipi rüzgar türbininin patentini 1930 yılında Finlandiyalı Sigurd J. Savonius almıştır. Bu rüzgar türbininde rüzgarın sadece sürüklenme kuvveti kullanılır, bu nedenle hızları düşüktür ve hiçbir zaman rüzgar hızından daha fazla olamaz (Şekil 2.7) (Jorgensen ve Nielsen 2008). Düşük hız ve yüksek torkta çalışırlar bu nedenle su pompala amaçlı kullanıma uygundurlar (Smith 2007).



Şekil 2.7. Savonius tipi rüzgar türbini (Jorgensen ve Nielsen 2008)

2.4. Rüzgar Türbini ile İlgili Formüller

2.4.1. Rüzgar gücünün hesabı

Rüzgar hareket halinde bir kütle olduğundan belli bir kinetik enerjiye sahiptir.

V hızında ve m_h kütleli rüzgarın kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m_h V^2 \quad \text{dir.} \quad (2.1)$$

Bunu birim zamana bölersek güç denklemi, kütleli debiye bağlı olarak;

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}_h V^2 \quad \text{bulunur.} \quad (2.2)$$

Hareket halindeki hava kütlesi, rüzgar türbininin süpürme alanına kanat sistemine düşey yönde çarpar ve sahip olduğu kinetik enerjinin bir bölümünü kaybederek rüzgar türbininin dönüşüne sebep olur. Kanatların süpürme alanına çarpan havanın kütleli debisi;

$$\dot{m}_h = \rho_h S V \quad \text{dir.} \quad (2.3)$$

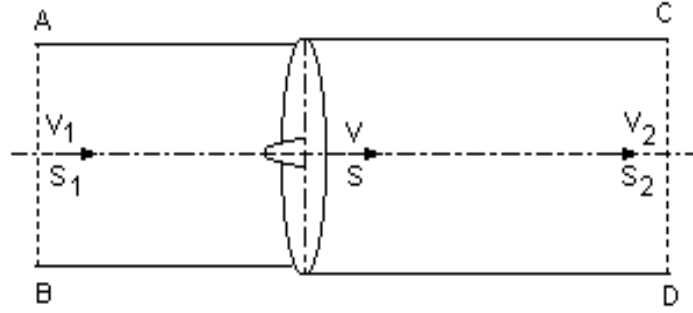
2.3 denklemi 2.2 denkleminde konulursa R yarıçaplı rotorun S süpürme alanından geçen, ρ_h yoğunluğunda ve V hızındaki havanın yani rüzgarın gücü;

$$P = \frac{1}{2} \rho_h \pi R^2 V^3 \quad \text{olarak bulunur.} \quad (2.4)$$

2.4.2. Betz teorisi

Alman bilim adamı Albert Betz tarafından 1919 yılında geliştirilen bu teoriye göre yatay eksenli türbinlerden elde edilebilecek enerji, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin %59,3'ünden fazla olamaz.

Kontrol hacmine göre yapılan hesaplamalarda, rotora giren ve çıkan hava miktarı eşit, doğrusal ve sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. İdeal ağırlıksız bir türbin rotoru kabulü yapılmış, rotorun merkezinde kanatların bağlandığı merkez kısmı ihmal edilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Betz teorisine göre Rüzgar türbinindeki hava akışı

Kontrol hacmi için süreklilik denklemi,

$$S_1.V_1 = S_2.V_2 = S.V \quad \text{dir} \quad (2.5)$$

Euler teoremine göre rüzgar tarafından rotordan harcanan kuvvet,

$$F = \rho.S.V.(V_1 - V_2) \quad \text{dir.} \quad (2.6)$$

Rotor tarafından absorbe edilen güç;

$$P_t = FV = \rho.S.V^2.(V_1 - V_2) \quad \text{dir.} \quad (2.7)$$

Bu güç rüzgarın kinetik enerjisinden alınmaktadır. Rotor girişinden rotor çıkışına kadar kinetik enerji değişim miktarı ikisinin farkına eşit olur.

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot V_1 - \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot V_2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.8)$$

Rotordaki rüzgarın hızı veya ortalama hız,

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{dir} \quad (2.9)$$

bu değer 2.8 ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\Delta E_k = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad \text{elde edilir.} \quad (2.10)$$

Elde edilen bu bağıntı güç formülüdür ve buradaki V_1 giriş hızıdır. Burada değişken olan hız V_2 hızıdır. V_2 'nin bir fonksiyonu olan P gücünün hesaplanması için eşitliğin iki tarafının diferansiyeli alınır.

$$\frac{dP_t}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 - 3 \cdot V_2^2) \quad (2.11)$$

Elde edilen bu ifade sıfıra eşitlendiği zaman denklemin iki çözümü mevcuttur.

$$\frac{dP_t}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 - 3 \cdot V_2^2) = 0 \quad (2.12)$$

Denklemin ilk çözümü için $V_2 = -V_1$ olur ve (-) olduğu için fiziksel bir anlamı yoktur. İkinci çözüm $V_2 = \frac{V_1}{3}$ olur ve bu değer maksimum gücü elde etmek için kullanılır. Bu değer güç formülünde yerine yazılırsa,

$$P_{maks} = \frac{8}{27} \rho . S . V_1^3 \quad (2.13)$$

Maksimum güç formülü elde edilir.

Bir başka ifadeyle,

$$P_{maks} = 0,593 . \frac{1}{2} \rho . S . V^3 \text{ dir.} \quad (2.14)$$

Betz Teoremi rüzgar gücünün teorik olarak en fazla % 59,3'ünün rüzgar türbini tarafından kullanılabileceğini göstermektedir. Bu oran silindirik bir akış olduğu, rüzgar yönünün sürekli eksen yönünde olduğu ve her yerde uniform olduğu kabulleri sonucu bulunmaktadır. Bu duruma kanatların aerodinamik yapısı, elektrik jeneratörünün iç kayıpları aktarma organlarının kayıpları, havanın hızı ve rotorun devri gibi faktörler eklendiğinde gerçek verim %59,3 den daha küçük olmaktadır. En uygun aerodinamik yapı ve diğer şartlarda bu değerin %45 değerinden fazla olamayacağı deneylerle tespit edilmiştir (İlkılıç 2003). Bunun nedeni olarak Çetin vd (2005) teoride dikkate alınmayan profil kayıpları, kanat ucu kayıpları, girdap kayıpları ve kanat sayısından kaynaklanan kayıpları göstermiştir.

2.4.3. Kanat uç hız oranı ve kanat devir sayısı

Rüzgar hızı ile rotorun devir sayısı arasındaki ilişkiyi veren faktöre kanat uç hız oranı, İngilizce olarak Tip Speed Ratio (TPS) adı verilmektedir, λ simgesi ile gösterilir.

$$\lambda = \frac{\text{kanat uç hız}}{\text{rüzgar hız}} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V} \quad (2.15)$$

Rotor açısal hızı N (d/d) devir sayısına göre,

$$\omega = \frac{2\pi . N}{60} \quad \text{şeklinde yazılabilir.} \quad (2.16)$$

Böylece kanat hız oranı, rotor devir sayısı (d/d), rüzgar hızı (m/s) ve rotor yarı çapı (m) dikkate alınır

$$\lambda = \frac{\pi \cdot N \cdot r}{30 \cdot V} \quad \text{şeklinde yazılabilir (Çetin vd 2005).} \quad (2.17)$$

2.4.3.1. Optimum kanat uç hız oranı hesabı

Maksimum verim için optimum kanat uç hız oranı, rotordan geçerken havanın tekrar temini için geçen süre ile bir kanadın yerine diğer kanadın aynı konumu almasına kadar geçen süreye bağlı olarak hesaplanabilir.

Kanat sayısı n olan bir rotorda, bir kanadın ardından gelen kanadın aynı konumu alması için geçen süre;

$$t_s = \frac{2\pi}{n\omega} \quad \text{dir.} \quad 2.18$$

Rotordan değişmeden geçen hava akımının boyu s kabul edilirse, rüzgarın normale dönmesi için gereken süre;

$$t_w = \frac{s}{V} \quad \text{dir.} \quad 2.19$$

Eğer $t_s > t_w$ olursa rüzgarın bir kısmı kullanılamaz, eğer $t_w > t_s$ olursa bu kez rüzgarın bir kısmının rotordan geçişi mümkün olmaz. Maksimum güç temini bu iki zaman periyodunun eşit olduğu zaman mümkün olur.

$$t_s \approx t_w$$

$$\frac{2\pi}{n\omega} \approx \frac{s}{V} \Rightarrow \frac{n\omega}{V} \approx \frac{2\pi}{s} \quad 2.20$$

Buradan optimum açısal hız;

$$\omega_{opt} \approx \frac{2\pi V}{ns} \text{ olarak bulunur.} \quad 2.21$$

Sonuç olarak, optimum güç temini için, rotorun gelen rüzgarın hızıyla uyumlu bir hızda dönmesi gerekmektedir. 2.21 denklemi 2.16 denkleminde yerine konulursa, optimum kanat uç hız oranı;

$$\lambda_{opt} \approx \frac{\omega_{opt}}{V} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s} \right) \text{ olarak yazılır.} \quad 2.22$$

Optimum kanat uç hız oranı büyük oranda rotordaki kanat sayısına bağlıdır. Daha az kanat sayısı rotorun daha hızlı dönmesine neden olur. Ampirik olarak elde edilen verilere göre s değeri rotor yarıçapının yarısına eşittir (Ragheb 2009).

$$\frac{s}{r} \approx \frac{1}{2}$$

Bu durumda optimum kanat uç hız oranı;

$$\lambda_{opt} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s} \right) \approx \frac{4\pi}{n} \quad 2.23$$

Dikkatlice hazırlanan yüksek verimli bir kanat profili ile bu değerler % 25-30 kadar arttırılabilir. Bu sayede daha yüksek rotor hızlarına ve daha yüksek güçlere ulaşılabilir. Bu artış dikkate alınırsa optimum kanat uç hız oranı aralığı;

$$\lambda_{opt} \approx \frac{4\pi}{n} (1,25 - 1,30) \text{ arasındadır.} \quad 2.24$$

3 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

$$\lambda_{opt} : 5,26 - 5,45 \text{ arasındadır,}$$

2 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

$\lambda_{opt} : 7,54 - 8,16$ arasındadır.

Kötü tasarlanan bir kanat profilinde bu değer çok düşük olacak ve rüzgar türbini yavaşlama ve durma eğilimi gösterecektir. Eğer kanat uç hız oranı çok yüksek olursa, rüzgar türbini türbülanslı hava içerisinde çok hızlı dönecek ve bu nedenle rüzgar akışından yeterli güç elde edilemeyecektir, ayrıca rüzgar türbininin hasar görme ihtimali artacaktır.

2.4.4. Güç Katsayısı C_p

Güç katsayısı, rüzgar türbininden elde edilen gücün, rüzgarın sahip olduğu güce oranı olarak tanımlanır.

$$C_p = \frac{P_t}{P}$$

2.4 deki rüzgar gücü ifadesi yerine konulursa;

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \quad \text{olarak yazılır.} \quad 2.24$$

Sonuç olarak rüzgar türbininin gücü

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad \text{olarak yazılır.} \quad 2.25$$

Betz teorisine göre bu değer Betz limiti diye adlandırılan 0,593 değerini geçemez. Pratikte bu değer, kanat profilinin yapısından kaynaklanan kayıplar, kanat ucu kayıpları, türbülans kayıpları ve kanat sayısından kaynaklanan nedenlerden dolayı en fazla 0,45 değerine ulaşabilmektedir (Çetin vd 2005).

2.4.4.1. Kanat profilinin yapısından kaynaklanan kayıplar

Kanat profilinin yapısından kaynaklanan direnç nedeniyle kanat profilinin verimi;

$$\eta_{profil} = 1 - (\lambda / \varepsilon) \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.} \quad 2.26$$

Burada ε , kayma sayısı olarak adlandırılmakta ve rüzgarın kanat üzerinde uyguladığı kaldırma kuvvetinin C_L , sürüklenme kuvvetine C_D , oranı olarak ifade edilmektedir, λ kanat uç hız oranıdır.

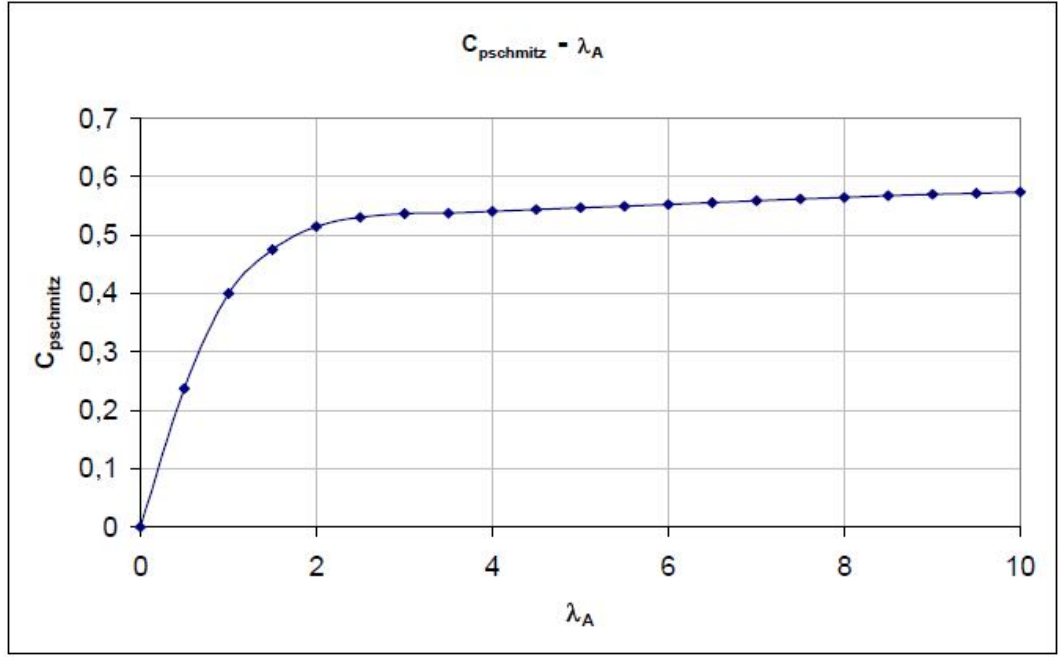
$$\varepsilon = \frac{C_L}{C_D} \quad 2.27$$

2.4.4.2. Kanat ucu kayıpları

Kanadın ucunda, kanadın alt tarafından üst tarafına doğru genişleyerek gelen hava akımı bir miktar güç kaybına neden olur. Bu kayıp η_{uc} olarak yazılabilir.

2.4.4.3. Girdap kaybı

Betz teorisinde kabul edilenin aksine rüzgarın yönü türbin kanatlarıyla karşılaştığında değişmektedir. Bu kaybı dikkate alarak belirlenen Schmitz güç katsayısı $C_{pschmitz}$ nın kanat uç hız oranı λ ya göre değişimi Şekil 2.9'da ve Çizelge 2.6'da gösterilmiştir (Çetin vd 2005).



Şekil 2.9. $C_{pschmitz}$ - λ eğrisi (Çetin vd 2005)

Çizelge 2.6. Girdap kayıpları için $C_{pschmitz}$ - λ değerleri (Çetin vd 2005)

λ	$C_{Pschmitz}$
0	0,000
0,5	0,280
1	0,400
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	0,550
6	0,553
6,5	0,556
7	0,559
7,5	0,562
8	0,565
8,5	0,568
9	0,570
9,5	0,572
10	0,574

2.4.4.4. Kanat sayısından kaynaklanan kayıp

Kanat sayısı dörtten fazla olan rüzgar türbinlerinde, rotordan geçen havanın hareketi çok daha karmaşık bir hal alır bu nedenle teorik olarak analizini yapmak güçleşir. Schmitz ve Glauert tarafından geliştirilen teoride dört ve daha az kanat sayılı türbinler dikkate alınmıştır. Bu nedenle kanat sayısına bağlı olarak bir verim faktörünün $\eta_{kanatlar}$ eklenmesi gerekir.

Bahsedilen bu kayıplar da dikkate alınırsa güç faktörü C_p şu şekilde yazılabilir.

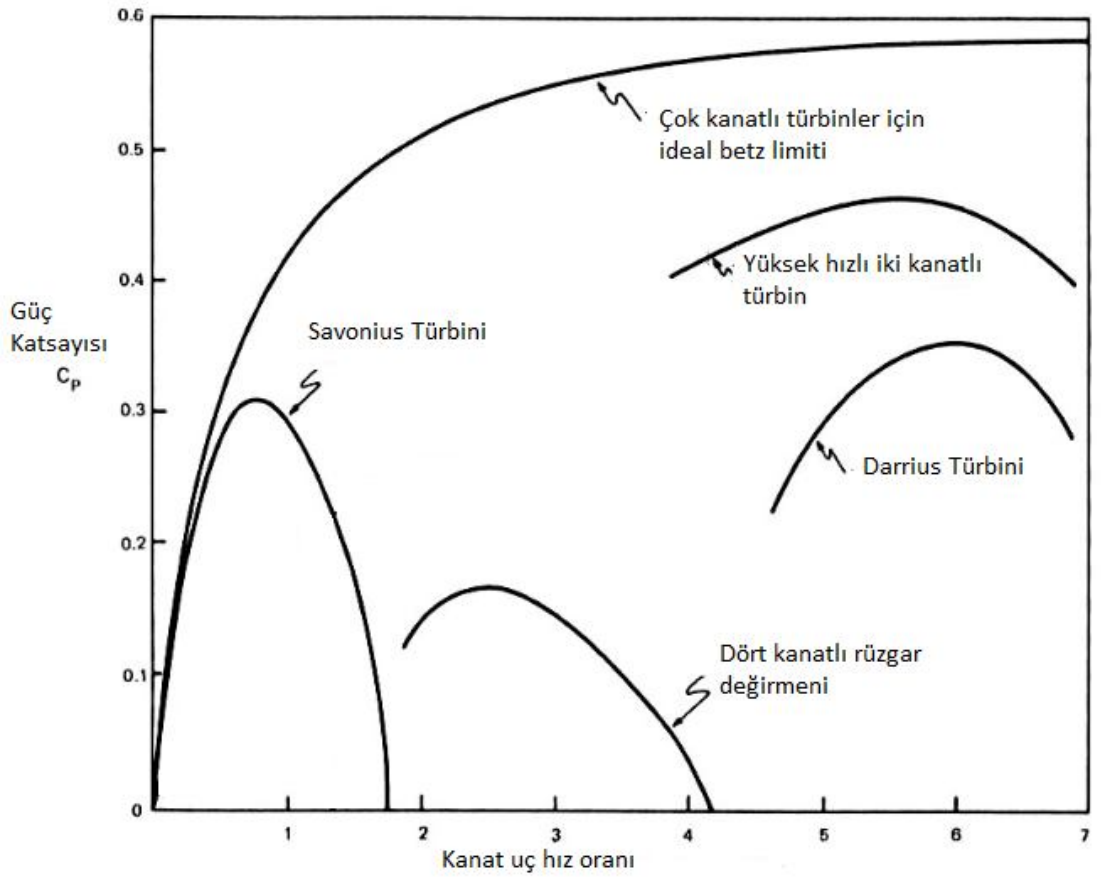
$$C_p = C_{pschmitz} \cdot \eta_{profil} \cdot \eta_{uç} \cdot \eta_{kanatlar} \quad 2.28$$

Bu kayıplara sürtünme $\eta_{sürtünme}$, aktarma organlarındaki kayıplar $\eta_{aktarma}$ ve elektrik jeneratörünün manyetik ve elektrik dirençlerinden kaynaklanan kayıplar da $\eta_{elektrik}$ eklenirse güç faktörü C_p en genel haliyle;

$$C_p = C_{pschmitz} \cdot \eta_{profil} \cdot \eta_{uç} \cdot \eta_{kanatlar} \cdot \eta_{sürtünme} \cdot \eta_{aktarma} \cdot \eta_{elektrik} \quad 2.29$$

olarak yazılabilir.

Betz limiti tasarımcıların pratikte ulaşmayı hedeflediği noktadır, fakat tüm bu kayıplar dikkate alındığında rüzgar trübini tasarımında %35 lik bir verim gerçekçi bir hedef olarak kabul edilebilir (Ragheb 2009).



Şekil 2.10. Değişik tipte rüzgar türbinlerinin güç katsayısı – kanat uç hız oranı eğrileri (Ragheb 2009)

2.5. Rüzgar Pompaları

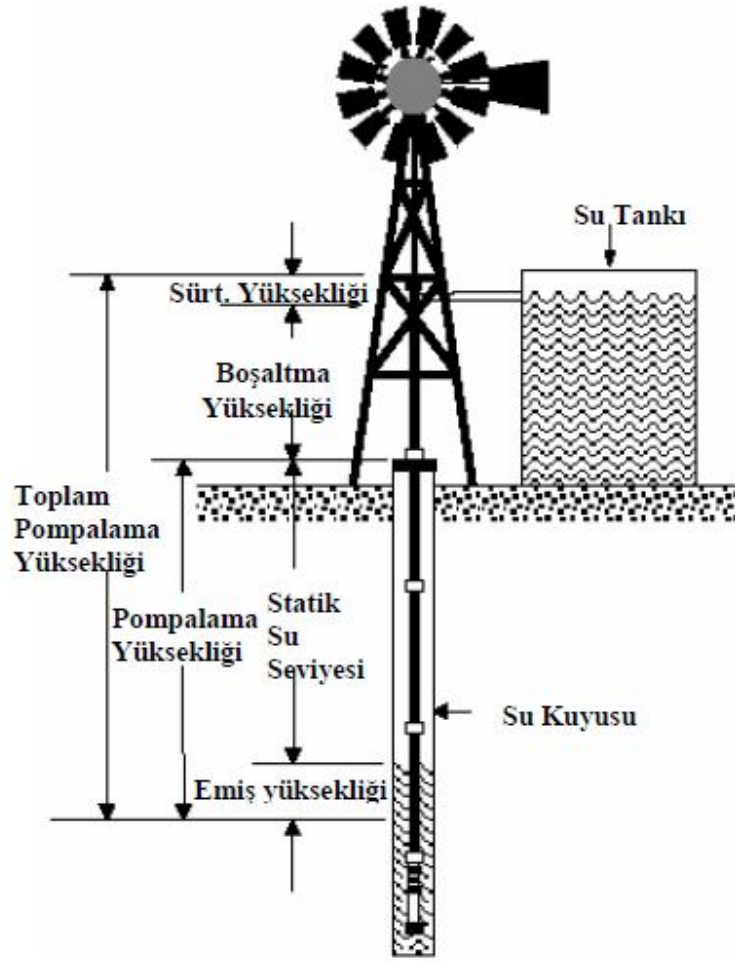
Hayatın temel kaynağı olan su insanoğlu için en temel ihtiyaçlardan biridir. Özellikle kırsal bölgelerde sulama amaçlı su temini yerel kaynaklardan karşılanmaktadır. Yüzeysel su kaynaklarına erişimin zor olması ve bu kaynakların yağmur ve kar yağışı gibi iklimsel faktörlerden çokça etkilenmesi bu kaynakların istenilen verimlilikte kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu sıkıntıları aşmak isteyen üreticiler yeraltı sularını kullanmaya yönelmişlerdir. Yeraltı suları sanılanın aksine tükenebilen bir kaynaktır, bu nedenle bilinçli ve programlı şekilde kullanılarak sürekliliği sağlanmalıdır.

Yeraltı sularının çıkarılması genellikle şebekeye bağlı elektrikli dalgıç pompalar veya dizel pompalar ile sağlanmaktadır. Güneş pilleri ve rüzgar türbinleri ile kurulan sistemler de son yıllarda pazarda yer bulmaya başlamıştır. Bu sistemler özellikle elektrik şebekesinin olmadığı, ulaşımın güç olduğu ve bu nedenle yakıt ikmalinin zor ve pahalı olduğu yerlerde alternatif olarak kullanım alanı bulmaktadır (Argaw vd 2001).

Su pompalama amacıyla kullanılan rüzgar türbinlerine rüzgar pompası adı verilmektedir. Mekanik rüzgar pompaları ve elektrikli rüzgar pompaları olarak ikiye ayrılabilirler.

2.5.1. Mekanik rüzgar pompaları

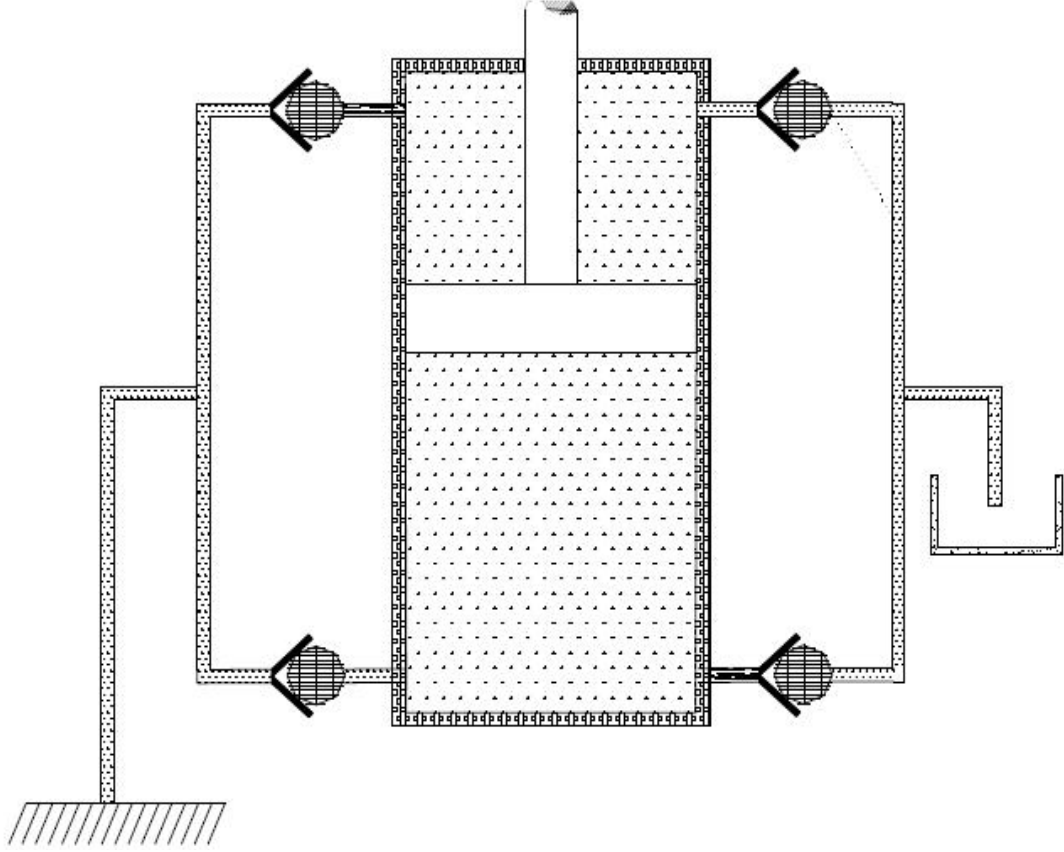
Mekanik rüzgar pompaları rüzgar türbininin dönüş hareketinin bir krank mekanizması ile dikey doğrultudaki bir mile ve buna bağlı bir pistonlu pompaya veya konik dişlilerle dönme hareketinin santrifüj çalışan bir pompaya iletilmesi ile çalışmaktadır. Mekanik su pompaları 13. yüzyılda deniz suyundan tuz elde etmek amacıyla kullanılmaya başlamıştır. 19. yüzyıldan itibaren içme suyu temini için kırsal alanlarda kullanılmıştır. Kolay tasarlanıp kurulabilmeleri, yerel imkânlarla üretilibilmeleri ve neredeyse hiç bakım gerektirmemeleri nedeniyle mekanik rüzgar pompaları özellikle üçüncü dünya ülkeleri olarak adlandırılan gelişmemiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birleşmiş Milletler sosyal ve ekonomik gelişmeyi desteklemek için, günümüze kadar sekiz milyondan fazla rüzgar pompasını üretmiş ve bu ülkelere kurmuştur (Şekil 2.11) (Güngör 2005).



Şekil 2.11. Mekanik rüzgar pompası

Mekanik rüzgar pompalarında genel olarak bir düzlem içinde ileri geri çalışan pistonlu pompalar kullanılmaktadır. İstenilen yüksekliğe pompalanan suyun miktarı, rüzgar hızına, strok boyuna ve pompa çapına bağlıdır. Piston yukarı doğru hareket ederken su ve milin ağırlığı nedeniyle rotor yavaşlar, piston aşağı hareket ederken ise tersine hızlanır. Bu nedenle rotor hızı değişkendir. Diğer bir problemde rüzgar hızı ile strok arasındaki ilişkidir, Rüzgar gücü rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak artarken, su pompalama oranı doğrusal olarak artmaktadır. Bu nedenle mekanik rüzgar pompaları belli rüzgar hızlarında uygun değerde çalışacak şekilde tasarlanırlar, düşük hızlar için tasarlanan sistem, yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışacak veya tam tersi olacaktır. Bu sorunları gidermek için, ilave edilen emici rottaki dengeleme ağırlığı, yaylar, değişken stroklu ve çift etkili pistonlu pompalar (Şekil 2.12) ve diğer teknikler, bugün

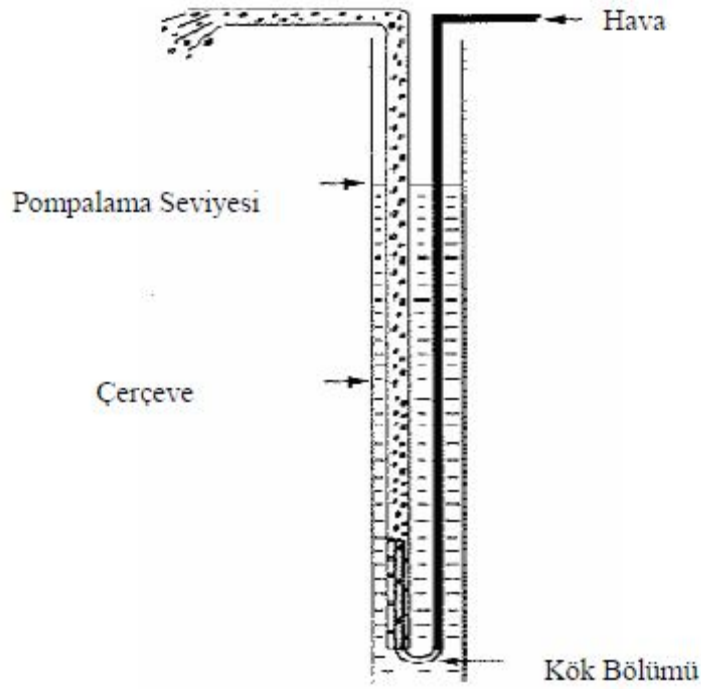
mekanik rüzgar pompalarının geliştirilmesinde kullanılan temel faktörlerdir (Argaw vd 2001).



Şekil 2.12. Çift etkili pistonlu pompa (Güngör 2005)

Mekanik rüzgar pompaları düşük hız ve yüksek torkta çalışmak üzere tasarlanırlar, bu nedenle kanat sayısı fazladır. Gelişen kanat profilleri sayesinde istenen güç ve devir sayısı, daha az sayıda kanatla sağlanabilir hale gelmiştir. 15 -18 kanatlı rüzgar pompaları yerine 6 - 8 kanatlı rüzgar pompaları geliştirilmiş rotor çapları 2-5 metreden 8 metreye kadar büyümüştür. Bu gelişmeler sayesinde modern mekanik rüzgar pompalarının performansları iki kat artmıştır. Karşı balans ağırlıkların kullanılması sayesinde %50 daha düşük rotor torkunda ve %30 daha düşük rüzgar hızlarında su pompalama mümkün olmuştur, daha düşük tork ihtiyacı, gerekli olan dişli aktarma organları yerine direct drive adı verilen doğrudan bağlantılı sistemlerin kullanımını sağlamıştır. Bu sayede mekanik kayıplar azalmış, mekanik açıdan daha az sorunlu bir tasarım oluşturulmuştur (Argaw vd 2001).

Mekanik rüzgar pompalarının en büyük dezavantajlarından biri sondaj deliğinin üzerine doğrudan yerleştirilme zorunluluklarıdır. Hidrolik ve pnömatik güç aktarım yöntemleri kullanılarak bu sorun aşılmaaya çalışılmıştır. Pnömatik iletimli rüzgar pompaları, hava kompresörü kullanılarak, sıkıştırılmış havanın suyu kaldırması prensibi ile çalışırlar (Şekil 2.13). Mekanik hiçbir iletim elemanına gerek yoktur bu bakımdan neredeyse hiç bakım gerektirmez. Bu nedenle Kuzey Brezilya gibi ulaşımın zor olduğu uzak bölgelerde kullanım alanı bulmuşlardır. Havanın sürtünmeden dolayı neden olacağı güç kaybı verimliliği yüksek ölçüde düşürmektedir, bu nedenle ticari açıdan kullanımı, benzer prensibe sahip olan hidrolik iletimli sistemler gibi, yakın gelecekte mümkün değildir (Jongh ve Smulders 2009).



Şekil 2.13. Pnömatik hava kaldırma prensibine göre çalışan su pompası (Güngör 2005)

Sonuç olarak yaygın hale gelebilen mekanik rüzgar pompaları düşük rüzgar hızlarında iyi performans göstermektedirler. Çok kanatlı yapıları ile düşük rotor devir sayısında ve yüksek torkta çalışırlar, pistonlu pompaların devir sayısı 40-50 d/d ile sınırlanmıştır. Ortalama hızda rüzgarı kullanan mekanik rüzgar pompalarının verimi %7 - %27 arasındadır (Argaw vd 2001).

2.5.2 Elektrikli rüzgar pompaları

Elektrikli rüzgar pompaları mekanik rüzgar pompalarına nazaran daha ümit verici bir teknolojiye sahiptir. Rüzgar türbini kuyu yerinden bağımsızdır, bu sayede rüzgarın kuvvetli olduğu yüksek kesimlere optimum kablo uzunluğu da dikkate alınarak kurulabilirler (Şekil 2.14). Rüzgar türbinleri AC veya DC elektrik gücü üretebilirler, bu sayede doğrudan bağlanan DC veya AC pompalarla su pompalayabilirler. Rüzgar enerjisi önce elektrik enerjisine ve sonra dalgıç pompaya iletileceğinden mekanik rüzgar pompalarında olduğu gibi çok kanatlı, düşük hız ve yüksek tork üreten dayanıklı ve ağır bir rotora ihtiyaç yoktur. Mekanik rüzgar pompalarına nazaran verimleri daha yüksektir, su pompala amacıyla kullanımı dizel sistemler ve güneş pilli sistemlerle rekabet edebilecek düzeydedir. Hareketli parçaları çok az olduğu için çok az bakım gereksinimi duyarlar (Argaw vd 2001).



Şekil 2.14. Uygun yükseklik ve konuma monte edilmiş rüzgar türbini örneği
(Argaw vd 2001)

3. MATERİYAL ve METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Rüzgar türbini

Tez kapsamında, Antalya yöresi için EİE'nin verilerine göre ortalama 5,5 m/s olan rüzgar hızında, 40 Watt elektriksel güç üretebilecek bir rüzgar türbini tasarlanmıştır. Gerekli kanat boyu ve sayısının belirlenmesi, dümen kuyruğunun boyutlandırılması, uygun devir ve güç değerlerine sahip jeneratörün seçimi için gerekli hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalara uygun olarak rüzgar türbini imal edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Rüzgar Türbini

Rüzgar türbinin tasarımında rüzgar gücünün rotor tarafından en yüksek verimle jeneratöre aktarılması amaçlanmıştır. Bu nedenle rotor mili ile jeneratör arasında bir hız değiştirici kullanılmamıştır. Bunun sağlanabilmesi için jeneratörün devir sayısına bağlı ürettiği güç ile rotorun devir sayısına bağlı olarak ürettiği güç değerleri uyumlu olmalıdır. Kanatların boyutları, 5,5 m/s rüzgar hızında 40 Watt güç teminine göre hesaplanmış, jeneratör seçimi bu rüzgar hızında rotorun en yüksek verimde döneceği devir sayısına ve yine 40 Watt güç çıkışına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

3.1.1.1. Rüzgar türbini kanatlarının boyutlandırılması

40 Watt elektrik gücü üretebilecek bir rüzgar türbininin gerekli kanat boyu hesabı 2.25 numaralı formüle göre yapılmıştır (Çetin vd 2005).

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad 2.25$$

Bu formülde güç katsayısı (C_p) 0,30; rüzgar hızı (V) EİE'nin verilerine göre Antalya yöresi için $5,5 \text{ m/sn}$, havanın yoğunluğu (ρ) 1 atm basınçta 15°C sıcaklığındaki değeri olan $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır.

Bu değerler 2.25 nolu denkleme konulduğunda kanat boyunun yaklaşık 67 cm olması gerektiği hesaplanmıştır.

$$R \approx 67 \text{ cm}$$

3.1.1.2. Jeneratör seçimi

Jeneratör seçimi yapılırken, jeneratörün devir ve güç değerlerinin, rotor devir ve güç değerleriyle uyumlu olması amaçlanmıştır.

Ragheb'in (2009) kanat sayısına (n) göre yaptığı optimum kanat uç hız oranı (λ_{opt}) aralığı hesabı, 2.24 numaralı formülde belirtilmiştir. Bu formülde (-), aralığı ifade etmektedir.

$$\lambda_{opt} \approx \frac{4\pi}{n} (1,25 - 1,30) \quad 2.24$$

3 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

$$\lambda_{opt} : 5,26 - 5,45 \text{ arasındadır,}$$

2 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

λ_{opt} : 7,54 - 8,16 arasındadır.

Türbinin iki kanatlı yerine üç kanatlı olması daha düşük rüzgar hızlarında ilk hareket kolaylığı sağlayacaktır. Bu nedenle jeneratör seçimi yapılırken rüzgar türbinin 3 kanatlı olacağı kabulü yapılmıştır.

3 kanatlı bir rüzgar türbini rotorunun yukarıda belirtilen optimum kanat uç hız oranı aralığı olan (λ_{opt}) 5,26 -5,45 değerlerinde, 67 cm rotor yarıçapında (R) ve 5,5 m/s rüzgar hızında (V) döneceği optimum devir sayısı değeri (N_{opt}), Çetin vd (2005) tarafından belirtilen 2.17 numaralı formüle göre hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{\pi.N.R}{30.V} \quad 2.17$$

Optimum devir sayısı (N_{opt}) tek başına bırakılırsa,

$$N_{opt} = \frac{30.\lambda_{opt}.V}{\pi.R} \quad 3.1$$

$N_{opt} = 413 - 427$ d/d aralığında bulunur.

Ragheb'in (2009) yaptığı optimum kanat uç hız oranı kabulüne göre yapılan hesaplama sonucunda, 5,5 m/s rüzgar hızında, 40 Watt gücünde çalışan, 67 cm rotor yarıçapına sahip 3 kanatlı bir rüzgar türbini, rüzgar gücünü en verimli şekilde 413-427 d/d devir sayıları aralığında kullanacaktır. Rotor mili ile jeneratör arasında bir hız değiştirici kullanılmayacağı için, seçilecek jeneratörün de bu devir sayılarında 40 Watt güç üretmesi gerekmektedir. Ayrıca jeneratörün bu devir sayılarında üreteceği gerilim değeri şarj regülatörünün açık devre gerilim değerinden (47 Volt) düşük olmalıdır.

İstenen değerlere uygun olarak Ametek 50 V DC Jeneratör rüzgar türbini seçilmiştir (Şekil 3.2). Jeneratörün devir sayısına bağlı katalog değerleri bulunmadığı için hazırlanan deney düzeneği ile jeneratörün devir sayısına bağlı akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Ametek 50 V DC Jeneratör

Jeneratör mili bir matkaba bağlanarak farklı hızlarda döndürülmüş, jeneratör devir sayısı optik takometre ile ölçülmüştür. Jeneratör çıkışı şarj regülatörü vasıtasıyla 16 Ah'lık bir aküye bağlanmıştır. Voltaj, jeneratör çıkışına paralel olarak bağlanan multimetre ile, akım ise şarj olan aküye seri olarak bağlanan multimetre ile ölçülmüştür. Bu sayede jeneratörün değişik devir sayılarında ürettiği gerilim değerleri ile akım değerleri elde edilmiştir (Çizelge 3.1). Bu değerler jeneratörle uyumlu olarak dönecek rotorun kanat uç hız oranı hesabında kullanılması için gereklidir. Deney düzeneği Şekil 3.3'de ve Şekil 3.4' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Ametek 50 V DC Jeneratörün devir sayısına bağlı olarak aküyü şarj ederken ürettiği elektrik akımı ve gerilimi

Devir sayısı	Akım	Gerilim
290 d/d	0,10 Amper	12,7 Volt
360 d/d	0,16 Amper	13,4 Volt
410 d/d	1,30 Amper	14,8 Volt
460 d/d	1,16 Amper	15,5 Volt
520 d/d	2,28 Amper	16,7 Volt
580 d/d	3,30 Amper	18,4 Volt



Şekil 3.3. Jeneratör deney düzeneği



Şekil 3.4. Jeneratör devir testi

3.1.1.3. Kanat sayısının ve profilinin seçimi

Kanat sayısının ve profilinin belirlenmesinde rotor devir sayısının jeneratör devir sayısı ile uyumlu olması ve böylece herhangi bir hız değıştirici kullanılmadan rotorun jeneratöre bağlanması amaçlanmıştır.

Çetin'in (2005) tarafından belirtilen 2.17 numaralı kanat uç hız oranı formülünde rüzgar hızı değeri (V) 5,5 m/s, rotor devir sayısı (N) Çizelge 3.1'e göre jeneratörün 40 Watt güç üreteceğı devir sayısı olan 580 d/d ve rotor yarıçapı (R) 67 cm olarak yerine konulursa, jeneratöre doğrudan bağli olarak dönecek rotorun kanat uç hız oranı değeri belirlenmiş olur.

$$\lambda = \frac{\pi \cdot N \cdot R}{30 \cdot V} = \frac{\pi \cdot 580 \cdot 0,67}{30 \cdot 5,5} = 7,40$$

Rüzgar türbininin kanat sayısı ve profili seçimi bu kanat uç hız oranı değeri göre yapılmıştır. 2.24 numaralı formülde belirtildiğı üzere Ragheb'in (2009) kanat sayılarına göre yaptığı optimum kanat uç hız oranı hesaplarında;

3 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

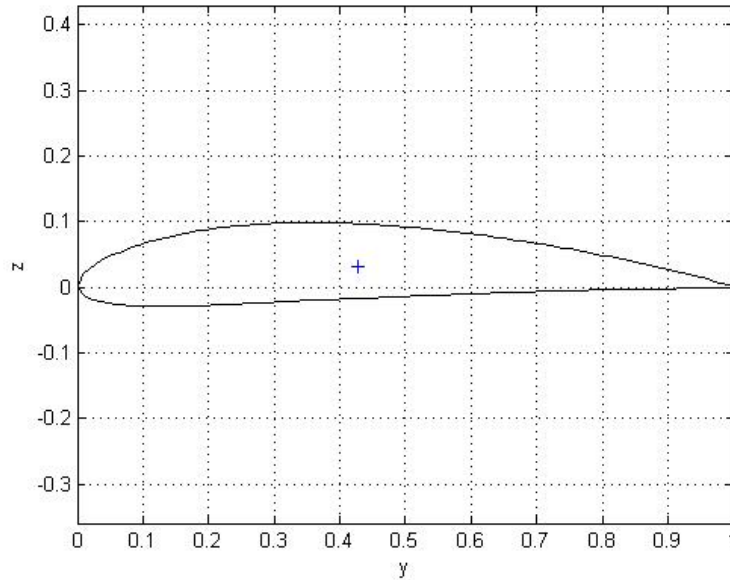
$\lambda_{opt} : 5,26 - 5,45$ arasındadır,

2 kanatlı bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hız oranı

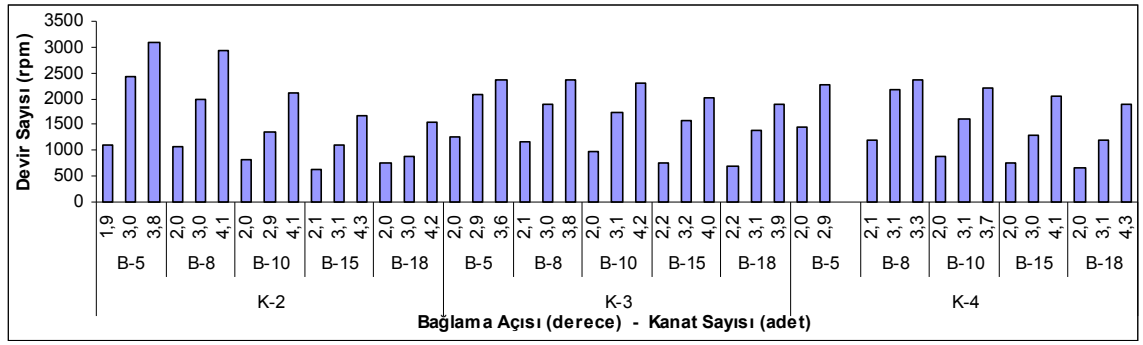
$\lambda_{opt} : 7,54 - 8,16$ arasındadır.

Rüzgar türbinin hesaplanan kanat uç hız oranı değeri (λ) 7,40 dır. Bu değer iki kanatlı rüzgar türbinleri için belirlenen optimum kanat uç hız oranı değerlerine daha yakındır, fakat iki kanatlı bir tasarımın bazı dezavantajları vardır. Bunlar düşük rüzgar hızlarında ilk hareketin sağlanmasında güçlük yaşanması, rüzgar türbininin aşırı yüksek devir sayılarına ulaşması ve bu nedenle aşırı gürültüye neden olmasıdır. Bu nedenle türbinin üç kanatlı olmasına karar verilmiştir.

Kanat profilinin seçimi yapılırken, üç kanatlı bir türbinde en yüksek güç katsayısına, 7,40 kanat uç hız oranında ulaşabilecek bir kanat profili seçilmiştir. Seçilen kanat profilinin kesiti Şekil 3.5’de verilmiştir. Vardar (2005) kanat profiline, kanat burulma açısına (kanadın vida adımı şeklindeki helozonik açısına), rotor kanat sayısına ve kanadın rotora bağlanma açısına bağlı olarak yaklaşık 2, 3, 4 m/s rüzgar hızlarında 15,5 rotor yarıçapına sahip rüzgar türbinlerinin devir sayılarını ölçmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.5 NACA 4412 kanat tipi



Şekil 3.6 NACA 4412 kanat profilinin 0 derece burulma açısındaki formlarının devir sayıları (Vardar 2005).

Tez kapsamında tasarlanan rüzgar türbini için istenen kanat uç hız oranı değeri 7,40'dır. Vardar (2005)'in değişik kanat tipleri ile yaptığı çalışmalar incelenmiş ve NACA 4412 profilinin 0 derece burulma açısı ve 18 derece bağlanma açısıyla bağlandığı üç kanatlı rotor tipinin uygun olduğu belirlenmiştir. Vardar'ın (2005) Şekil 3.6'da belirttiği verilere göre, rotorun 3,9 m/s rüzgar hızındaki (V) devir sayısı (N) 1800 d/d'dır. Rotor yarıçapı (R) 15,5 cm dir. Bu değerler 2.17 numaralı formülde yerine konularak, yukarıda belirtilen rotor tipinin kanat uç hız oranı değeri 7,49 olarak hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{\pi \cdot N \cdot R}{30 \cdot V} = \frac{\pi \cdot 1800 \cdot 0,155}{30 \cdot 3,9} = 7,49$$

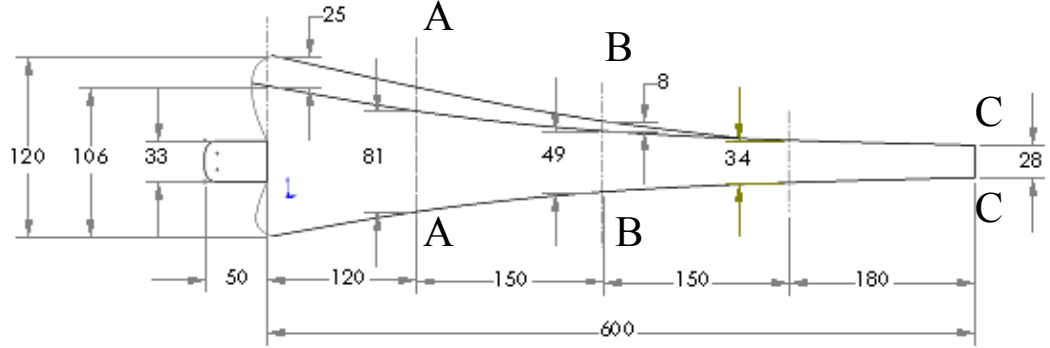
Bu değer, rotor için istenen 7,40 kanat uç hız oranı değerine çok yakındır.

Vardar'ın (2005) NACA 4412 kanat tipi için yaptığı deneylerde rotor kökündeki kanat genişliğini rotor ucundaki kanat genişliğinin iki katı olarak almıştır. Rotorun uç kısmındaki kanat genişliği (C) değeri, rotor yarıçapı (R), kanat sayısı (n) ve kanat uç hız oranına (λ) göre Vardar'ın (2005) belirttiği aşağıdaki formüle göre hesaplanırsa;

$$C = \frac{8 \cdot R}{\lambda^2 \cdot n} \quad 3.2$$

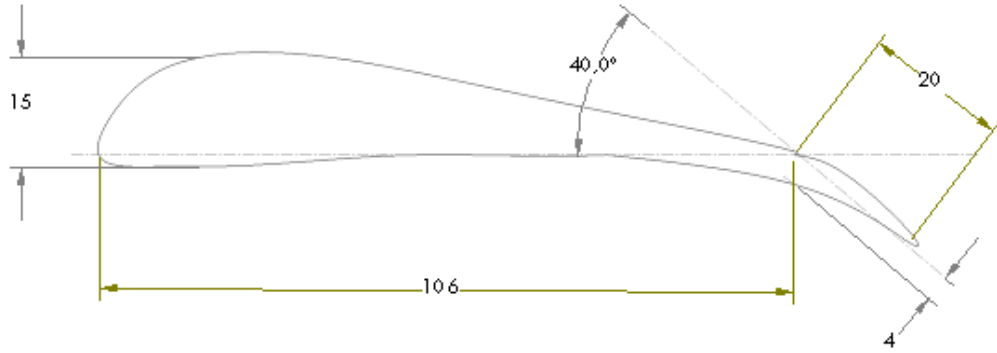
$C = 3,26$ cm olarak bulunur.

Kanat seçiminde bu değerler dikkate alınmıştır. Seçilen kanat profilinin genel boyutları Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

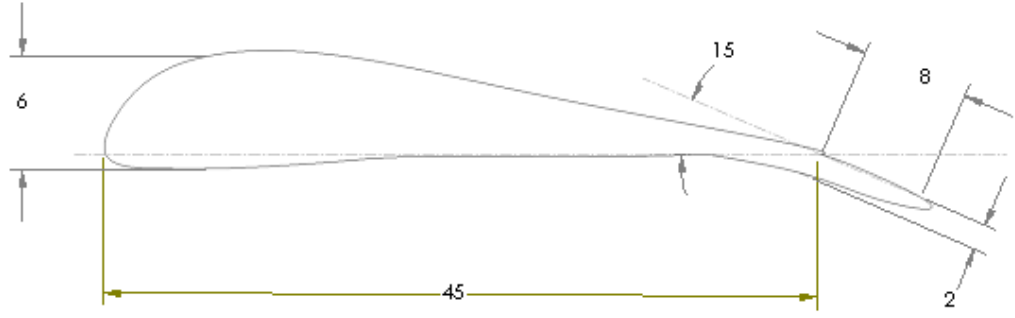


Şekil 3.7. Rüzgar türbin kanadının önden görünüşü

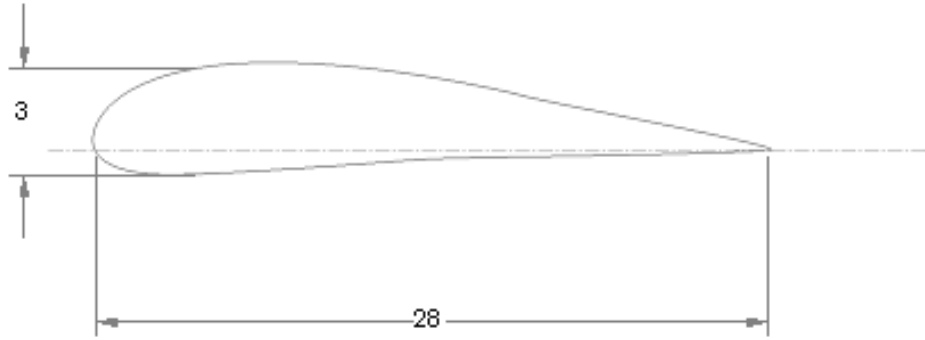
Şekil 3.7’de gösterilen A, B, C kesitlerindeki kanatın görünüşü ve boyutları Şekil 3.8’de, Şekil 3.9’da ve Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.8. Kanadın A kesiti



Şekil 3.9. Kanadın B kesiti



Şekil 3.10. Kanadın C kesiti

Seçilen kanat profili NACA 4412 tipine en fazla, kanat ucunda (C kesitinde) uymaktadır, kanat rotor göbeğine yaklaştıkça NACA 4412 profilinden farklı olarak en boy oranı artmakta diğer tabirle kalınlaşmaktadır. Rotor ucundaki kanat genişliği 28 mm, rotor kökündeki kanat genişliği ise 120 mm'dir. Kanatın genel NACA 4412 profiline ek olarak, Şekil 3.7'de , Şekil 3.8'de ve Şekil 3.9'da görüldüğü üzere bir uzantı eklenmiştir, bu uzantı kanat ucuna doğru küçülmekte kanat ucundan 18 cm önce yok olmaktadır. Bu uzantının nedeni rüzgar türbinin düşük rüzgar hızlarında ilk hareketi almasını kolaylaştırmaktır. Rüzgar türbinin kanatlarının resmi Şekil 3.11'de ve Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Rüzgar türbini kanadı



Şekil 3.12. Rüzgar türbini kanatları

3.1.1.4. Aktarma organları

Belirlenen kanat boyutu, kanat profili ve kanat sayısına göre rüzgar türbininin rotor devir sayısı, jeneratör devir sayısı ile uyumludur. Bu nedenle çevrim oranını değiştirecek bir dişli kutusu veya kayış kasnak sistemi kullanılmamıştır (Şekil 3.13). Bu sayede maliyet düşürülmüş ve imalat kolaylığı sağlanmıştır. Kanatların jeneratör miline bağlanması için hafif olması nedeniyle teflondan “hub” adı verilen silindirik parça imal edilmiştir (Şekil 3.14, Şekil 3.15). Hub 7 cm yarıçapındadır ve kanatlar bu aparata

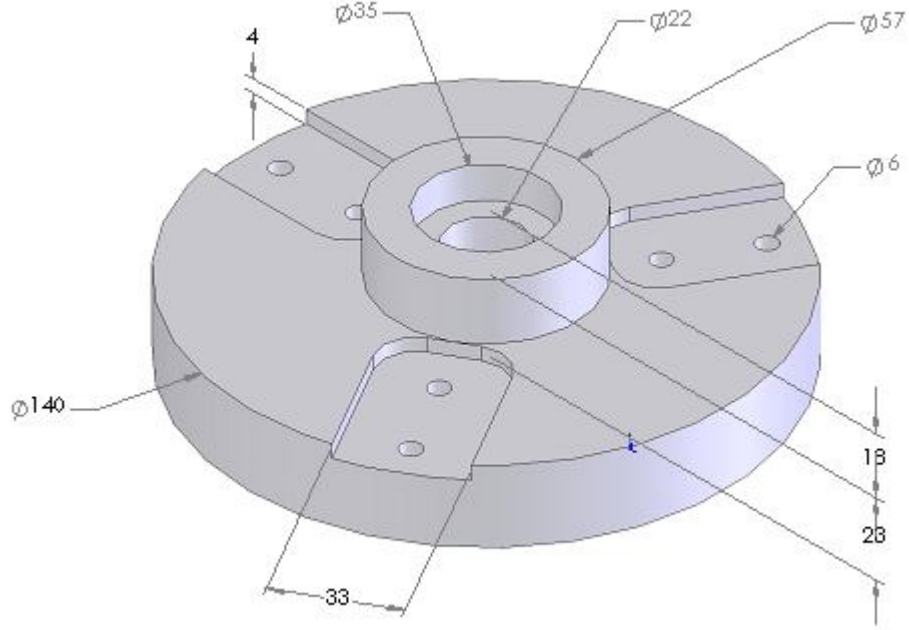
dayanmaktadır, kanatlar Şekil 3.7’de belirtildiği üzere 60 cm boyundadır, hubdan kaynaklanan ek mesafe eklendiğinde rotor yarıçapı 67 cm’e ulaşmıştır.



Şekil 3.13. Hız dönüştürücü olmadan kanatların bağlantısı



Şekil 3.14. Hub



Şekil 3.15. Teflon hub'un üç boyutlu çizimi ve boyutları

3.1.1.5. Dümen kuyruğu ve taşıyıcı diğer elemanlar

Dümen kuyruğu rotorun sürekli rüzgara dönük olması ve bu sayede rüzgarı karşıdan alması için gereklidir. Dümen kuyruğu vasıtasıyla türbinin rüzgar yönüne dönmesi yine rüzgar vasıtasıyla sağlanacaktır.

Bryukhan'a göre (1993) kanadın dönme düzlemi ve aks oryantasyonu arasındaki mesafe (E) olarak alınırsa, kuyruk kanadı merkezi ile oryantasyon arası mesafe (L) bunun dört katı olmalıdır (İlkılıç 2003).

$$L = 4E$$

3.2

Kanatların dönme düzlemi ile aks oryantasyonu arasındaki mesafe 20 cm'dir. İlkılıç'ın (2003) belirttiği pratik hesap dikkate alınmış ve kuyruk boyu 80 cm olarak belirlenmiştir.

$$L = 80 \text{ cm}$$

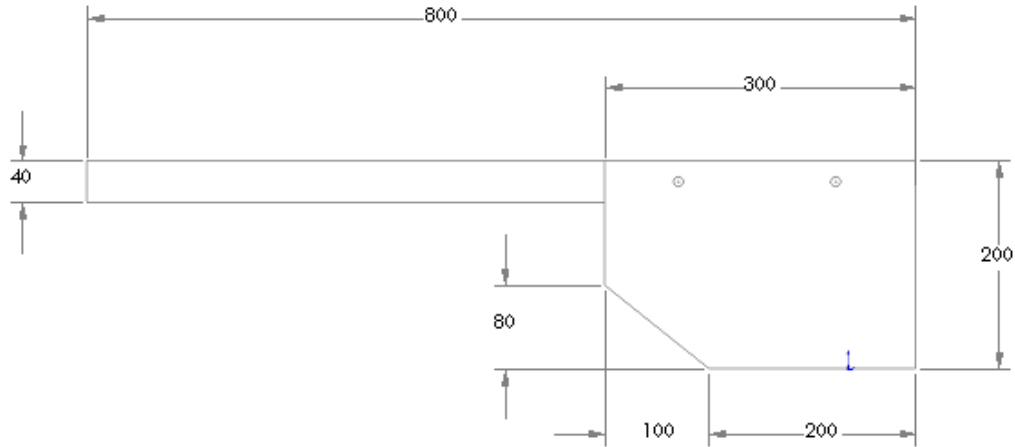
3.3

İlkılıç'ın (2003) belirttiği üzere kuyruk kanadı yüzey alanı (A) ile rotor tarafından süpürülen alan (S) arasında aşağıdaki ilişki bulunmaktadır.

$$A = 0.10 S \quad \text{çok kanatlı rüzgar türbinleri için,} \quad 3.4$$

$$A = 0.04 S \quad \text{iki veya üç kanatlı türbinler için.} \quad 3.5$$

Tasarlanan rüzgar türbininin rotor çapı 134 cm'dir. Rotor alanı (S) $1,41 \text{ m}^2$ dir, üç kanatlı bir rüzgar türbini olduğu için, İlkılıç'ın önerdiği iki veya üç kanatlı rüzgar türbinleri için belirtilen hesaba göre kuyruk alanı (A) $0,056 \text{ m}^2$ olarak belirlenmiştir. Tasarlanan kuyruk Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16. Dümen kuyruğu

Rüzgar türbininin dümen kuyruğu vasıtasıyla rüzgara dönebilmesi için 360° dönme kabiliyetinde bir yatak üzerine konulması gerekmektedir. Bu yatak görevini yapması için Şekil 3.17'de gösterilen konteynır tekerlek ayağı kullanılmıştır. Bu tekerlek ayağında ayrıca tekerleğinin yönünü sabitlemek için kullanılan bir kilitlenme sistemi vardır. Bu sistem rüzgar türbininin çok yüksek rüzgar hızlarında zarar görebileceği yüksek devir sayılarına ulaşmasını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Rüzgarın kuvvetli estiği yöne belirli bir açı ile sabitlenen rotor, rüzgarı direk karşıdan almayacak böylece aşırı devir sayılarına ulaşmayacak ve sistem korunacaktır. Ayrıca montaj ve bakım sırasında türbinin yönünü sabitlemek işlem

kolaylığı sağlayacaktır. Dümen kuyruğunun kirişi 4x4, 2 mm kalınlığında alüminyum köşebent malzemeden yapılmıştır. Dümen kuyruğu ise 2 mm kalınlığında alüminyum levhadan yapılmıştır.



Şekil 3.17. Konteynır tekeri

3.1.2. DC pompa

DC jeneratörle uyumlu olarak yine DC dalgıç pompa kullanılmıştır, bu sayede doğru akımı alternatif akıma çeviren invertöre ihtiyaç kalmamaktadır. İnvertörün olmaması, maliyeti düşürmüş ve güç kaybını azaltmıştır.

Antalya yöresinin yeraltı suyu seviyesi dikkate alınarak 40 Watt'lık güç ile 50 metre yüksekliğe su basabilme kabiliyetinde olan bir dalgıç pompa seçilmiştir (Şekil 3.18). Seçilen SCHURflo 9300 adlı DC dalgıç pompanın teknik verileri, basma yüksekliği ve debiye bağlı olarak verimi Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. SCHURflo 9300 pompa

Çizelge 3.2. SCHURflo 9300 pompaya ait teknik veriler

Volt	Amper	Kullanılan Elektrik gücü	Debi	Basma Yüksekliği	Efektif Güç	Verim	50m sbt yükseklik için debi
12 V	1,20 A	14,40 Watt	212 l/h	6,10 m	3,52 Watt	24 %	26 l/h
12 V	1,80 A	21,60 Watt	197 l/h	18,30 m	9,82 Watt	45 %	72 l/h
12 V	2,10 A	25,20 Watt	186 l/h	30,50 m	15,46 Watt	61 %	113 l/h
12 V	2,70 A	32,40 Watt	174 l/h	42,70 m	20,25 Watt	62 %	149 l/h
12 V	3,30 A	39,60 Watt	163 l/h	54,90 m	24,39 Watt	62 %	179 l/h
12 V	3,90 A	46,80 Watt	136 l/h	70,10 m	25,98 Watt	56 %	191 l/h
24 V	1,50 A	36,00 Watt	443 l/h	6,10 m	7,36 Watt	20 %	54 l/h
24 V	2,10 A	50,40 Watt	413 l/h	18,30 m	20,60 Watt	41 %	151 l/h
24 V	2,60 A	62,40 Watt	390 l/h	30,50 m	32,41 Watt	52 %	238 l/h
24 V	3,10 A	74,40 Watt	375 l/h	42,70 m	43,63 Watt	59 %	320 l/h
24 V	3,60 A	86,40 Watt	352 l/h	54,90 m	52,66 Watt	61 %	386 l/h
24 V	4,10 A	98,40 Watt	310 l/h	70,10 m	59,22 Watt	60 %	435 l/h

Dalgıç pompa %62'lik en yüksek verim ile 30 – 50 metre basma yüksekliğinde çalışmaktadır. Bu basma yüksekliği aralığının Antalya yöresinin yeraltı su seviyesi dikkate alındığında uygun olduğu görülmektedir.

3.1.3. Elektrik kontrol elemanları ve diğer elektrik malzemeleri

Akü, şarj regülatörü ve elektrik kabloları tasarlanan sistemde elektrik ile ilgili kullanılan materyallerdir. Seçilen pompa doğru akımla çalıştığı için invertör kullanılmamıştır.

3.1.3.1. Akü

Çizelge 3.2' de belirtilen pompa değerlerine göre, 54,90 metre yükseğe, 163 l/saat debi ile su pompalanması için 12 Volt ve 3,30 Ampere ihtiyaç vardır. Dalgıç pompanın bu şartlarda günde 10 saat çalışması halinde gerekli olan akü kapasitesi 33 Ah olacaktır. Fakat akünün kullanım sırasında tamamen boşalmaması uzun ömürlü çalışması için gereklidir.

Kullanılacak akünün kapasitesinin belirlenmesinde depolanacak enerji miktarının dışında şarj/deşarj akımının da önemi vardır. Akünün uzun ömürlü olabilmesi için kapasitesinin %10'undan daha küçük akımda şarj vedeşarj edilmesi gerekmektedir. Şarj akımı değeri bulgular bölümünde belirtileceği üzere 6,5 m/s rüzgar hızında 3,58 amperdir, daha yüksek rüzgar hızları da hesaba katılırsa emniyetli bir değer olan aynı zamanda şarj regülatörünün de sınır değeri olan 8 Amper üst limit olarak kabul edilebilir.

Bu şartlar altında, akü şarj akımı maksimum 8 Amper kabul edilirse ve aküden günde 10 saat 3,3 amper akım çekileceği düşünülüp ve akünün tamamen boşalmasının sakıncalı olduğu dikkate alınırsa, akü kapasitesinin 80 Ah olarak seçilmesi uygundur. Daha uzun ömürlü olması ve bakım gerektirmemesi nedeniyle kuru tip jel akü tercih edilmiştir (Şekil 3.19).



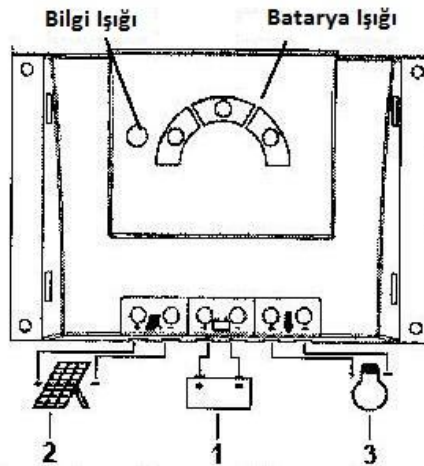
Şekil 3.19. Jel akü 80 Ah kapasiteli

3.1.3.2. Şarj regülatörü

Jeneratörün çıkış voltajı kullanılacak olan DC dalgıç pompaya uygun olacak şekilde, 12 veya 24 Volt'a sabitlenmelidir. Bu amaçla maksimum 8 Amper çıkışlı, 12 veya 24 Volt ile akü şarj edebilen ve yükü besleyebilen Steca Solsum 8.8F şarj regülatörü seçilmiştir (Şekil 3.20, Şekil 3.21). Şarj regülatörünün teknik verileri Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Şarj regülatörü



Şekil 3.21. Şarj regülatörü şematik resmi

Çizelge 3.3. Şarj regülatörünün teknik verileri

Steca Solsum F	6.6F	8.8F	10.10F
İşletme performans karakteristikleri			
Sistem voltajı	12 V (24 V)		
İç tüketim	< 4 mA		
DC giriş tarafı			
Açık devre voltajı (47 V)	< 47 V		
Modül akımı	6 A	8 A	10 A
DC çıkış tarafı			
Yük akımı	6 A	8 A	10 A
Şarj kesme voltajı	13.9 V (27.8 V)		
Ani şarj voltajı	14.4 V (28.8 V)		
Tekrar bağlantı voltajı (SOC/LVR)	>50 % 12.4 V ... 12.7 V (24.8 V ... 25.4 V)		
Dip deşarj koruma voltajı (SOV/LVD)	< 30 % / 11.2 V ... 11.6 V (22.4 V ... 23.2 V)		
Çalışma koşulları			
Uygun sıcaklık			
Montaj ve tasarım			
Terminal	4 mm ² / 6 mm ² – AWG 12/9		
Koruma derecesi	IP 32		
Boyutlar (X x Y x Z)	145 x 100 x 24 mm		
Ağırlık	150 g		

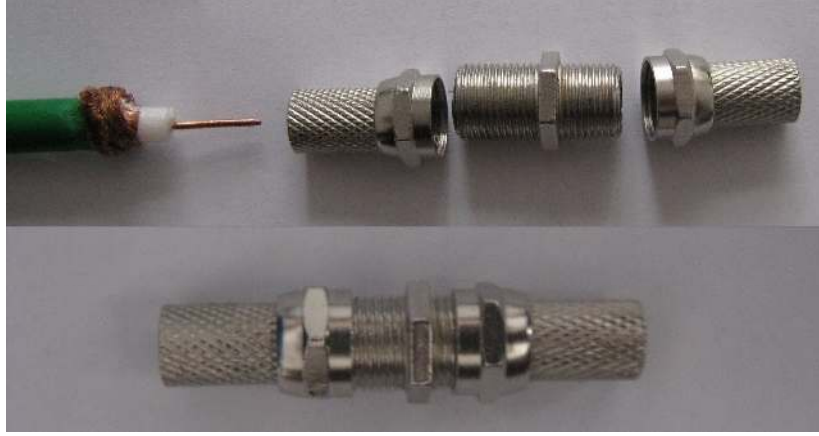
3.1.3.3. Kablo

Rüzgar türbini ile şarj regülatörü arasında 10 metrelik bir kabloya ihtiyaç duyulacağı öngörülebilir. % 3'lük bir kayıp kabul edilebilir ise gerekli kablo kesit alanı 10 mm²' dir. Diğer bir tabirle, AWG (American Wire Gauge) sistemine göre 7 AWG'lik bir kablo seçilmiştir. 50 metre derinlikteki dalgıç pompa için ise 15 mm² kesit alanı diğer tabirle 5 AWG'lik kablo seçilmiştir. (Koroğlu vd 2010).

3.1.3.4. Jak

Rüzgar türbinin rüzgar yönüne bağlı olarak yapacağı dönüşler, elektrik kablusunun kıvrılmasına ve bunun sonucu olarak uzun sürede kopmasına neden olacağı için bu dönüşlere imkan verecek bir sistemin kurulması gerekmektedir. Bu nedenle elektrik akımını sürekli olarak geçirecek ve dönüşlerden etkilenmeyecek bir jak kullanılmıştır (Şekil 3.22). Jak, türbinin dikey yönde dönme ekseninde olacak şekilde türbinin altına yerleştirilmiştir. Türbinin altından direk dönme ekseninde açılan bir

delikten geçirilen kablo bu jaka bağlanmış ve çıkmıştır. Bu sayede kablodaki oluşacak burulmalar jak üzerindeki hareket serbestliği sayesinde ortadan kaldırılabilir.



Şekil 3.22. Jak

3.1.3.5. Ölçme cihazları

Rüzgar türbinin ürettiği akım ve gerilim değerini, akünün gerilim değerini, şarj/deşarj akımını ve yükün çektiği akım ve gerilim değerini ölçmek için multimetreler kullanılmıştır (Şekil 3.23). Gerilim değeri ölçmek için kullanılan multimetreler ölçüleceği yere paralel bağlanmışlar ve maksimum 20 Volt ölçme değerine ayarlanmışlardır, 0,1 Volt hassasiyetle ölçüm yapabilmektedirler. Akım değerini ölçmek için kullanılan multimetreler, ölçülecek yere seri bağlanmışlar ve maksimum 10 Amper ölçme değerine ayarlanmışlardır, 0,01 Amper hassasiyetle ölçüm yapabilmektedirler.



Şekil 3.23. Multimetre (Volt ve Amper ölçer)

Rüzgar hızını ölçmek için Şekil 3.24’de gösterilen anemometre kullanılmıştır. Anemometre ölçüm sırasında ulaşılan en yüksek rüzgar hızını hafızasında tutabilmektedir. Anemometrenin rüzgar ölçüm hassasiyeti 0,01 m/s’dir. Fakat yapılan ölçümlerde, 0,05 m/s hassasiyetle sonuçlar not edilmiştir.



Şekil 3.24. Anemometre (Rüzgar hızı ölçer)

Rotorun devir sayısını ölçmek için optik takometre kullanılmıştır (Şekil 3.25). Optik takometre dönen cisme yapıştırılan yansıtıcı kağıt hedeflenerek kullanılmıştır. Ölçüm hassasiyeti 0,1 d/d fakat 10 d/d hassasiyetle değerler not edilmiştir.



Şekil 3.25. Takometre

3.1.3.6. Deney düzeneği

Rüzgar türbinin ürettiği elektrik şarj regülatörü vasıtasıyla düzenlenerek akünün şarj olabilmesi için uygun gerilim değerine dönüştürülmektedir. Rüzgar türbinin ürettiği akım ve voltaj değerlerini, akünün şarj/deşarj olma gerilim ve akım değerlerini ve yükün çektiği akım ve gerilim değerlerinin aynı anda gözlenebileceği bir deney düzeneği imal edilmiştir (Şekil 3.26). Sistemdeki multimetreler gerilim değerlerini ölçmek için paralel, akım değerlerini ölçmek için ise seri bağlanmışlardır. Rüzgar türbini jeneratörünün deney düzeneğine bağlantısı yan tarafa yerleştirilen giriş noktalarından yapılmaktadır, ayrıca burada sisteme ilave akü ve yük eklenebilmesine olanak sağlayacak girişler konulmuştur. Bu sayede deney düzeneği, farklı rüzgar türbinleri ve güneş pili sistemlerinin performanslarını ölçmek için de kullanılabilecektir.



Şekil 3.26. Deney düzeneği

3.2. Metot

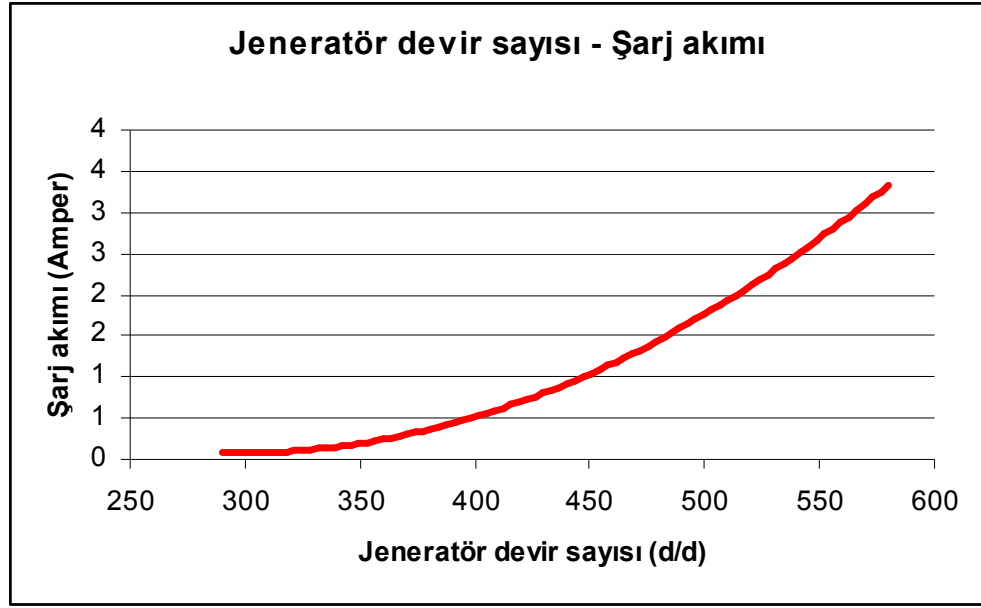
Tasarlanan rüzgar türbini DSİ 13. Bölge Müdürlüğü 13/17 Sondaj Şube Müdürlüğü binasının çatısına monte edilmiştir (Şekil 3.27). Farklı rüzgar hızlarına bağlı olarak rotor devir sayıları ve türbinin ürettiği akım ve gerilim değerleri, akü gerilim ve şarj/deşarj akım değerleri, yükteki gerilim ve akım değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.27. Rüzgar türbinin monte edildiği yer

Rüzgar hızının ölçülmesi için anemometre kullanılmıştır. Deneyin yapıldığı yer yüksekte ve yeterli güvenlikte olmadığı için rüzgar hızları rüzgar türbininden güvenilir olarak 2 metre uzaklıkta rüzgar türbini ile aynı yöndeki rüzgar hızının ölçülmesi ile belirlenmiştir. Rüzgar hızının ve yönünün değişken olması, ölçümlerde hata yapma olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle mümkün oldukça fazla ölçüm yapılarak ve rüzgar hızının sabit olduğu anlardaki değerler dikkate alınarak değerler not edilmiştir.

Jeneratörün devir sayısına göre ürettiği gerilim ve akım değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu değerler dikkate alınarak oluşturulan devir sayısı-akım eğrisi aracılığıyla türbinin rotor devir sayısı farklı rüzgar hızlarında ölçülmüştür (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Şarj akımı – jeneratör devir sayısı

Kanat uç hız oranı değerleri, rüzgar hızına ve rotor devir sayısına bağlı olarak Çetin'in (2005) belirttiği 2.17 numaralı denkleme göre hesaplanmıştır.

Jeneratör çıkışında ölçülen akım (I_j) ve gerilim değerinden (U_j) yararlanarak rüzgar türbininin gücü (P_t) akım ve voltajın çarpımı olarak hesaplanmıştır.

$$P_t = U_j \cdot I_j \quad 3.6$$

Faydalanılabilir güç (P_{te}) ise aküyü şarj eden akım (I_a) ve akü gerilim değerinin (U_a) çarpımı ile bulunmuştur.

$$P_{te} = U_a \cdot I_a \quad 3.7$$

Elektriksel gücün (P_{te}) rüzgar türbin gücüne (P_t) oranı elektriksel verimi ($\eta_{elektrik}$) vermektedir.

$$\eta_{elektrik} = \frac{P_{te}}{P_t} = \frac{U_j \cdot I_j}{U_a \cdot I_a} \quad 3.8$$

Rüzgar türbininin güç katsayısı (C_p), 2.24 numaralı formüle göre rüzgar türbini gücünün (P_t), rüzgar gücüne (P) oranı olarak hesaplanmıştır. (R) rotor yarıçapını, (V) rüzgar hızını ifade etmektedir (Çetin vd 2005).

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} = \frac{U_j \cdot I_j}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \quad 3.9$$

Sistemin faydalanılabilir güç katsayısı (C_{pe}) yine aynı formüle göre aküyü şarj eden faydalanılabilir gücün (P_{te}), rüzgar gücüne (P) oranı olarak hesaplanmıştır. Akünün gerilim değeri (U_a) 12,7 Volt sabittir.

$$C_{pe} = \frac{P_{te}}{P} = \frac{P_{te}}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} = \frac{12,7 \cdot I}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \quad 3.10$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan ölçümler sonucunda, rüzgar hızına (V) bağlı olarak değişen rotor devir sayıları (N), jeneratör çıkışındaki gerilim ve akım değerleri (U_j, I_j), akünün şarj olduğu akım değerleri (I_a) belirlenmiştir. Akü şarj akımının, jeneratör çıkış akımıyla aynı değerde olduğu görülmüş bu nedenle her iki akım değeri için (I) ortak değeri kullanılmıştır. Akü gerilim değerinin sabit 12,7 Volt olduğu görülmüştür. Bu değerler aracılığıyla metot bölümünde belirtildiği şekilde, rüzgar gücü (P), rüzgar türbini gücü (P_t), rüzgar türbinin elektriksel gücü (P_{te}), rüzgar türbini güç katsayısı (C_p), faydalanılabilir güç katsayısı (C_{pe}), elektriksel verim ($\eta_{elektrik}$) ve kanat uç hız oranı değerleri (λ) hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.1’de birlikte verilmiştir.

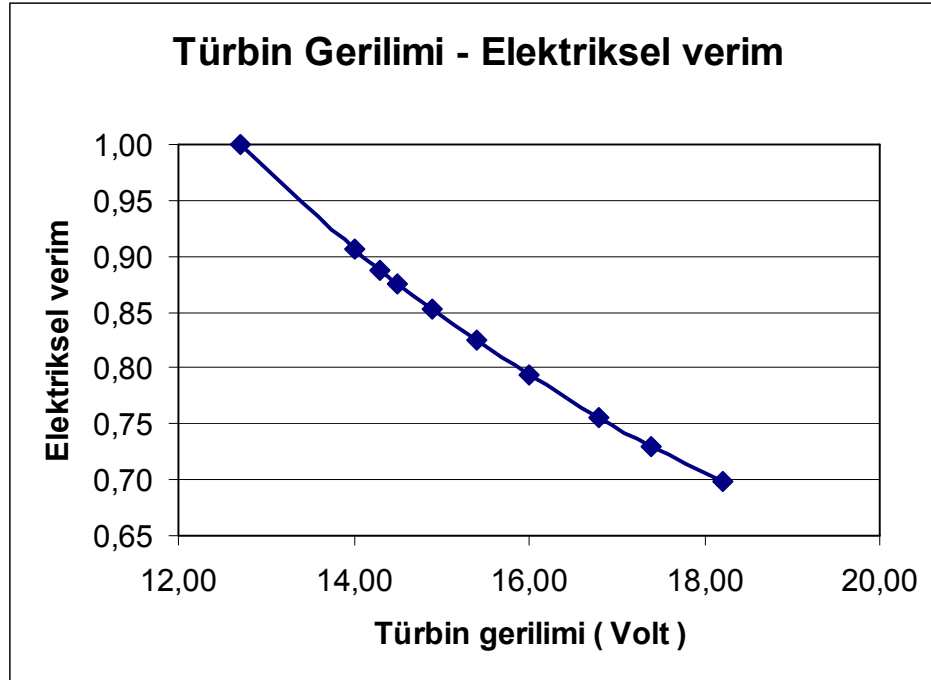
Çizelge 4.1. Rüzgar hızına göre ölçülen ve hesaplanan değerler

Rüzgar hızı V (m/s)	Rotor Devir sayısı N (d/d)	Jeneratör Gerilimi U_j (Volt)	Akü şarj akımı I (Amper)	Rüzgar türbin gücü P_t (Watt)	Aküye aktarılan güç P_{te} (Watt)	Rüzgar gücü P (Watt)	Rüzgar türbini güç katsayısı C_p	Faydalanılabilir güç katsayısı C_{pe}	Elektriksel verim $\eta_{elektrik}$	Kanat uç hız oranı λ
2,00	290,00	12,70	0,10	1,27	1,27	6,91	0,184	0,184	1,00	10,17
2,80	380,00	14,00	0,30	4,20	3,81	18,95	0,222	0,201	0,91	9,52
3,30	400,00	14,30	0,50	7,15	6,35	31,03	0,230	0,205	0,89	8,50
3,50	410,00	14,50	0,60	8,70	7,62	37,02	0,235	0,206	0,88	8,21
3,85	430,00	14,90	0,80	11,92	10,16	49,27	0,242	0,206	0,85	7,83
4,40	460,00	15,40	1,20	18,48	15,24	73,54	0,251	0,207	0,82	7,33
4,85	490,00	16,00	1,60	25,60	20,32	98,49	0,260	0,206	0,79	7,08
5,30	520,00	16,80	2,03	34,10	25,78	128,53	0,265	0,201	0,76	6,88
5,80	550,00	17,40	2,66	46,28	33,78	168,45	0,275	0,201	0,73	6,65
6,50	590,00	18,20	3,58	65,16	45,47	237,10	0,275	0,192	0,70	6,37

Rüzgar türbininin aküyü şarj etmeye başlaması için 12,7 Volt gerilim değerine ulaşması gerektiği görülmüştür. Bu değer altındaki gerilim değerlerinde akü şarj edilemediği için 12,7 Volt değerinin altına karşılık gelen rüzgar hızlarından faydalanılamamaktadır. Rüzgar türbini, 12,7 Volt gerilim değerine 290 d/d devir sayısına, bu devir sayısına da 2,0 m/s rüzgar hızında ulaşmaktadır. Sonuç olarak 2,0 m/s rüzgar hızı değeri türbinin güç üretmeye başladığı rüzgar hızı değeridir.

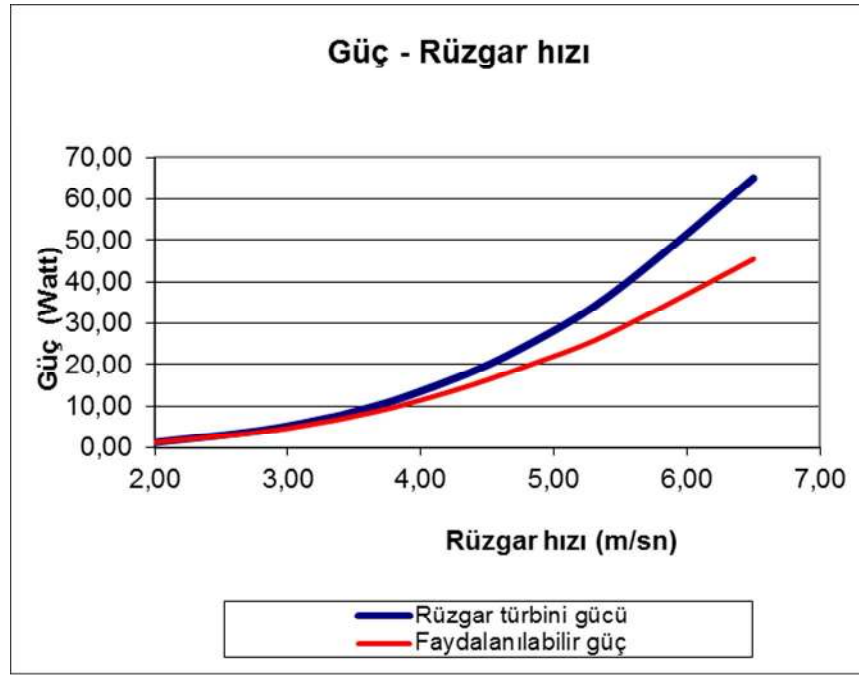
Yapılan deneylerde en yüksek 6,5 m/s rüzgar hızında ölçüm yapılabilmektedir. 5,3 m/s rüzgar hızında rüzgar türbin gücünün (P_t) 46,28 Watt olduğu tespit edilmiştir. Elektriksel kayıplar eklendiğinde faydalanabilir güç (P_{te}) 33,78 Watt'a düşmektedir. Elektriksel kayıpların başlıca nedeni şarj regülatörünün neden olduğu kayıplardır. Şarj regülatörünün düşük voltajı yükseltmek gibi bir özelliği bulunmamaktadır, bunun nedeni şarj regülatörünün asıl olarak sabit gerilim üreten güneş pili sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış olmasıdır. Şarj regülatörü jeneratör gerilim değeri, akü şarj gerilim değeri olan yaklaşık 12,7 Volt'u geçtiğinde aküyü şarj etmeye başlamaktadır. Türbinin devir sayısı arttıkça jeneratörün gerilim değeri de yükselmektedir, bu sırada şarj regülatörü bu gerilimi regüle etmekte ve akü şarj gerilim değerine (12,7 Volt) düşürmektedir. Bu işlemi yaparken akımda herhangi bir artış yapmadığı gözlemlenmiştir.

Elektriksel verim 3.8 numaralı formüle göre hesaplanmıştır. Elektriksel verimin, jeneratörün ürettiği gerilim değerinin artması ile düştüğü gözlemlenmiştir bu düşüş Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu kayıplar rüzgar türbinin değişken gerilim değerleriyle uyumlu çalışacak bir şarj regülatörünün kullanımı ile azaltılabilir.



Şekil 4.1. Elektriksel verimin türbin gerilimi ile değişimi

Rüzgar türbinin gücünün rüzgar hızına göre değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Siyah eğri rüzgar türbinin gücünü (P_t), kırmızı eğri ise faydalanabilir gücü (P_{te}) göstermektedir. Rüzgar türbinin gücünün Çetin’in (2005) belirttiği üzere 2.25 numaralı denklemde olduğu gibi, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Faydalanabilir gücün ise 3.8 numaralı formüle göre elektriksel verimin düşmesi nedeniyle rüzgar türbini gücünden uzaklaştığı görülmüştür (Şekil 4.2).

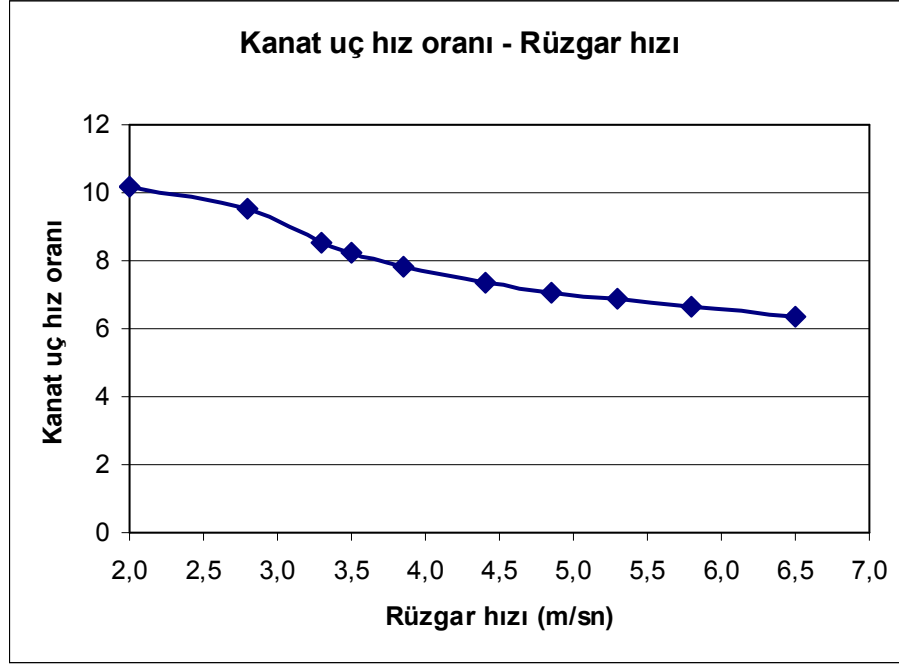


Şekil 4.2. Rüzgar türbini gücünün rüzgar hızıyla değişimi

Kanat profili seçimindeki amaç 5,5 m/s rüzgar hızında 7,40 kanat uç hız oranına sahip olması ve böylece jeneratörle uyumlu olarak dönmesidir. Kanat uç hız oranı değerlerinin rüzgar hızıyla değiştiği görülmüştür (Şekil 4.3). Elde edilen sonuçlara göre rüzgar türbini, 2,0 m/s rüzgar hızında 10,17 kanat uç hız oranı değerine, 6,5 m/s rüzgar hızında 6,37 kanat uç hız oranı değerine sahiptir. Kanat uç hız oranı değerinin rüzgar hızının artması ile düştüğü gözlemlenmiştir.

Vardar'ın (2005) değişik kanat profilleriyle yaptığı çalışmalarda elde ettiği kanat uç hız oranları değerlerinin değişimlerine bakıldığında, kanat uç hız oranı değerlerinin rüzgar hızıyla arttığı görülür. Örnek olarak NACA 4412 kanat tipinde, 0 derece burulma açısı ve 18 derece bağlanma açısına sahip 31 cm rotor çapındaki rüzgar türbininin kanat uç hız oranı

değerleri 2,2 m/s, 3,1 m/s, 3,9 m/s rüzgar hızlarında sırasıyla 5,9-7,2-7,5 değerlerini almıştır. Vardar (2005) çalışmasında herhangi bir dirence maruz kalmayan bir rotor için ölçümler yapmıştır, fakat tasarlanan sistemde jeneratörün aküyü şarj ederken oluşturacağı direnç rotora etkiyecektir.



Şekil 4.3. Kanat uç hız oranının rüzgar hızına göre değişimi

Rüzgar türbinin güç katsayısı C_p bir çok değişkenden etkilenmektedir, bu etkenler Ragheb (2009) tarafından 2.29 numaralı formülde belirtilmiştir.

$$C_p = C_{pschmitz} \cdot \eta_{profil} \cdot \eta_{uç} \cdot \eta_{kanatlar} \cdot \eta_{sürtünme} \cdot \eta_{aktarma} \cdot \eta_{elektrik} \quad 2.29$$

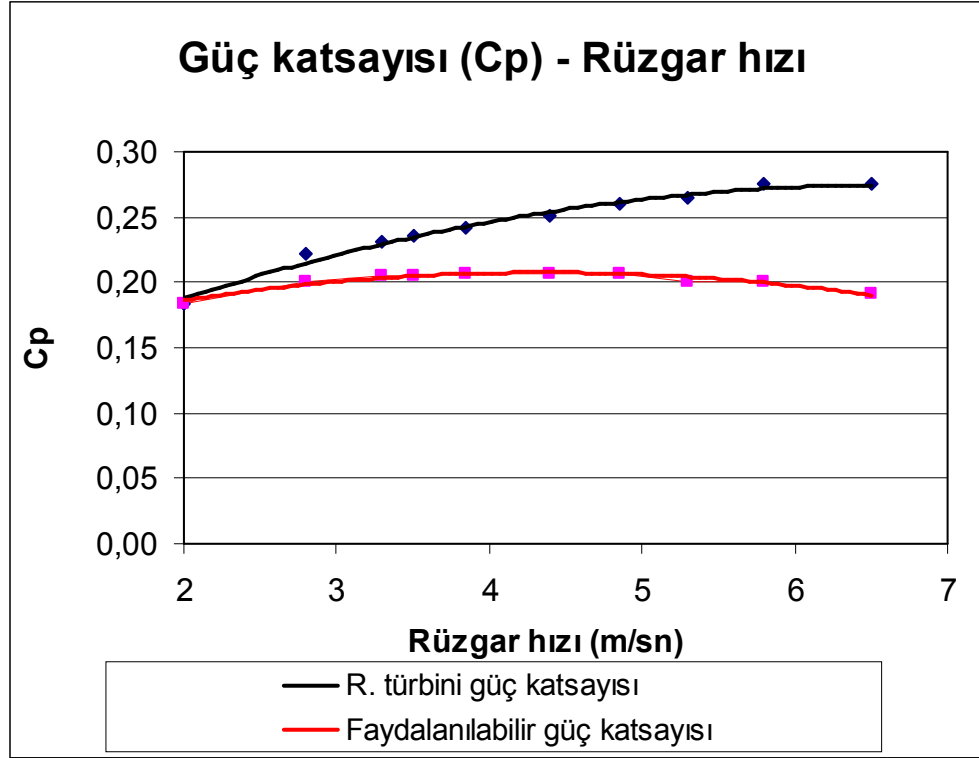
Tez kapsamında elektriksel verim, rüzgar türbin güç katsayısı değeri içinde ele alınmamıştır, bunun nedeni elektriksel kayıpların şarj regülatöründen kaynaklanması ve bu kayıpların daha uygun elektronik ekipmanlarla çözümlenebilecek olmasıdır.

Rüzgar türbinin güç katsayısı değerini en çok etkileyen etken girdap kaybı diğer adıyla Schmitz katsayısıdır ($C_{pschmitz}$) (Çetin vd 2005). İdeal bir yatay eksenli rüzgar

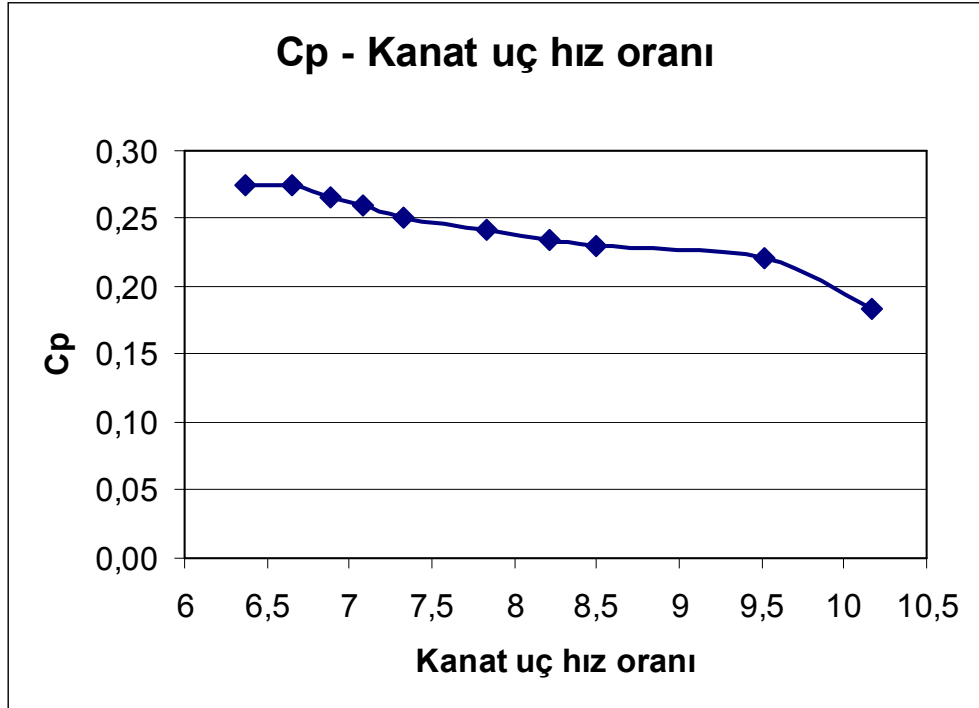
türbininin girdap kaybı değerlerinin kanat uç hız oranı değerleri ile değişimi Şekil 2.9’ da verilmiştir (Çetin vd. 2005). Deneysel olarak iki kanatlı yüksek hızda çalışan yatay eksenli bir rüzgar türbininin kanat uç hız oranı – güç katsayısı eğrisi ise Şekil 2.10’ da verilmiştir (Ragheb 2009). Çetin vd (2005) tarafından belirtilen değerlerde genel momentum teorisine göre yapılmış hesaplar sonucu bulunan güç katsayısı – kanat uç hız oranı değerleri verildiği için, yüksek kanat uç hız oranlarında güç katsayısının değişmeyeceği öngörülmüştür, fakat elde edilen sonuçlarda kanat uç hız oranının rüzgar hızının artmasıyla azaldığı, Ragheb (2009) tarafından belirtilen üç kanatlı rüzgar türbinleri için 2.24 numaralı formülle hesaplanan optimum kanat uç hız oranı aralığına (5,26 -5,45) yaklaştıkça güç katsayısı değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Rüzgar türbininin güç katsayısının rüzgar hızıyla değişimini gösteren eğri incelendiğinde, rüzgar türbininin güç katsayısının 6,5 m/s rüzgar hızında tepe noktasına ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.4). Daha yüksek rüzgar hızlarında bu değer bir süre değişmeyeceği ve sonra düşüşe geçeceği yine bu eğriden tahmin edilebilir. Kanat uç hız oranının da rüzgar hızının artışıyla azaldığı Şekil 4.3’den anlaşılmaktadır. Sonuç olarak elde edilen veriler neticesinde, seçilen kanat profilinin optimum kanat uç hız oranının 6,5 m/s rüzgar hızında 6,37 olduğu kabulü yapılabilir. Bu değer Ragheb’in (2009) belirttiği 5,26-5,45 aralığı değerinden fazladır, bunun nedeni kanat yapısının yüksek devir sayılarında dönüşü uygun olması olarak açıklanabilir. Rüzgar türbininin, daha yüksek rüzgar hızlarında ve buna bağlı olarak değişen daha düşük kanat uç hız oranı değerlerinde, daha yüksek güç katsayısı değerlerine ulaşamayacağı, aksine güç katsayısı değerinin Ragheb’in (2009) Şekil 2.10’da belirttiği üzere düşeceği söylenebilir. Rüzgar türbini güç katsayısının kanat uç hız oranı değeri ile değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir.

Şarj regülatörünün neden olduğu elektriksel kayıp dikkate alındığında rüzgar türbinin faydalanılabilir güç katsayısının rüzgar hızıyla beraber fazla artış göstermediği ve 0,20 civarlarında yatay bir eğri çizdiği görülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Güç katsayısı değerinin rüzgar hızına göre değişimi



Şekil 4.5. Güç katsayısı değerinin kanat uç hız oranına göre değişimi

Vardar (2004, 2005) rüzgar türbinlerinin performanslarını belirlemek için farklı kanat tipleri ile çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların birinde rotor herhangi bir dirence maruz kalmadan dönmekte (Vardar 2005), diğer bir çalışmasında ise rotor küçük bir elektrik motoruna bağlı olarak belirli elektrik dirençleri altında dönmektedir (Vardar ve Eker 2004). Vardar'ın (2005) boşta dönen rotorlarla yaptığı çalışmalarda NACA 4412 tip, 0 derece burulma açılı, 18 derece bağlanma açılı 3 kanatlı 31 cm çapındaki rotorun, 2,2-3,1-3,9 m/s rüzgar hızlarında sırasıyla 5,9-7,3-7,5 kanat uç hız oranlarına sahip olduğu hesaplanmıştır. 102,3 Ohm elektrik direnci kullanılan deneylerde ise Vardar ve Eker'in (2004) NACA 4412 tip, 10 derece burulma açılı, 10 derece bağlanma açılı 3 kanatlı, 31 cm çapındaki rotorun 2-3-4 m/s rüzgar hızlarında sırasıyla 7,3-9,7-9,3 kanat uç hız oranı değerlerini bulduğu görülmüştür. Tez için tasarlanan rüzgar türbinin kanat uç hız oranı değerlerinin ise rüzgar hızının artmasıyla düştüğü gözlemlenmiştir. Rüzgar türbini 2,0 m/s rüzgar hızında 10,17 kanat uç hız oranı değerine, 6,5 m/s rüzgar hızında 6,37 kanat uç hız oranı değerine sahiptir. Rüzgar türbininin kanat uç hız oranındaki azalmanın, Vardar'ın elektriksel direnç uyguladığı rotorun 3 – 4 m/s rüzgar aralığında karşılaştığı kanat uç hız oranı değerindeki azalmaya benzer olduğu görülmüştür. Kaya (2009) çalışmasında, pistonlu pompa ile mekanik olarak su pompalayan rüzgar türbininde benzer sonuçlara ulaşmıştır. Kaya (2009) farklı strok boylarında pistonlar kullanarak rotora etkiyen dirençleri de değiştirmiş ve kanat uç hız oranları değerlerinin rüzgar hızıyla değişimini ölçmüştür. Elde ettiği sonuçlar tezde de iddia edildiği üzere farklı dirençlerde farklı kanat uç hız oranlarının oluşacağını göstermiştir. Emniyetli (2007) ve Önder (2006), çalışmalarında tasarlanan rüzgar türbinlerinin matematiksel modellemelerle güç katsayısı ve kanat uç hız oranı değerlerini belirlemişlerdir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, bu çalışmalarda elde edilen verilere, düşük kanat uç hız oranlarında benzerlik göstermekte, fakat yüksek kanat uç hız oranlarında farklılık arz etmektedir. Matematiksel modellemelerle bulunan sonuçlarda güç katsayısı değerlerinin deneysel çalışmalarla bulunan değerlerden farklı olarak yüksek kanat uç hızı oranlarında düşüş göstermediği görülmektedir.

Çalışmada, rüzgar hızına bağlı kanat uç hız oranındaki değişim ile ilgili sonuçlar boşta dönen rotorlar için Vardar'ın elde ettiği sonuçlardan farklıdır. Vardar boşta dönen rotorlarda kanat uç hız oranlarının rüzgar hızıyla beraber arttığını gözlemlemiştir. Bu

çalışmada ise kanat uç hız oranının rüzgar hızıyla düştüğü gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların nedeni, rotorun doğrudan bağlı olduğu jeneratörün aküyü şarj ederken karşılaştığı dirençlerin kanat uç hız oranı değerine etki etmesidir.

Önder'in (2006), genel momentum teorisine göre yaptığı hesaplamalarda kanat uç hız oranı değeri ile beraber güç katsayısı değeri de artmakta fakat bu artış bir noktadan sonra düşüşe geçmemekte ve Betz teorisinde belirtilen 0,59 değerinde sabitlenmektedir. Tezde tasarlanan rüzgar türbininde ise güç katsayısı değerinin, kanat uç hız oranı değerinin Ragheb (2009) tarafından belirtilen optimum değere yaklaşması ile arttığı gözlemlenmiştir. Vardar (2005) boşta dönen rüzgar türbinleri ile yaptığı çalışmada güç katsayısını teorik olarak hesaplamıştır bu nedenle güç katsayısı değerini %59 olarak bulmuştur. Elektriksel olarak gücü hesapladığı çalışmada ise güç katsayısı değerini 0,017 değerlerinde bulmuştur (Vardar ve Eker 2004), bu değer çok düşük olmasının nedeni kullanılan elektrik motorunun ve buna bağlanan direncin rotorun gücüyle uyumlu olmaması olabilir. Rüzgar türbinin amacı 12 Volt'luk aküyü beslemek olduğu için uygulanacak en uygun direnç jeneratörün şarj regülatörü ile aküyü şarj etmesi sırasında oluşacak dirençtir. Tez kapsamında tasarlanan rüzgar türbinin güç katsayısı değeri 6,5 m/s rüzgar hızında 0,275'dir. Ragheb'e (2009) göre rüzgar türbini tasarımında 0,35'lik bir güç katsayısı değeri gerçekçi bir hedef olarak kabul edilebilir. Bu nedenle tasarlanan rüzgar türbininin akü şarj etmek amaçlı üretilecek uygulamalar için gerçekçi sonuçlar ürettiği söylenebilir.

5. SONUÇ

Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılan en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi uygulamaları çoğunlukla büyük ölçekli rüzgar türbini santralleri ile yapılmaktadır. Küçük ölçekli rüzgar türbini uygulamalarının artması rüzgar enerjisinin yaygınlaşmasını ve daha geniş kitleler tarafından kullanılmasını sağlayacaktır. Bu sayede insanların alternatif ve temiz enerji kaynaklarına olan ilgisi de artacaktır.

Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaygınlaşması onların ekonomik ve uygulama kolaylığı açısından rekabetçi olması ile mümkün olacaktır. Bu nedenle bu tez kapsamında, şebeke elektriğinin bulunmadığı, ulaşımın ve iklimin zor olduğu kırsal alanlarda kendi kendini idame ettirecek bir sistem olan elektrikli rüzgar pompası tasarımı yapılmıştır.

Tez kapsamında 12 Volt' luk bir aküyü şarj edecek küçük ölçekli bir rüzgar türbinin nasıl tasarlanması gerektiği incelenmiştir. Tasarım esnasında dikkate alınacak birçok faktör vardır, bunlar başlıca; bölgedeki rüzgar hızı, süresi, yeraltı suyu seviyesi, kullanılacak DC pompanın çekeceği akım ve gerilim değerleri, rüzgar türbininde kullanılan DC jeneratörün şarj regülatörü ile aküyü şarj ederken devir sayısına bağlı ürettiği gerilim ve akım değerleri ve kanat profiline aerodinamik yapısı olarak sıralanabilir.

Teze hazırlık aşamasında, suyun rüzgar estikçe üretilecek elektrik ile yüzeye pompalanması ve bir havuz veya tankta depolanması öngörülmüştür. Bu sayede aküye olan ihtiyaç ortadan kalkacaktır, bu da sistemin maliyetini düşürecektir. Fakat uygulama aşamasına geçildiğinde kullanılan şarj regülatörünün ancak sisteme bağlı bir akü olduğunda çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle 80Ah bir akü sisteme dahil edilmiştir. Akü olmadan da voltajı regüle edecek bir elektronik cihazın tasarlanması halinde sistem aküsüz olarak da çalışabilir. Suyun pompalanacağı bir tankın veya havuzun bulunmadığı yerlerde yeni bir havuz yapmak veya tank almak yerine uygun

kapasitede bir jel akü kullanılabilir, fakat jel akülerin 5 yıl civarı ömürleri oldukları maliyet hesabında dikkate alınmalıdır.

Rüzgar türbinin tasarımında uygulanan en önemli kriter, rotorun devir sayısının jeneratörün devir sayısı ile uyumlu olmasıdır. Bu sayede rotor mili ile jeneratör arasında herhangi bir hız değiştiriciye gerek kalmayacak ve sistemin verimi artırılıp, maliyeti düşürülecektir, ayrıca imalat ve bakım kolaylığı sağlanmış olacaktır. Bu amaçla rotorla jeneratörün uyumlu ve en yüksek verimle çalışabileceği kanat boyu, kanat sayısı ve kanat profili belirlenmiştir. Rüzgar hızına bağlı olarak, rotor devir sayısı, kanat uç hız oranı, rüzgar türbin gücü ve faydalanabilir türbin gücü değerleri bulunmuştur. Bu değerler teorik değerler ile ve yapılmış deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak tasarlanan, bir sulama sisteminde kullanılabilecek rüzgar enerjisi sistemi, elektrik hattının bulunmadığı, jeneratör için yakıt ikmalinin sağlanmasının masraflı ve zor olduğu kırsal bölgelerde su ihtiyacının karşılanması için ekonomik bir çözüm olacaktır. Bu sayede rüzgar enerjisinin kullanımı için yeni bir alan yaratılmış olacak ve bu yönde yapılacak yatırımlar sayesinde diğer rüzgar enerji sistemleri de ucuzlayacak ve yaygınlaşacaktır. Sulanabilir tarım alanları artacak ve ülke ekonomisine katkıda bulunulacaktır. Tasarlanan sistem ve deney düzeneği portatif olduğu için ufak değişiklikler ile farklı kanat profilleri, boyları ve farklı türbin jeneratörleri ile denenebilir. Bu sayede yeni tasarımlar için gerekli olan deneysel veriler elde edilerek yeni akademik çalışmalara kaynak oluşturulabilir.

6. KAYNAKLAR

- ARGAW, N., FOSTER, R. and ELLIS, A. 2001. Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 42-24 pp.
- BARRETT, H. 2010. How sustainable projects generate higher returns. Oxford Sustainable's CEO's blog site. http://www.propertysecrets.net/blogs/hadley_barrett/tag-cee_property.html
- BRYUKHAN, F. F. 1993. A Wind Power Simulation Model for a System of Compound Wind Farms. *Wind Engineering*, 17 (1): 15-23.
- ÇETİN, N.S., YURDUSEV, M.A., ATA, R. and ÖZDEMİR, A. 2005. Assessment of optimum tip speed ratio of wind turbines. *Mathematical and Computational Applications*, 10 (1): 147-154.
- ÇINAR, Ö. 2002. Türkiye'nin rüzgar enerjisi avantajları ve Hatay ilinde maliyet ve enerji potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 55 ss.
- EİE. 2010. Rüzgar enerjisi. Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü resmi sitesi. http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html
- EMNİYETLİ, G. 2007. Evsel elektrik ihtiyacının karşılanması için rüzgar türbini tasarımı, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 25-27, 78 ss.
- GÜNGÖR, K. 2005. Rüzgar pompası tasarımı ve prototip imalatı. Bilim Uzmanlığı Tezi (yayınlanmamış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 33 ss.
- HANSEN, M.O.L. 2008. Aerodynamics of wind turbines, Earthscan, London, 1-2 pp.
- IEA, The International Energy Agency. 2009 Global renewable energy policies and measures. <http://www.iea.org/textbase/pm/grindex.aspx>
- İLKILIÇ, C. 2003. Rüzgar enerjisi ve kullanımı. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 4: 44-48.
- JONGH, J. and SMULDERS, P.T. 2009. Introduction to Wind Pumps. In: ARRAKIS, Wind Pumping Handbook for Engineers, pp. 6-14, Veldhoven.
- JORGENSEN, T.B. and NIELSEN, H.O. 2008. Vertical Wind Turbin. M. Sc. Thesis, Aarhus University, 6 pp.

- KAYA, H., 2009. Rüzgar türbini tahrikli, değişken stroklu pistonlu pompa sisteminin tasarımı ve çalışma karakteristiklerinin deneysel incelenmesi (yayınlanmamış), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 65 ss.
- KÖROĞLU, T., TEKE, A., BAYINDIR, K. ve TÜMAY, M., 2010. Güneş paneli sistemleri tasarımı. *EMO Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 439: 98-104.
- KUHN, P. 2010. Introduction to small wind turbines, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES.
http://www.iset.uni-kassel.de/abt/FB-I/publication/2010-028_Introduction_to_Small_Wind_Turbines-Paper.pdf
- KUM, H. 2009. Yenilenebilir enerji kaynakları: Dünya piyasalarındaki son gelişmeler ve politikalar. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33: 207-223.
- ÖNDER, M. 2006. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 30 ss.
- PATEL, R.P. 2006. Wind and solar power systems design, analysis and operation. CRC Pres, Florida, pp. 3-11
- PEINKE, J., SCHAUMANN, P. and BARTH, S. 2007. Wind energy. Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 4, Berlin.
- SMITH, R. 2007. Vertical Axis Wind Turbines. Rich Smith's blog.
http://www.symscape.com/blog/vertical_axis_wind_turbine
- TREACY, M. 2010. Norway building world's largest wind turbine.
<http://ecogeek.org/wind-power/3071-norway-building-worlds-largest-wind-turbine>
- UYAR, T.S. 2009. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Kullanımında Gelişmeler, Rüzgar Enerjisi, http://www.emo.org.tr/ekler/231d0fc7a165f72_ek.pdf?dergi=5
- VARDAR, A., EKER, B., 2004. The wind tunnel measuring methods for wind turbine rotor blades, *Wind and Structures*, 7:305-316.
- VARDAR, A. 2005. Bazı Rüzgar Türbini Rotorlarında Devir Sayıları Üzerine Bir Araştırma, *Kaynak Elektrik Dergisi*, 189:100-103.
- VIKIPEDIA. 2011. Rüzgar gücü. http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_g%C3%BCc%C3%BC
- VIKIPEDIA. 2011. Enercon. <http://en.wikipedia.org/wiki/Enercon>

WWEA. 2010. World wind energy report 2009. pp. 8-9 <http://www.wwindea.org>

YAĞLI, M.İ. 2009. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi. *T.C. Dışışleri Bakanlığı Uluslararası Ekonomik Sorunlar Dergisi*, 34: 29-33

ÖZGEÇMİŞ

Kutbay SEZEN 1983 yılında Eskişehir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2000 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. Şubat 2008 – Haziran 2012 yılları arasında, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılından beri DSİ 13. Bölge Müdürlüğü’nde Makine Mühendisi olarak görev yapmaktadır.