

**YATAY EKSENLİ HELEZONİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE  
PROTATİP İMALATI**

**Umut YILDIRIM**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Haziran 2011**

Umut YILDIRIM tarafından hazırlanan “YATAY EKSENLİ HELEZONİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE PROTATİP İMALATI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/ 06/ 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

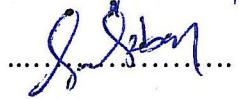
Başkan : Yrd. Doç. Dr. Süleyman SEMİZ (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Engin ÖZBAŞ (KBÜ)

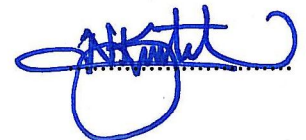


...../...../2011

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Umut YILDIRIM

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **YATAY EKSENLİ HELEZONİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE PROTATİP İMALATI**

**Umut YILDIRIM**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN**

**Haziran 2011, 62 sayfa**

Bu çalışmada, alternatif enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinden faydalanılarak elektrik üretmek amacıyla yatay eksenli helezonik rüzgâr türbin tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Tek sarımlı ve çift sarımlılı olmak üzere iki tip tasarım yapılarak çalışabilirliği deneysel olarak incelenmiştir.

Tek sarımlı ile çift sarımlı rüzgar türbinleri arasındaki farkın analizi için deneyler atölyede oluşturulan yapay bir ortamda simülasyon şeklinde gerçekleştirilmiştir. Rüzgar hızının 10 m/s olduğu durumda çift sarımlı türbinde 3,5 volta ulaşılırken, tek sarımlı türbinde 3,0 volta ulaşılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Rüzgar enerjisi, helezonik rüzgar türbini.

**Bilim Kodu** : 708.3.029

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **PROTATIP DESIGN AND MANUFACTURE OF HORIZONTAL AXIS HELICAL WIND TURBINE**

**Umut YIDIRIM**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Education**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN**

**June 2011, 62 pages**

In this study, making use of alternative energy sources, wind energy to generate electricity, horizontal-axis wind turbine design and manufacture of coil is made. Single-wound and double-wound design made of two types of experimental analysis of interoperability.

Single-wound with a double-wound experiments for analysis of wind turbines, the difference between an artificial environment created in the workshop was held in the form of simulation. Wind speed 10 m / s case is double-wound turbines reached 3,5 volts, 3,0 volts, single-wound turbines has been reached.

**Key Words** : Wind energy, helical wind turbine.

**Science Code** : 708.3.029

## **TEŐEKKÖR**

Bu tez alıőmasının hazırlanmasında değerli yardımlarını esirgemeyen ve her tÖrlÖ kolaylığı gösteren Sayın Yrd. Do. Dr. Erdoğan KILIASLAN hocama teőekkÖrlerimi bor bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
BÖLÜM 3 .....	6
ENERJİ VE TÜRKİYE’DE ENERJİ KAYNAKLARI .....	6
3.1. ENERJİ İHTİYACI .....	6
3.2. ENERJİ KAYNAKLARI .....	7
3.2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	7
3.2.1.1. Güneş Enerji .....	7
3.2.1.2. Hidrojen Enerjisi .....	8
3.2.1.3. Dalga ve Gel-Git Enerjisi .....	9
3.2.1.4. Jeotermal Enerjisi .....	9
3.2.1.5. Hidrolik Enerjisi .....	10
3.2.1.6. Biyogaz Enerjisi .....	11
3.2.1.7. Rüzgâr Enerjisi .....	11
3.2.2. Türkiye İçin Yenilenemeyen Enerji Kaynakları .....	12
3.2.2.1. Taş Kömürü ve Linyit .....	13
3.2.2.2. Petrol .....	13

3.2.2.3. Doğal Gaz .....	14
3.2.4. Türkiye İçin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli .....	14
3.2.2.1. Türkiye'nin Hidroelektrik Potansiyeli.....	14
3.2.2.2. Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli .....	15
3.2.2.1. Türkiye'nin Biyokütle Enerjisi Potansiyeli .....	16
3.2.2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	17
3.2.2.1. Türkiye'de Hidrojen Enerjisi Potansiyeli .....	18
BÖLÜM 4 .....	19
RÜZGÂR ENERJİSİ .....	19
4.1. RÜZGÂRIN TANIMI .....	19
4.2. RÜZGÂR TÜRLERİ .....	20
4.3. RÜZGÂR ENERJİSİ .....	21
4.3.1. Dünya'da Rüzgâr Enerjisi .....	21
4.3.2. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi .....	22
4.4. RÜZGÂR ENERJİSİ ÖZELLİKLERİ VE KULLANIMI .....	24
4.4.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları .....	24
4.4.1.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları.....	24
4.4.1.2. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları.....	25
4.4.1.2. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları .....	26
4.5. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ .....	27
4.5.1. Eksen Farkına Göre Rüzgâr Türbinleri .....	27
4.5.1.1. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri.....	27
4.5.1.2. Darrieus Rüzgâr Türbinleri .....	28
4.5.1.3. H.Darrieus Rüzgâr Türbinleri.....	28
4.5.1.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri.....	28
4.5.2. Rüzgârı Alış Yönlerine Göre Rüzgâr Türbinleri .....	30
4.5.2.1. Rüzgârı Arkadan Alan Makineler.....	30
4.5.2.2. Rüzgârı Önden Alan Makineler.....	31
4.5.3. Rüzgâr Hızına Göre Rüzgâr Türbinleri.....	33
4.5.3.1. Düşük Hızlarda Çalışan Rüzgâr Türbinleri.....	33
4.5.3.2. Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgâr Türbinleri.....	33
4.5.4. Güç Kontrol Sistemine Göre Rüzgâr Türbinleri.....	34



	<b><u>Sayfa</u></b>
4.5.4.1. Stall Kontrollü Türbinler.....	35
4.5.4.2. Pitch Kontrollü Türbinler.....	37
4.5.4.3. Aktif Stall Kontrollü Türbinler.....	38
4.5.5. Rotor Hızına Göre Türbinler .....	39
4.5.5.1. Sabit Hızlı Türbinleri .....	39
4.5.5.2. İki Hızlı Türbinleri.....	39
4.5.5.3. Değişken Hızlı Türbinler .....	39
4.5.6. Kullanım Yerine Göre Türbinler .....	40
4.5.6.1. Şebeke Bağlantılı Rüzgâr Türbinleri .....	40
4.5.6.2. Şebeke Bağlantısız Rüzgâr Türbinleri .....	41
4.6. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ÖMRÜ BAKIMI ve GÜVENLİĞİ.....	42
4.6.1. Türbin Ömrü .....	42
4.6.2. Türbinlerin Bakımı.....	42
4.6.3. Türbin Güvenliği.....	43
4.6.4. Çevresel Etkiler.....	43
4.6.4.1. CO <sub>2</sub> (Karbondiyoksit) Salınımı .....	44
4.6.4.2. Rüzgâr Enerjisinde Kara Kullanımı.....	44
4.6.4.3. Rüzgâr Santrallerinde Su Tüketimi .....	44
4.6.4.4. Mekanik Gürültü Salınımları .....	45
4.6.4.5. Rüzgâr Türbinlerinde Ses.....	45
<b>BÖLÜM 5 .....</b>	<b>46</b>
<b>MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>46</b>
5.1. TÜRBİN TASARIMI .....	46
5.2. RÜZGÂR ÖLÇERLER .....	52
5.3. ELEKTRİKSEL GÜÇ HESABI .....	53
5.4. DENEY SONUÇLARI.....	54
5.5. TARTIŞMA .....	55
<b>BÖLÜM 6 .....</b>	<b>56</b>
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>56</b>

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 3.1. Türkiye'de kişi başına elektrik enerjisi üretim ve tüketimi.....	7
Şekil 4.1. Türkiye rüzgâr atlası.....	23
Şekil 4.2. Dikey eksenli rüzgâr türbini.....	27
Şekil 4.3. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri.....	30
Şekil 4.4. 600 Kw Stall kontrollü türbine ait güç eğrisi.....	36
Şekil 4.5. Stall oluşumu.....	36
Şekil 4.6. 600 Kw Pitch kontrollü türbine ait güç eğrisi.....	37
Şekil 4.7. Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması.....	38
Şekil 5.1. Tek katlı savonius rüzgâr türbini.....	46
Şekil 5.2. İki katlı savonius rüzgâr türbini .....	47
Şekil 5.3. Üç katlı savonius rüzgâr türbini .....	47
Şekil 5.4. Dikey eksenli helezonik rüzgâr türbini.....	48
Şekil 5.5. Tek sarımlı yatay eksenli helezonik rüzgâr türbini .....	49
Şekil 5.6. Çift sarımlı yatay eksenli helezonik rüzgâr türbini .....	49
Şekil 5.7. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin bitmiş hali.....	50
Şekil 5.8. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin dış ortamda denenmesi .....	51
Şekil 5.9. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin denenmesinde kullanılan fan.....	51
Şekil 5.10. Elektronik rüzgâr ölçer .....	52
Şekil 5.11. Üretilen gerilim .....	54

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Havzalarla Türkiye'nin ekonomik hidrolik enerji potansiyeli .....	15
Çizelge 5.1. Çift Sarımlı ile tek sarımlı türbinin deney sonuçları .....	55

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Bir sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilen enerji, kullanım alanına göre elektrik enerjisi, mekanik enerji, kimyasal enerji gibi çeşitlere ayrılabilir. Genel olarak fosil yakıtların oluşturduğu dünyadaki yararlanılan enerji kaynaklarının bir kısmı tükenir ve yeniden kullanılamaz. Yenilenemeyen enerji kaynakları olarak bilinen katı, sıvı ve gaz şeklindeki enerji kaynakları 1970’li yıllara gelindiğinde enerji talebini karşılayamaz hale gelmiş ve insanlık yeni arayışlara girmiştir. Böylece gündeme yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gelmiştir. Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve maddi gelirin yükselmesiyle beraber artan konfor arayışı, enerji talebini artıran en önemli etkenler olarak gösterilebilir [1].

Artan enerji talebiyle beraber fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. 2050’li yıllara gelindiğinde petrolün tükenme noktasına gelineceği varsayılmaktadır. Doğalgaza 2070, kömüre ise 2150 yılına kadar omur biçilmektedir [2].

Fosil yakıtların kullanılması aynı zamanda çevresel etkileri beraberinde getirmiştir. En önemli etkisi hava üzerine olmuş ve hava kirliliğine bağlı birçok sorun ortaya çıkmıştır.

Fosil yakıtlar bakımından ülkemiz zengindir. 1999 yılına kadar elektrik enerjimizin neredeyse tamamını termik ve hidrolik santrallerden sağlanmaktaydı. Enerji istatistikleri dergisine göre elektrik üretiminin % 68,75 termik santrallerden, %29,2 hidrolik santrallerden, %0,07 jeotermal santrallerden % 0,02 rüzgar santrallerinden olduğu açıklanmıştır. % 1,96 gibi bir oranda ithal edilmiştir [3].

Sonraki yıllarda doğalgazın ülkemize ithalatının artmasıyla elektrik enerjisi üretiminin belkemiğini oluşturmuştur. Günümüzde ise elektrik üretimimiz yarısında

doğalgaz kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus enerji üretimimizin yarısı kendi ülkemize ait olmayan ithal ettiğimiz doğalgaza kaymış olmasıdır. Hatta ithal ettiğimiz doğalgazı kullanmak için termik santrallerimizin kapasiteleri en alt seviyelere indirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olmakla beraber süreç bir an önce hızlandırılmalıdır. Çünkü enerjiyi dışarıdaki kaynaklardan temin etmek dışa bağımlı hale gelmektir [1].

Tükenen enerji kaynaklarıyla beraber yenilenebilir enerji kaynaklarını hızla faaliyete geçirmek zaman geçtikçe önemi daha da artan bir hal almaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde belki de en önemlisi rüzgar enerjisidir. Dünyaya genel olarak baktığımızda Almanya, Hollanda, İsviçre gibi ülkeler rüzgar enerjisinden azami derecede faydalanmaya çalışmaktadır. Ülkemizde ise bu konu üzerindeki çalışmalara 2000’li yıllardan itibaren başlanmıştır. Bu enerjiden faydalanmada biraz geç kalınmış olsa da son yıllarda artan çalışmalarla açığımızı kapatmak için yoğun bir çaba sarf edilmektedir. EPDK’ya lisans başvurusunda bulunan firmaların çokluğundan yapılan bu durum rahatlıkla anlaşılmaktadır [1].

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Murai,Y., ve Nakada,T., Bu çalışmada savonius türbininin etrafındaki hava akışına tanecik izlemesi yapılmıştır. Türbin etrafında ölçülen hız vektör alanı basınç alanını tahmin etmeye ek olarak tork performansını ölçebilecek şekilde farklı bir tasarım yapılmıştır. Türbin açısına göre basınç tahmin etme denklemlerinin üç farklı tipide yerine koyulup denenmiştir. Tasarımın en büyük özgünlüğü rüzgâr yönünün değişkenliğinden etkilenmemesidir [4].

Hannes Riegler, çalışmasında Savonius ve Darrieus tipi türbinlerin hibrit bir çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalar büyük bir kitle tarafından tartışılabilir olsa bile bu hibrit çalışma en son bu haline getirilebileceği hakkında bir çalışma yapılmıştır [5].

Kishinamia,K. ve arkadaşları., Yatay eksenli rüzgâr türbininin aerodinamik performans karakteristikleri teorik olarak şerit öge metodu ile momentum bileşimini karıştıran analiz ile araştırıldı. Bu çalışmada itiş-tork ve itiş-enerji metotları karşılaştırılmıştır. Her iki metotda yaklaşık olarak aynı sonuçları vermiştir. Ölçek deneyleri özgür akarsu hızıyla farklı düzenlemeleri karıştıran olan kanat profiline üç tipile de yapılır [6].

M. Bilgili, ve arkadaşları, Antalya ve İskenderun bölgelerindeki rüzgâr enerjisi potansiyeli üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada doğu Akdeniz bölgesindeki bazı yerlerde rüzgâr enerjisi kaynakların kullanılabilirliği ve potansiyeli incelenmiştir. Antalya bölgesi için 1997–2001 saatli rüzgâr hızları kullanılmış. Hesaplamalarda baskın rüzgâr yönü, rüzgâr hızları, rüzgâr potansiyeli ve rüzgâr dağılım yönleri sabit kabul edilmiştir. Yüksekliklere göre bölgenin rüzgâr haritası oluşturulmuştur [7].

Charlier, R. H., Gelgite bağı olarak oluşan akımlardan enerji elde edilmesi hakkında çalışma yapılmıştır. Gelişen teknolojinin global bir enerji üretim yeri olarak görülen okyanusları keşfetmesi ile bu enerji bölgelerinin tespiti hakkında inceleme yapılmıştır [8].

Hayashit, T., Hara, Y. ve Li, Y., Bir savonius rotorunun tork değişmesini azaltmak ve başlayan karakteristikleri geliştirmek için bitişik sahnelerin arasında 120 derece kova evre kaymasıyla üç kata sahip olan savonius rotorunun yeni bir tipi tasarlandı ve denendi. Hava tüneli testleri üç katlı rotorun her devriminde parazit ve dinamik tork değişimleri sıradan bir katlı rotoru ile mukayese edildiğinde çok daha düzenli olduğunu çok açık bir şekilde gösterir [9].

Menet, J.L., Elektriğin yerel üretimi için Aduble-adım Savonius rotoru : Bu çalışma elektriğin yerel üretimi için küçük bir savonius rotorunun(iki katlı) üretimi hakkında çalışma yapılmıştır [10].

M. Atılgan ve B. Dedealtan, Savonius rüzgâr çarklarının performanslarının geliştirilmesi ve karşılaştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. Düşük aerodinamik performanslarından dolayı çark hızı yüksek türbinler ile Darrieus tipi rüzgâr türbinlerine göre daha az kullanılan, Savonius tipi rüzgâr çarkı incelenmiş ve çark performansını arttırmak için yapılan çalışma tanıtılmıştır. Savonius rüzgâr çarkının orijinal şekli bozulmadan çark çevresine rüzgâr a göre yön değiştirebilen bir perde tasarlanarak negatif yönde oluşan moment ortadan kaldırılarak ve aynı zamanda çark önünde daralan bir giriş kesiti oluşturularak çark performansını arttırma yoluna gidilmiştir. Savonius rüzgâr çarklarının aerodinamik performanslarının arttırılması ile düşük rüzgâr hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olmasından dolayı, ülkemizin düşük rüzgâr hızı ortalaması (2.54 m/s) göz önüne alındığında, her geçen gün artan enerji ihtiyacının karşılanmasında rüzgâr enerjisinden daha iyi yararlanabilmek amacıyla iyi bir uygulama olacağı sonucuna varılmıştır [11].

F. Köse ve M. Özgören, Rüzgâr enerjisi potansiyeli ölçümü ve rüzgâr türbini seçimi üzerine çalışma yapmışlardır. Ölçüm sonuçları, 2003 yılından Mayıs-Aralık arası 8 aylık, 2004 yılının tamamını ve 2005 yılının Ocak ayı olmak üzere toplam 21 aylık



süreyi kapsamaktadır. Aynı sayıda rüzgâr yön değerleri de ölçülmüştür. 21 aylık ortalama rüzgâr hızı (5.52 m/s) değerinden daha yüksek hızlar elde edilmiştir. Göbek eksenindeki rüzgâr hızı Alwin ve Windpower programı kullanılarak 6.9 m/s olarak hesaplanmıştır. Kule tipi olarak da, konik boru tipi kuleler kullanılacağı düşünülmüştür [12].

Ö. Özgener, Ege bölgesinde küçük rüzgâr türbini sistemlerinde kanat yapısının ve performanslarının incelenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada fiberden yapılmış kanatlarla çelikten yapılmış kanatlar arasındaki verim farklılıkları deneysel olarak incelenmiş ve Ege Üniversitesi güneş enerjisi enstitüsünde kurulu küçük rüzgâr türbini sisteminin performansını geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Deneysel olarak kullanılan rüzgâr türbini 12 kanatlı ve kanat profili NACA 4415 kullanılmış. Sonuç olarak NACA profilli kanatların klasik profilli kanatlara oranla veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [13].

Eriksson,S., Bernhoff, H. ve Leijon,M., Tüm dünyada en çok çalışma yapılan en önemli üç rüzgâr türbininin karşılaştırmalı çalışması yapılmıştır. Üstelik farklı türbinler için kürek alanları hakkında bir çalışma yapılmıştır. Dikey eksenli rüzgâr türbininin yatay eksenli rüzgâr türbinine birkaç yönle avantajları sunulmuştur [14].

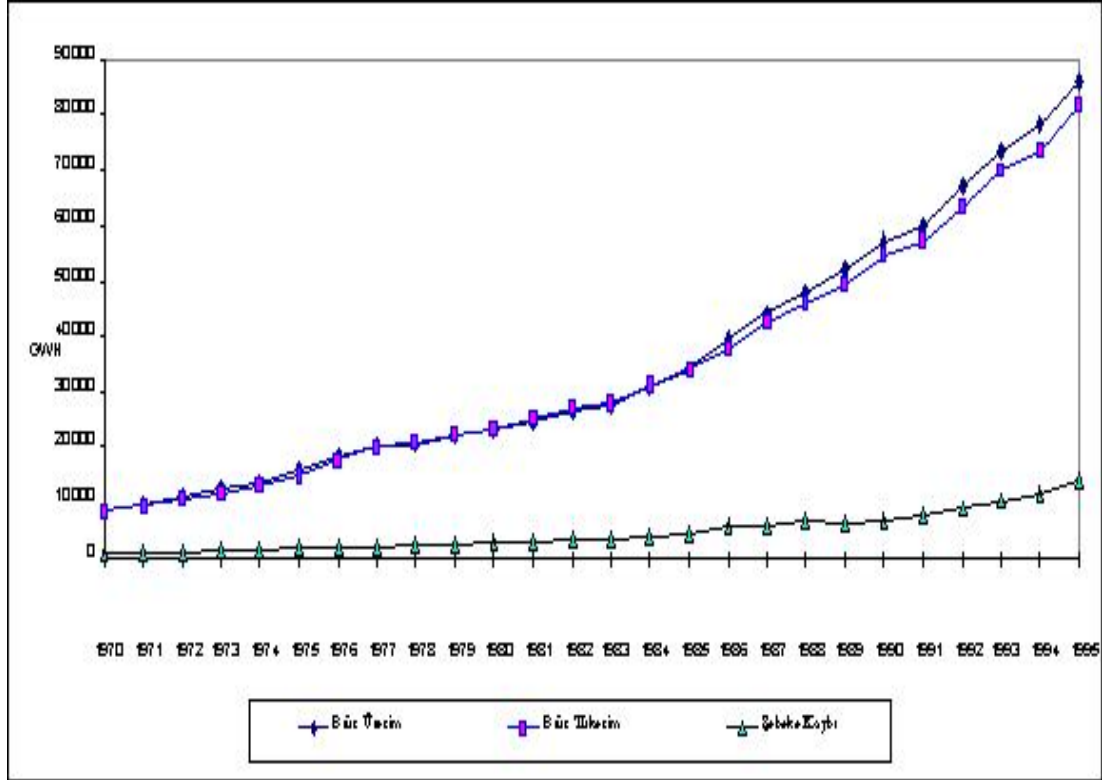
## BÖLÜM 3

### ENERJİ VE TÜRKİYE'DE ENERJİ KAYNAKLARI

Enerji, insanoğlu varoldukça gündemimizi işgal etmeye devam edecektir. İhtiyaçların karşılanması için mutlaka enerji gerekmektedir ve zaman geçtikçe nüfus artışıyla doğru orantılı olarak ihtiyaçlarımız artmaktadır. Ayrıca talep edilen konfor düzeyi teknolojik imkanların da gelişmesiyle beraber kaçınılmaz bir şekilde yükselmektedir [1].

#### 3.1. ENERJİ İHTİYACI

Kalkınmanın temel gereksinimlerinden biri enerji üretimidir. Günümüzde yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler, enerjiyi hayatımızın vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Kişi başına düşen enerji tüketimi, bir toplumun ulaştığı gelişmişlik ve uygarlık düzeyinin önemli göstergelerinden biri olmuştur. 21. yüzyılın henüz başında olduğumuz şu dönemde ülkemiz, enerji ile ilgili önemli problemlerle karşı karşıyadır. Türkiye'nin sosyal ve ekonomik açıdan hızla büyümesinin sonucu olarak özellikle elektrik enerjisine ihtiyacı vardır. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2010 yılı için Türkiye'nin enerji ihtiyacının 60 GW olacağını belirtmiştir[26]. 1970 yılında 207 kWh olan kişi başına elektrik enerjisi tüketimi 1980 yılında 2,5 katına yakın bir artış ile 459 kWh düzeyine ulaşmıştır. 1990 yılından önceki geçen on yıl içinde 2 kat artış gösteren kişi başına elektrik tüketimi bu yılda 835 kWh düzeyinde gerçekleşmiştir. 1994 yılında kişi başına elektrik tüketimi 1004 kWh olmuştur. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, Türkiye'de kişi başına elektrik enerjisi tüketimi, kişi başına brüt elektrik üretiminden yıllar itibariyle daima daha düşük düzeylerde gerçekleşirken, 1990'lı yıllarda bu açık daha da artmıştır [1].



Şekil 3.1. Türkiye'de kişi başına elektrik enerjisi üretim ve tüketimi [27].

Türkiye enerjisinin % 40'ını hidrolik santrallerden geri kalan % 60'ını ise fosil yakıtlardan karşılamaktadır [28]. Ülkemiz büyük petrol rezervlerine sahip değildir. Bundan dolayı yenilenebilir enerjinin de önemi artmaktadır. Türkiye'de en yoğun bulunan yenilenebilir enerji kaynağı rüzgâr enerjisidir [29].

## 3.2. ENERJİ KAYNAKLARI

### 3.2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

#### 3.2.1.1. Güneş Enerjisi

Gerçekte bütün enerji kaynakları güneşten türemiştir. Günümüzde enerjinin eldesinde de büyük oranda birincil kaynaklar kullanılmaktadır. Dünya nüfusunun enerjiye bağımlılığı, enerji açığını sürekli olarak büyötmektedir. Bu temel enerji kaynaklarının hızla tükenmesi insanlığı daha uzun ömürlü enerji kaynaklarına yöneltecektir. Bu kaynaklardan en önemli ikisi, nükleer enerji ve güneş enerjisidir.



türbinler) ilerleme kaydetmiş ve böylece küçük ve orta boy yakıt hücrelerinin geliştirilmesinin oldukça geniş bir elektrik üretim pazarına çözüm oluşturacağı sonucuna ulaşılmıştır. Son yıllarda proton iletebilen polimerik yapıya sahip membranların yakıt hücrelerinde verimli bir şekilde uygulanması bu teknolojilerde devrimsel bir değişime neden olmuş, özellikle taşınabilir enerji kaynaklarının (arabalar, konutlar, cep telefonları, taşınabilen bilgisayarlar, telekomünikasyon ve askeri uygulamalarda) geliştirilmesi ve uygulanmasında alternatif bir teknoloji olmuştur [22].

### **3.2.1.3. Dalga ve Gel-git Enerjisi**

Rüzgâr, denizdeki taşıtlar, denizlerin altındaki depremler veya ay ve çekim kuvveti gibi dış etkenler sonucunda dengesi bozulan deniz yüzeyinin tekrar denge konumuna dönmek için yaptığı hareketlere deniz dalgaları denir. Rüzgâr hareketiyle oluşan deniz dalgaları, diğer nedenlerle oluşan dalgalardan daha süreklidir. Gel-git santralleri bu olayın meydana geldiği kıyılara kurulur ve çift taraflı çalışan türbinler yardımıyla elektrik eldesi prensibi ile çalışır. Dalga enerjisi santralleri kıyılara ve açık denizlere kurulabilir. Son yıllarda özellikle ABD, Japonya, İngiltere ve Norveç kıyılarında çokça kullanılmaktadır. Dünyada kurulu sistemlerde, küçük sistemler için birim dalga cephesi başına güç 10-20 kW/m olurken geliştirilmiş sistemlerde güç 40 kW/m gibi bir değere çıkmaktadır. Türkiye’de dalga enerjisinden henüz faydalanılmamaktadır [20].

### **3.2.1.4. Jeotermal Enerji**

Jeotermal enerji, yer ısısı olup, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaların içerdiği termal enerji olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar ve hesaplamalar dünyanın başlangıçta eriyik halde bulunduğu ve binlerce yıl önce katı hale geldiğini göstermektedir. Yer kabuğunun derinliklerinde bulunan uranyum (U238, U235) toryum (Th232) ve potasyum (K40)

gibi radyoaktif maddelerin bozuşması sonucu sürekli olarak ısı üretmesi prosesinin, jeotermal enerjinin kaynağı olduğuna inanılmaktadır [20].

### **3.2.1.5. Hidrolik Enerji**

21. yüzyılın iki temel sorununun tatlı su gereksinimlerinin karşılanması ve genel enerji gereksinimlerinin karşılanması olduğu bilinmektedir. Her iki sorun ülkemizin jeoenerjetik konumunun çok önemli olduğunu göstermektedir. Son 20-25 yılın arayışı ise sürdürülebilir kalkınma ve sürdürülebilir enerji'dir.

Hidroelektrik enerji, Türkiye'nin kullanılabilir en önemli yenilenebilir enerji kaynağını oluşturmaktadır. Gelişmiş ülkelerin potansiyellerini büyük ölçüde değerlendirmiş olmalarına karşı, Türkiye'de işletmeye açılan tesislerle söz konusu potansiyelin ancak % 29'luk bölümü hizmete sunulmuş durumdadır. Önümüzdeki 25 yıl içerisinde, bu potansiyelin tamamının kullanılmasını sağlayacak projelerin hızlandırılması gereklidir.

Bugünkü durumu ile hidroelektrik santrallerin finans sorunu, karar verici mercilerin katılımı ile üst düzeyde çözülmesi gerekli bir sorundur. 2000'li yıllarda potansiyel bir elektrik enerjisi sıkıntısının gündemde olduğu günümüz Türkiye'si için bunun önemi ortadadır. "Yap-İşlet-Devret (BOT)" modeli için hukuksal alt yapı biran önce oluşturulmalıdır. Bu hukuksal düzenlemelerin yapılması belirli bir süre alacağından, kısa dönemde hidrolik enerji üretiminde devlet payının aşağıya çekilmesinin zor olacağı görülmektedir. Bir enerji darboğazına girilmemesi için, devletin yatırım bütçesinden hidroelektrik enerji üretimine ayrılan payların arttırılması zorunludur. Büyük güçlü hidroelektrik santral uygulamaları, literatürde klasik yenilenebilir enerji üretimleri arasında yer alırken, küçük hidroelektrik santraller yoluyla üretilen enerji yeni ve yenilenebilir enerjiler kapsamına sokulmaktadır; ancak ülkemizde bu kaynaktan bugüne kadar yararlanılmamıştır. Güçleri 10 MW'ın altında kalan ve çoğunlukla birkaç MW'ı aşmayan bu tür imkanların değerlendirilmesi de önem arz etmektedir. Bütünü ile yerli teknoloji kullanılarak değerlendirilebilecek bu tür olanaklar için, organizasyon ve yasal mevzuat düzenlemeleri yapılması gereklidir [20].

### **3.2.1.6. Biyogaz Enerjisi**

Türkiye’de biyogaz ile ilgili olarak, özellikle 1980’lerin ilk yarısında çeşitli kamu kuruluşlarınca çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar halk tarafından da ilgi ile izlenmiş ve biyogaz oldukça popüler bir konum kazanmıştır. Ancak tesis türünün teknik olarak ülkemiz koşullarına uygun olmaması nedeni ile bu tesislerin verimli ve sürekli işletilmesi mümkün olmamıştır [20].

Çin’de, Hindistan’da milyonlarca bulunan ve az gelişmiş birçok ülkede uluslar arası yardım örgütlerince yaygınlaştırılmak için bugün de çalışılan bu tip tesisler kısıtlı yerel imkanlarla yapılmaktadır. Türkiye’de olduğu gibi, yapılan hatalardan dolayı bu tesislerden birçoğu çalışmamaktadır.

Birçok çeşidi olmasına karşın, ana olarak sabit kubbeli (Çin Tipi) ve hareketli olan kubbeyi gaz deposu olarak kullanan (Hint Tipi) tesisler olarak sınıflandırılabilinecek bu tesisler, uygun sıcaklık koşullarından yararlanmak amacı ile toprak altında inşa edilmektedir. Maliyetleri arttırıcı ısıtma, yalıtım, mekanizasyon ve otomasyon gibi giderlerden kaçınılmaktadır. İşletimi yoğun olarak beden gücüne dayalı olan bu tesis tipleri ile sadece sıcaklık ortalamasının yıl boyunca yüksek olduğu ülkelerde yeterli sayılabilecek miktarda gaz üretimi sağlamak mümkün olabilmektedir.

Dünyanın birçok bölgesinde değişik atıklarla ve değişik tiplerdeki tesislerle biyogaz teknolojisi uygulanmaktadır. Gelişmemiş ülkelerde yerel olanaklarla yapılan ilkel üretim birimlerinin dışında, gelişmiş ülkelerde biyogaz teknolojisi endüstriyel anlamda bir tesis gibi mekanizasyonu, otomasyonu sağlanmış şekilde uygulanmaktadır. ABD ve Avrupa ülkelerinde çeşitli büyüklüklerde binlerce işleyen tesis vardır ve sayıları hızla artmaktadır [20].

### **3.2.1.7. Rüzgâr Enerjisi**

Dünyanın yeryüzüne göre bağıl hava hareketine rüzgâr denir. Rüzgâr atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi çevrime uğramış güneş enerjisidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin

çok küçük bir kısmı rüzgâr enerjisine çevrilebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgârın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Rüzgâr enerjisinden genel olarak mekanik enerji üretimi ve elektrik enerjisi üretimi şeklinde yararlanılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin şaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma alanlarında kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisi doğada bol miktarda bulunan bedava bir enerji kaynağıdır [20].

### **3.2.2. Türkiye İçin Yenilenemeyen Enerji Kaynakları**

Enerji sorunu ülkelerin ekonomik gelişimini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Türkiye'nin enerji durumu incelendiğinde, dünya nüfusunda % 1,2'lik bir paya sahip olmasına karşın, enerji tüketiminde % 0,8'lik bir paya erişebilmiş olduğu görülmektedir. Kişi başına dünya ortalamasının dörtte üçü kadar (48 GJ) enerji tüketmektedir [23].

Türkiye gereksinim duyduğu enerjiyi sağlamak açısından; güvenilirlik ve sürdürülebilirlik, ekonomiklik, çevresel uyum ilkelerini benimsemiş durumdadır. Teminde güvenilirlik açısından enerji gereksinimini, hem daha çeşitli kaynaklara dayandırmaya, hem de bu kaynakları satın aldığı ülkelerin sayısını artırmaya çalışmaktadır. Türkiye'de sürekli ve temiz enerji temini için YEK'lerin elektrik enerjisi üretiminde kullanılması gerekmektedir.

Türkiye'de enerji kaynağı olarak taşkömürü, linyit, petrol ve doğalgaz gibi madenler kullanılmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları adını da alan bu doğal kaynaklar açısından ülkemiz dünya rezervlerinin sadece % 5'ine sahiptir [24].



### 3.2.2.1. Taş Kömürü ve Linyit

Türkiye'nin en önemli taşkömürü havzası Zonguldak yöresinde, batıda Ereğli'den başlayarak doğuda Söğütözü'ne kadar 200 km uzunluğunda bir kuşak üzerinde yer almaktadır. Ayrıca Antalya–Kemer, Diyarbakır–Hazro yörelerinde de önemsiz iki taş kömürü yatağı bulunmaktadır. Karadeniz bölgesinde bulunan taşkömürü sahil boyunca 180 – 200 km uzunluğunda bir saha dâhilindedir. Fakat havza bütününde ortaya çıkan faylar kömür tabakalarını büyük ölçüde kesintiye uğratmakta, çıkartılan katmanlar da işletilme sonucu giderek derinleşmektedir. Havzadaki kömür damarlarının yer yer deniz seviyesinin 200 – 300 m altında ve denize indiği saptanmıştır. Bu nedenle üretim artık gelir getirici olmaktan çıkmıştır. Bu madenin günümüzdeki üretimi yaklaşık 364.000 milyon ton civarındadır.

Türkiye maden kömürü yataklarının azlığına karşın linyit kömürü rezervi bakımından oldukça zengindir. Güneydoğu Anadolu bölgesi dışındaki her bölgede kömür rezervlerine rastlamak mümkündür. Ev yakıtı olduğu kadar termik santrallerde de kullanılmaya başlanan linyit 90 dolayındaki işletmede üretilmektedir. Türkiye'nin linyit rezervleri ise 3.908.000 milyon tondur. Büyük kısmında termik santral bulunan zengin rezerve linyit yataklarımız arasında Afşin-Elbistan, Nallıhan, Kütahya-Seyitömer ve Tunçbilek, Manisa-Soma, Tekirdağ-Saray, Beyşehir, Sivas-Kangal, Muğla-Yatağan, Çankırı-Orta, Ankara-Beypazarı, Aşkale-Erzurum, sayılabilir [25,26].

### 3.2.2.2. Petrol

Türkiye bu doğal kaynak bakımından son derece az bir rezerve sahiptir. Günümüzde petrol başlıca iki çıkarım bölgesinde elde edilir. Bunlardan ilki Güneydoğu Anadolu bölgesinde Batman–Siirt (Raman, Besiri, Kurtalan, Yanarsu, Baykar, Magrip, Çelikli, Germik) Diyarbakır (Kurktan, Kayaköyü, Sincan) ve Gaziantep (Adıyaman, Bölüklüayla, Kahta, Piyanko), ikincisi Adana çevresindedir (Bulgur Dağı). Günümüzde 42.756 milyon ton dolayında üretim yapan Türkiye'de çıkartılan petrol Mersin–Ataş (Petrol işletme kapasitesi 4,4 milyon ton), İzmit–İpraş (Petrol işletme kapasitesi 13 milyon ton), İzmir–Aliğa (Petrol işletme kapasitesi 10 milyon ton),

Batman (Petrol işletme kapasitesi 1,1 milyon ton) ve Kırıkkale–Hasanlar (Petrol işletme kapasitesi 5 milyon ton) rafinerilerinde işlenir [25,26].

### **3.2.2.3. Doğal Gaz**

Artan dünya enerji talebinin % 20'si doğal gaz tarafından karşılanmaktadır. Son yıllarda Türkiye’de de gittikçe önem kazanmaktadır. Özellikle İstanbul ve Ankara gibi büyük kentlerde konutların ısıtılmasında kullanılmaktadır. Türkiye’de doğal gaz araştırma çalışmalarına Trakya’da başlanılmış ve burada Lüleburgaz (Hamitabat), Kırklareli (Deve çatağı) Babaeski (Ormancık, Kumrular) arasındaki sahada rezervlere rastlanmıştır. Ayrıca Güneydoğu Anadolu’da Mardin–Çamurlu sahasında da doğal gaza rastlanmıştır. Doğal gaz rezervi 7.952 milyon küptür [25,26].

### **3.2.4. Türkiye İçin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli**

Alternatif Enerji Kaynakları, kendisini dünya varoldukça yenileyen, yani tükenmeye enerji kaynağıdır. Petrol, doğal gaz, kömür gibi birincil enerji kaynakları açısından fakir sayılabilecek Türkiye, güneş, rüzgâr ve su kaynakları açısından, oldukça zengin bir potansiyele sahiptir. Hidroelektrik kaynak hariç, diğer yenilenebilir kaynakların tümü, teknik gelişme sürecindedir.

YEK’lerin üretimi, toplam kömür üretiminden sonra ikinci en yüksek üretime sahip kaynaklardır. YEK’lerin arzının yaklaşık üçte ikisini biyokütle (odun, hayvan ve bitki artıkları) oluşturmaktadır. Geri kalan üçte birlik kısım da ise hidrolik enerji yer almaktadır. Türkiye’de bugün yenilenebilir kaynaklardan en çok hidrolik enerji ve klasik biyokütle enerji kullanılmakla beraber rüzgâr enerjisi kullanımında da ciddi adımlar atılmaya başlanmıştır [27].

#### **3.2.4.1. Türkiye’nin Hidroelektrik Potansiyeli**

Türkiye’de değişik akarsu havzasına dağılmış olan su kaynaklarının enerji üretimi açısından toplam debisi 186 km<sup>3</sup> düzeyindedir. Bu doğal olanakta havzaların en büyük paylar sırasıyla; Fırat % 17, Dicle % 11,5 Doğu Karadeniz % 8, Doğu

Akdeniz % 6 ve Antalya % 5,9 düzeyindedir. Türkiye'deki akarsu rejimleri düzgün değildir. Akarsu debisi aşırı sulak yıllarda 1,5–2 kat artabilirken, aşırı kurak yıllarda yarıya düşebilmektedir. Ayrıca yıl içinde Nisan ile Haziran döneminde akarsu debileri ortalamadan yüksek iken Haziran ile Ağustos döneminde akarsu debileri ortalamadan düşük olmaktadır [28].

Çizelge 3.1. Havzalarla Türkiye'nin ekonomik hidrolik enerji potansiyeli [24].

<b>Havza Adı</b>	<b>Güç (MW)</b>	<b>Yıllık Ortalama (GWh)</b>	<b>Enerji Güvenilir (GWh)</b>
Susurluk	507	1.602	1.262
Kuzey Ege	16	42	26
Gediz	94	243	78
Küçük Menderes	48	143	62
Büyük Menderes	222	853	115
Batı Akdeniz	680	2.526	1.094
Antalya	1.431	5.173	2.092
Batı Karadeniz	594	2.111	1.126
Yeşilirmak	1.259	5.298	4.265
Kızılırmak	2.224	6.595	4.325
Doğu Akdeniz	1.520	5.253	3.136
Seyhan	1.886	7.307	3.513
Asi	50	120	15
Ceyhan	1.416	4.662	2.796
Fırat	9.675	38.141	30.104

### 3.2.4.2. Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli

Türkiye'de ilk jeotermal kaynak kullanımı 1963 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu alan İzmir Balçova'da 40 m derinlikte 120C sıcaklık değerinde bulunmuştur. Jeotermal potansiyelinin yaklaşık % 70'i Marmara Bölgesindedir [29]. Türkiye'nin jeotermal potansiyeli yaklaşık 31.000 MW'tır [30]. Türkiye sahip olduğu ısıtma amaçlı

jeotermal enerji potansiyeli ile dünyada ilk 7 ülke arasındadır. Jeotermal doğrudan kullanımda da Türkiye dünyada 5. sırada yer almaktadır [24].

### **3.2.4.3. Türkiye'nin Biyokütle Enerjisi Potansiyeli**

Türkiye'de değerlendirilmeyen birçok tarım atığı bulunmaktadır. Bunun başlıca nedenleri arasında, dağınık şekilde bulunan bu atıkların taşıma ve işçilik maliyetleri gelmektedir. Tarımsal atıklar üç grupta incelenebilir. Bunlar; bitkisel üretim sonucunda arta kalan atıklar, hayvansal üretim sonucunda arta kalan atıklar ve tarım ürünlerinin islenmesi sonucu ortaya çıkan atıklardır [24].

Türkiye'nin toplam tarımsal alanı yaklaşık 26.350 milyon hektardır. Bunun % 38,4'ü ekili alan, % 44,1'i orman, % 10,4'ü nadas alanı, % 7,1 meyve ve sebze ekili alanıdır. Tahıllar, yağlı tohumlar ve yumrulu ürünler Türkiye'de en yaygın ürünlerdir. Tahıllar Türkiye'nin orta, doğu ve güney bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilmektedir. Tahminen en yüksek atık miktarı buğday ve arpa yetiştiriciliğinden açığa çıkmaktadır. Bununla birlikte mısır ve pamuk yetiştiriciliğinde açığa çıkmaktadır. Türkiye'de yıllık toplam tarımsal atık miktarı yaklaşık olarak 50–65 Mtep'dir.

Türkiye'deki tarla ürünlerinin yıllık toplam ısı değeri yaklaşık olarak 2.28 PJ'dur. Toplam ısı değeri içerisinde payı en fazla olan temel ürünler sırasıyla % 33.4, buğday % 27.6 ve pamuk % 18.1'dir [31].

Bunların yanında Türkiye'de enerji ormancılığı yönünden de ekonomik değeri yüksek ve hızlı büyüyen yerli ağaç türleri arasında, akkavak, titrek kavak, kızılbaş, kızılçam, meşe, dişbudak, fıstık çamı, karaçam, sedir ve servi ağaçlarını saymak olanaklıdır. Bugün için biyogaz üretim potansiyeli olan açık maddeler, kırsal atıklar, yüksek kirlilik içeren endüstriyel atıklar, atık su arıtma tesislerinden biyolojik arıtma süreci sonunda elde edilen çamurlar, katı atıkların organik özellik taşıyan bileşenleri ve bu atıklara benzer özellikteki diğer atıklar şekline sıralanabilir. Bu atıkların biyogaz üretimi için kullanılmasıyla bir yönüyle atık bertarafı gerçekleştirilirken, diğer yönüyle de enerji elde edilmiş olur [24].

Organik bir kaynak niteliğindeki atıklardan gübrenin tezek olarak yakılması ulusal ekonomi için büyük zarardır. Bu bağlamda biyogaz tesislerinin yaygınlaştırılması önemlidir. Biyogaz tesislerinin yanı sıra, şebeke ile bağlantılı çalışan “çöp termik santralleri” ile elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Bir tür biyogaz materyali olan çöpün, çöp termik santralleriyle enerji üretiminde kullanılması, özellikle kentsel çöpün ortadan kaldırılmasıyla birlikte iki tür işlevi içermektedir. Böylelikle çöp yığınlarında açılan özel sondaj kuyuları ile metan gazı elde edilmektedir. Doğal biçimde, çöplerin fermantasyona uğraması sonucunda oluşan metan gazı, çöp yığınlarından sızmaama durumunda patlamalara neden olduğu gibi, atmosfere dağılması durumunda da sera etkisine yol açmaktadır. Metan sondaj kuyuları ile alınan gaz çevre sorunu oluşturmadan, gaz türbinli bir santralde yakıt olarak değerlendirilebilmektedir [24].

#### **3.2.4.4. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli**

Türkiye coğrafi konumu açısından 36-42 N° enlemleri arasında yer almakta ve güneş kuşağı içerisinde bulunmaktadır. Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlıdır. Devlet Meteoroloji işleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ısınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ısınım şiddeti 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir [32].

Türkiye’de güneş enerjisi yaygın olarak evlerin sıcak su gereksiniminin karşılanmasında kullanılmaktadır. Türkiye’nin özellikle Güney ve Ege kıyıları başta olmak üzere tüm bölgelerinde güneş enerjisi kolektörleri halen yoğun olarak su ısıtmak amacıyla kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli, Doğu Karadeniz Bölgesi dışında tüm bölgelerimiz için önemle ele almamız gereken bir büyüklüktedir. Türkiye sahip olduğu bu güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmelidir [24].

### 3.2.4.5. Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Potansiyeli

Hidrojen yakıtı üretiminde kullanılacak olası kaynaklar; hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, deniz dalga enerjisi, jeotermal enerji ve nükleer enerjidir. Yakıt piller, yakıt olarak kullanılan hidrojeni havadaki oksijenle birleştirerek direk olarak izotermal bir işleme elektrik enerjisine çeviren aletlerdir. Mevcut yakıt pilleri hidrojen ve oksijen su oluşturmak üzere fonksiyonlarından faydalanarak elektrik üretmektedirler. Yakıt pillerinin kurulu güçleri 200 kW-25 MW arasında değişmektedir. Türkiye gibi gelişme süresince ve teknolojik geçiş aşamasındaki ülkeler açısından uzun dönemde fotovoltaik güneş–hidrojen sistemi uygun görülebilir. Türkiye, üç tarafı denizlerle kaplı olması, çok sayıda göllerin, akarsuların ve yağışlı bölgelerin bulunmasından dolayı, hidrojen elde edilmesi için yeterli potansiyele sahiptir. Türkiye’nin hidrojen üretimi açısından bir başka potansiyeli ise Karadeniz’in tabanında kimyasal biçimde depolanmış olan hidrojendir. Teknolojik verilere ve Türkiye'nin enerji-ekonomi verilerine göre, 1995-2095 arasında güneş-hidrojen sistemi ile yapılabilecek yakıt üretimi ve bunun fosil yakıtlarla rekabet olanağı, özel bir simülasyon modeli kapsamında bilgisayar çözümleri ile araştırılmıştır. Bu ulusal modelde, hidrojen üretiminin artışı için yavaş ve hızlı olmak üzere iki ayrı seçenek alınmıştır. Her iki seçenekte de 2010-2015 döneminde hidrojen enerjisi maliyetinin fosil enerji maliyetinin altında düşebileceği, ancak yapılabilecek yerli hidrojen üretiminin 2.3 Mtep'in altında kalacağı görülmüştür [33].

## BÖLÜM 4

### RÜZGÂR ENERJİSİ

#### 4.1. RÜZGÂRIN TANIMI

Yeryüzünün farklı bölgelerinin, güneşten gelen enerji sayesinde, dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğimi ve dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeniyle farklı ısınması sonucu meydana gelen basınç ve sıcaklık farkları, rüzgârı oluşturur. Güneş enerjisi yeryüzüne ulaştığı zaman büyük ölçekli atmosfer hareketleri oluşur, aynı zaman da çeşitli etkilerle de yerel değişiklikler meydana gelir. Ekvatorial bölgelerde havanın ısınmasına bağlı olarak, hava yükselmeye baslar, kutuplardaki soğuk hava ise çöker. Ekvatorda yükselen hava tropopoz seviyesinde kuzey ve güney kutba doğru hareket eder. Daha yukarı enlemlerden gelen soğuk hava akımıyla karşılaştığı 30°N ve 30°S enlemlerinde oluşan konverjansa bağlı olarak hava bu enlemlerde alçalmaya baslar. Yer seviyesinde ise meydana gelen subtropikal yüksek basınç alanlarındaki diverjansa bağlı olarak her iki yarım kürede akış kutba ve ekvatora doğru yönelir. Coriolis kuvvetinin saptırıcı etkisiyle 30°N ve 30°S enlemleri arasında kuzey doğulu ve güney doğulu ticaret rüzgârları oluşur. Aynı şekilde 30°N ve 30°S enlemleri ile 60°N ve 60°S enlemleri arasında kutba doğru olan akış batılı akış olarak tanımlanır [34].

Karaların ve denizlerin farklı ısınmaları da hava akımlarına sebep olurlar. Bu hava akımları rüzgâr adını alır. Yeryüzünün topografik yapısı, çeşitli engeller, örneğin binalar ve ağaçlar, rüzgârın farklı hızlarda olmasına neden olurlar. Bu bilgiler doğrultusunda kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

Kuvvetli rüzgâr alanları;

- Kuvvetli basınç gradyanının bulunduğu bölgeler,

- Yüksek ova ve platolar,
- Sürekli inici akış bölgeleri,
- Hakim rüzgâr yönüne paralel vadiler,
- Tepe ve dağ zirveleri,
- Jeostrofik rüzgâr ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri.

Zayıf rüzgâr alanları;

- Hakim rüzgâr yönüne dik vadiler,
- Engebelerle gölgelenmiş arazi,
- Kısa, dar vadi veya kanyonlar,
- Pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlar

Herhangi bir bölgedeki rüzgâr potansiyelinin saptanması ve rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için bu kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir [35].

## 4.2. RÜZGÂR TÜRLERİ

Tüm dinamik hava olayları, atmosferin yer yüzeyine en yakın tabakası olan troposfer tabakası içerisinde meydana gelirler. Rüzgâr türleri, kutuplar ile ekvator arasındaki hava hareketlerine bağlı olan küresel rüzgârlar, coriolis ve merkezkaç kuvvetinin sebep olduğu bölgesel rüzgârlar ve özellikle rüzgârdan enerji üretimi açısından oldukça önemli olan denizler, karalar ve vadiler arasındaki hava akımlarından oluşan yerel rüzgârlar olarak sayılabilir [36].

Yüzey rüzgârları yer yüzeyinden yaklaşık olarak 100 m yükseklikte meydana gelir ve yer yüzeyinden çok etkilenir. Rüzgâr enerjisi üretilirken yüzey rüzgârlarından yararlanılır ve belirli bir alanda hakim rüzgâr yönünü belirlemede çok önemlidir. Yerel rüzgârlar büyük ölçekli rüzgârların oluşmasına katkıda bulunurlar. Büyük ölçekli rüzgârlar zayıf olduklarında yerel rüzgârlar, rüzgârın türünü belirler. Bunlar dağ, vadi ile deniz ve kara meltemleri yerel rüzgârların önemlileridir [37].



Literatürde rüzgârlar farklı ölçeklerde incelenir ve değerlendirilir. Bunlar:

- Makro: Büyük ölçekli hava modelleri( kıtalar ya da kıtaların bir parçası)
- Mezo: Ülke veya bölge gibi daha küçük alanlar
- Yerel: Sınırlandırılmış bir bölge veya bir alan, ova, plato, sahil şeridi ya da şehir alanı gibi
- Mikro: Çok küçük ölçeklerde daha yerel ve daha fazla sıklıkta en iyi biçimde yerleştirilmiş yerel anemometre kayıtları ile tespit edilebilir.

Yukarıda bahsi geçen farklı ölçekler kullanım alanlarına göre farklı şekillerde değerlendirilir. Basın ve havayolları, makro ve mezo ölçeklerdeki değerlendirmelere göre inceleme yapmakta, rüzgâr enerjisi ile ilgili çalışmalarda ise yerel ve özellikle mikro ölçekteki değerlendirmeler kullanılmaktadır. Bu ölçekteki veriler, türbin tasarımı ve mikro-konuşlandırma için gereklidir. Türbinlerin teker teker konuşlandırılmasının verimi bu verilere bağlıdır [38].

### **4.3. RÜZGÂR ENERJİSİ**

#### **4.3.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi**

Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerjiler arasındaki en gelişmiş ve ticari acidan en elverişli enerji türüdür. Tamamıyla doğa ile uyumlu olup hem çevreye zarar vermeyen hem de tükenme ihtimali olmayan bir enerji kaynağıdır. Çevresel avantajları açısından da pek çok ülke, resmi teşviklerle rüzgâr enerjisini desteklemektedirler. Tüm bunların amacı, pazarı harekete geçirmek, maliyetleri düşürmek ve resmi teşviklerle şu an fosil yakıtların sahip olduğu haksız üstünlüğü ortadan kaldırmaktır. Çeşitli ülkelerde pazarı harekete geçirmeye yönelik farklı politikalar izlenilmektedir. Rüzgâr teknolojisinin araştırma ve geliştirme girişimlerine verilecek destek bu teknolojinin elektrik enerjisi pazarında adil olarak rekabet edebilmesi ve son yıllardaki başarısını sürdürmesi için son derece önemlidir [39].

Dünyada rüzgâr santrallerinin kurulu gücü hızlı bir artış göstermektedir. 1995–2001 yılları arasında rüzgâr türbini satışlarında yıllık %40'luk bir büyüme gerçekleşmiştir.

1990 yılında dünyanın kurulu gücü 2160 MW iken 1994 yılında 3488 MW'a, 1995 yılında 4778 MW'a, 1996 yılında 6070 MW'a, 1997 yılında 7636 MW'a, 1998 yılında 10153 MW'a, 1999 yılında 13932 MW'a ve 2000 yılında 18449 MW'a çıkmıştır. Dünya rüzgâr enerjisinin toplam kurulu gücünün yaklaşık % 74'u Avrupa kıtasında, % 15'i Amerika kıtasında, % 9'u Asya kıtasında ve kalan yüzdelerinde diğer kıtalarda bulunan dünya ülkelerindedir.

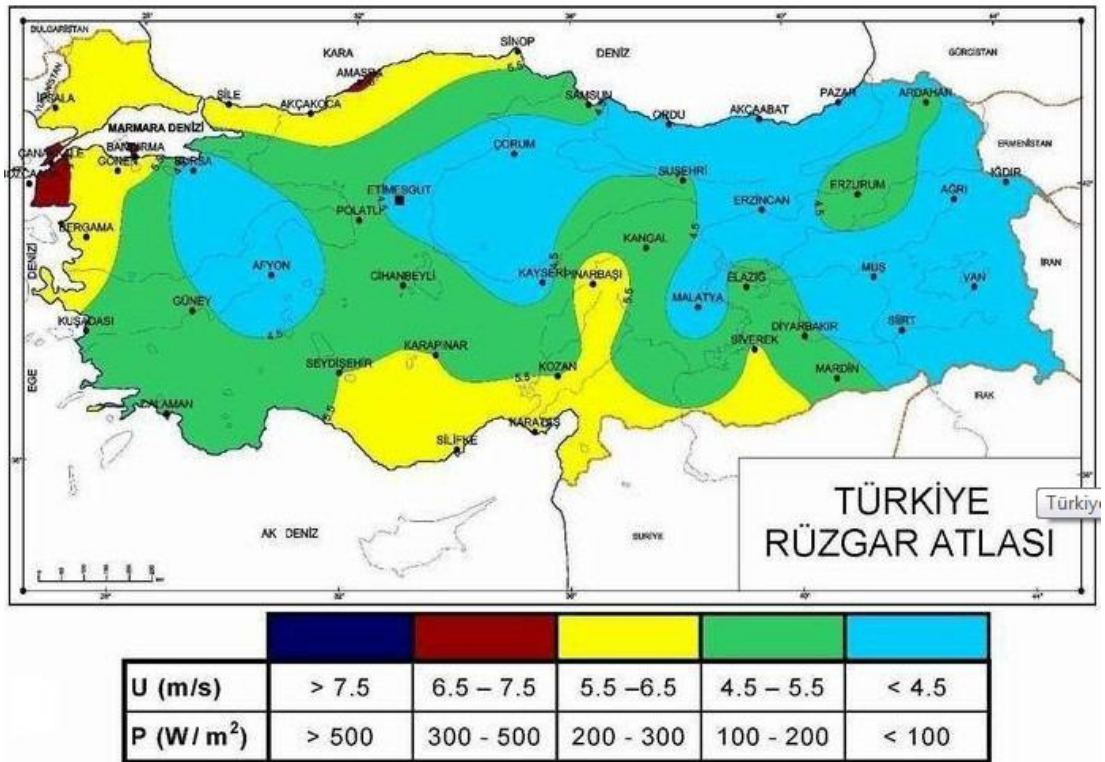
Avrupa'da en büyük kurulu güç Almanya'da olup, onu İspanya, Danimarka, Hollanda, İngiltere, İtalya, Yunanistan ve İsveç izlemektedir. Amerika kıtasında en büyük kurulu güç Amerika Birleşik Devletleri'nde olup onu çok geriden Kanada takip etmektedir. Asya'da Hindistan, Çin ve Japonya rüzgâr santrallerine önem vermektedir.

Son on beş yıldır Amerika'da yeni bir rüzgâr endüstrisi doğmuştur. 1982–1992 yılları arası California'da yaklaşık 15000 rüzgâr türbini kurulmuştur. 370 MW gücündeki Kenetech Rüzgâr Çiftliği dünyanın en büyük rüzgâr santralidir. 8160 hektar alan kaplayan bu çiftlikte 100 kW 'lık 3500 adet ve 300–400 kW 'lık 40 adet türbin bulunmaktadır. Ancak kısa zaman da bu türbinlerden daha modernleri geliştirilmiştir. Avrupa'da rüzgâr teknolojisi hızla gelişmektedir. 1995 yılında yeni türbinler 600 kW güçte iken bugün geliştirilen türbinlerin gücü 2 MW' tır. Almanya yaptığı atakla 1998 sonunda rüzgâr kurulu gücünü 2875 MW'a çıkarmış, kurulu gücü 1820 MW 'ta kalan ABD'yi geçmiş ve birinciliği elde etmiştir.

Avrupa'da şu anda 12 MW 'lık deniz ustu rüzgâr santrali çalışır durumdadır ve deniz üstü kurulu gücün kısa zamanda 180 MW 'a çıkarılması planlanmıştır. 2030 yılında rüzgâr kurulu gücünün deniz ustu payının % 25'den az olmayacağı beklenmektedir. Teknolojik gelişimle rüzgâr türbinlerinin ünite güçleri arttırılırken son beş yıl içerisinde fiyatları düşürülmüştür. Karada kurulan türbinlerin birim fiyatları 1600-1800 dolar/kW'a kadar çıkabilmekte ise de ABD iç piyasasında 750 dolar/kW düzeyine inildiği belirtilmektedir [39].

### 4.3.2. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

1973–1978 yılları arasındaki petrol krizinden sonra Tarım Bakanlığı tarafından yapılan kırsal enerji makineleri envanterinde kullanılıp kullanılmadığına bakılmaksızın, 871 adet su çıkarma ve 23 adet elektrik üretim amaçlı rüzgâr türbini olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu rüzgâr makineleri güçleri 1 kW’ın altında güce sahip olup yerli olanları ilkel yapıydı. Türkiye’de rüzgâr enerjisi üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar 1960’larda Ankara Üniversitesi, 1970’lerde Ege Üniversitesi daha sonraki yıllarda ODTÜ’de yapılmış olup, 1980’li yıllarda TÜB\_TAK-MAM’da bünyesinde bazı çalışmalar yapılmıştır. MAM’da ilk rüzgâr atlası çalışması başlatılmıştır. Gebze-Özbek tepede pompa çalıştırma ve elektrik üretim amaçlı çeşitli rüzgâr türbinleri kurularak denenmiştir [40].



Şekil 4.1. Türkiye rüzgâr atlası [41].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na bağlı Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), 1981 yılından bu yana, rüzgâr enerjisi çalışmaları yapmaktadır. 1989 yılında bu kurumda Rüzgâr Enerjisi Şube Müdürlüğü oluşturulmuştur. Türkiye rüzgâr enerjisi

potansiyelinin değerlendirilmesi ve tespit edilmesi amacıyla Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü istasyonlarında yapılmış uzun dönemli ölçümlere dayalı istatistikler, EİE idaresi tarafından 1984'de tamamlanan "Türkiye Rüzgâr Enerjisi Doğal Potansiyeli" çalışmasında değerlendirilmiştir [42].

Son üç yıldır, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin çabaları ve ETKB ile Elektrik İşleri Etüt İdaresinin (EİEİ) TUREB çalışmalarına katılımı sonrası Türkiye'deki rüzgâr enerjisi potansiyeli kabul görmeye başlamıştır. Türkiye'de rüzgâr enerjisinin gelişiminin önündeki sorunları belirlemek üzere İber otel Sarıgerme Park Ortaca' da Kocaeli Üniversitesi Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri Araştırma Birimi tarafından 3 adet Uluslararası Rüzgâr Enerjisi Atölye Çalışması düzenlenmiştir. Bu atölye çalışmalarına katılanlar daha sonra uzun süreli ortaklıklar kurmuş ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi kullanımı çalışmaları yaygınlaşmıştır. Kocaeli Üniversitesi YEKAB birimi tarafından İstanbul'da koordinasyonu ve tasarımı yapılan 2 adet uluslararası enerji teknolojileri fuarı kamuoyu ve karar vericilere modern rüzgâr türbinlerinin gelişmişliğini göstermiştir [43].

#### **4.4. RÜZGÂR ENERJİSİ ÖZELLİKLERİ VE KULLANIMI**

Güneşin yeryüzünün her yerini eşit olarak ısıtmaması sonucunda Rüzgâr denen hava akımları oluşmaktadır. Rüzgâr hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ölçülmektedir. Rüzgârın hızı yüksekliğe göre değişmektedir ve enerjisi de hızının küpü ile doğru orantılıdır. Rüzgârın hızı km/h ve m/sn gibi birimler ile ölçülmektedir. Enerji üretimi için yapılan çalışmalarda m/sn birimi kullanılmaktadır [44].

Rüzgârın oluşumuna farklı sıcaklık dağılımı neden olduğu için coğrafî koşullar sıcaklık dağılımını etkiler. Okyanus veya denize kıyısı olan bölgelerde sıcaklık farkı yüksek olduğu için Rüzgâr potansiyeli daha da yüksektir [45].

#### **4.4.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları**

Rüzgâr enerjisi kullanıcılara çeşitli avantajlar sağlarken bazı sakıncalar da söz konusu olabilmektedir.

##### **4.4.1.1. Rüzgâr Enerjisinin Avantajları**

Temizdir, çevresel zararı ve yakıt parası olmayan bir enerjidir. Sürekli bir enerji kaynağıdır dışa bağımlılığı yoktur. Sadece yerel imkanlarla enerji üretmek mümkündür. Bu avantajı arz güvenliğini sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisinde taşıma masrafları yoktur. Doğadaki Rüzgâr direkt olarak kullanılabilir [46].

Rüzgâr var olduğu sürece, Rüzgâr türbinleri üzerinde yapılan çalışmaların da bir sonu olmayacaktır. Bu sayede Rüzgâr enerjisinden faydalanma teknikleri her geçen gün gelişmeye devam edecektir [47].

Uzun dönem işletme maliyetleri diğer tüm enerji kaynaklarının içinde en az olanıdır. Sadece periyodik bakımların yapılması ile 20–30 yıl süreyle kullanılabilir. Rüzgâr türbinlerinin yeri belirlendikten sonra inşaatın başlaması ve türbinin üretime geçmesi üç ay gibi kısa bir süre almaktadır. Rüzgâr türbini uygulamaları başarılı bir geçmişe sahiptir. Diğer enerji üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında hem daha güvenli hem de tasfiyesi çok daha kolaydır [48].

Fosil yakıtların yarattığı çevre kirliliği problemi, Rüzgâr enerjisinde yoktur. Rüzgâr türbinleri yakıt olarak Rüzgârı kullandıkları için atmosfere zehirli gazlar vermezler. Bu özelliğinin yanı sıra, Rüzgâr türbinlerinin yakıtının Rüzgâr olması nedeniyle, herhangi bir hammadde için dışa bağımlılık söz konusu değildir. Bu durum işlenecek kaynak maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin uzun ömürlü oluşu kuruluş, işletme ve bakım maliyetlerinin uzun bir zamana yayılması anlamında da avantaj sağlamaktadır [49].

#### **4.4.1.2. Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları**

Rüzgâr hızının değişken olması, en büyük sakıncalardan birisidir. Yeryüzünde Rüzgâr hızının sabit olduğu çok az yer vardır. Bu yüzden istenilen her alana Rüzgâr santrali kurulamaz. Aslında Rüzgârın bu değişkenliği enerjinin depolanması yoluyla aşılabılır. Ancak en sağlıklı yol elde edilen enerjiyi direkt olarak ana güç şebekesine vermektir [47].

Rüzgâr türbinlerinin kuruluş maliyeti yüksektir. Bu durumda çevresel ve sosyal faktörler dikkate alınmalıdır. Her ne kadar türbin kuruluş maliyetleri yüksek olsa da, temiz ve doğal bir enerji kaynağı olması nedeniyle Rüzgâr enerjisinin kullanımının yaygınlaştırılması önemlidir. Her geçen gün ilerleyen teknoloji ile birlikte türbin fiyatları günden güne düşmektedir. Zamanla türbin fiyatlarındaki bu iyileşmenin daha da artması öngörülmektedir [49].

Rüzgâr santrali kurulumu için gerekli ekipmanların birçoğu, Rüzgâr türbini üreticisi ülkelerden alınmaktadır. Bu nedenle Rüzgâr türbinlerinin kuruluş maliyeti yüksektir. Bu durumun aşılması için hükümetlerin yerli sanayinin kurulmasını teşvik etmesi gerekmektedir [50].

Rüzgâr enerjisinin en önemli dezavantajı Rüzgâr hızının sabit olmayışıdır. Bu durum uzun süreli ve sağlıklı yapılan ölçümlerle büyük ölçüde aşılabılır. Rüzgâr hızının tam olarak sabitlenmese bile genellikle aynı değerlerde seyrettiği alanlara Rüzgâr türbinleri kurulabilir. Rüzgâr ölçümlerinin doğru yapılması ve yerli türbin sanayinin yaratılması ile Rüzgâr enerjisinin en önemli dezavantajları avantaja çevrilebilmektedir [49].

#### **4.4.2. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları**

Rüzgâr türbin teknolojisindeki hızlı gelişme ve elektrik üretim maliyetinin alışılmış güç santralleri ile rekabet edebilecek seviyelere gelmesi, Rüzgâr enerji sistemlerinin yaygınlaşmasını sağlamaktadır [49].

Rüzgâr enerjisi; su pompalama, çeşitli ürünleri kesme-biçme gibi mekanik enerjiye ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılabilir. Ticari olarak ise en büyük kullanım alanı Rüzgâr türbinleri ile elektrik üretimidir [51].

## 4.5. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

### 4.5.1. Eksen Farkına Göre Rüzgâr Türbinleri

#### 4.5.1.1. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu tür türbinlerde türbin mili dikey eksenseldir ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi başlıca türlerdir. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgâr türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane kanat vardır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların iç bükey ve dış bükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgâr türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgârın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri her istikametlidirler ve değişen rüzgâr yönlerinde dönerler. Böylece rüzgârı her bir yönden kabul ederler. Dönüşün dikey eksenli, sürücünün toprak seviyesine dahi yerleştirilmesine izin vermektedir. Bu tipteki rüzgâr türbinlerinin güç katsayısı 0,15'ten azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler [52].



Şekil 4.2. Dikey eksenli rüzgâr türbini.

#### **4.5.1.2. Darrieus Rüzgâr Türbinleri**

1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. 1970 ve 1980'lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur. İlk hareket için Savonius RT veya bir tahrik motoru gerekmektedir [1].

#### **4.5.1.3. H-Darrieus Rüzgâr Türbinleri**

Dikey eksenli en önemli RT'lerden biridir. Darrieus RT'nin geliştirilmesiyle meydana gelen daha karmaşık tipte bir türbinidir. Darrieus RT'den iki önemli farkla ayrılır. Bunlar; aerodinamik profili düzdür ve kanatlara pitch kontrol uygulanır [53].

Bu türbinlerinde jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez böylece kule masrafı olmaz. Türbini rüzgâr yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur. Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır. Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Bu tip türbinler yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgâr hızları düşüktür. Dolayısıyla verimi de düşük olmaktadır. Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir. Bunun için de ilk hareket motoruna ihtiyacı vardır. Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir [52].

#### **4.5.1.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri**

Bu türbinlerde; dönme eksenli rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'dir. YERT genel olarak yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki



engellerden 10m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgâr hızının, rotor kanadı üç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat üç hız oranı ( $\lambda$ ) denir. Eğer;

- $\lambda= 1-5$  Çok kanatlı rotor,
- $\lambda= 6-8$  Üç kanatlı rotor,
- $\lambda= 9-15$  İki kanatlı rotor,
- $\lambda>15$  Tek kanatlı rotor kullanılır.

YERT, farklı sayıda rotor kanadına sahip olan ve rüzgârı önden alan veya rüzgârı arkadan alan sistemler olarak da çeşitlilik gösterirler. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgârı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kotu tarafı ise, türbinin sürekli rüzgâra bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır. Rüzgârı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine gerek yoktur. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat büyük çaplı türbinlerde rüzgârın arkadan gelmesi tercih edilmez. Bunun nedeni ise; serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler. Yatay eksenli türbinlerin bir başka sınıflandırması ise, dönme hızlarına göre. Yavaş hızlarda çalışan rüzgâr türbinleri ve yüksek hızlarda çalışan rüzgâr türbinleri adı altında iki gruba ayrılırlar. [52].



Şekil 4.3. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (Bozcaada, Bore).

#### **4.5.2. Rüzgârı Alış Yönlerine Göre Rüzgâr Türbinleri**

##### **4.5.2.1. Rüzgârı Arkadan Alan Makineler**

Bu makinelerin rotorları kule arkasına konulur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgâra dönmek için “Yaw” mekanizmasına gerek duymayışlarıdır. Eğer nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa, nacelle rüzgârı pasif olarak izler. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip olmasıdır. Bu, hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür. Böylece bu makinelerin avantajları; önden rüzgârlı makinelere göre daha hafif yapılması sonucu kule yükünün azalmasıdır. Ancak, bu tur türbinlerde meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgârlı makinelerden daha çok zarar verir [1].

#### **4.5.2.2. Rüzgârı Önden Alan Makineler**

Yıllardır yaygın olarak kullanılan bu makinelerde rotor yüzü rüzgâra dönüktür. En önemli üstünlüğü, yukarıda da değindiğimiz gibi kulenin arkasında olacak rüzgâr gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgâr kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Bu nedenle rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların sert yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgârlı makineler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için “Yaw” mekanizmasına gerek duyarlar [1].

#### **Tek Kanatlı Rüzgâr Türbinleri**

Tek kanatlı RT'nin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için kanat bağlantı noktaları çok iyi yapılmalıdır. Bir kanatlı RT'nin kanat uç hızı, üç kanatlı RT ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir. Bu da çalışma esnasında aşırı gürültüye sebebiyet vermektedir [1].

#### **Çift Kanatlı Rüzgâr Türbinleri**

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ila 100m rotor çaplı ölçülerde RT'ler tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari RT'lerden sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat maalesef iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç, maliyetin daha fazla artmasına sebep olmaktadır. Kanat bağlantı noktalarının titreşimi azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir.

Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Bu RT'nin gurultu seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgâr hızlarında (3m/sn) çalıştırılması dezavantajdır. Günümüzde iki kanatlı rotor, şimdi birkaç ünitedir ve en az bir an için artan piyasaya dikkat edecek olursak iki kanatlı rotora hiçbir eğilim bulunmamaktadır [1].

### **Üç Kanatlı Rüzgâr Türbinleri**

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, Kanat bağlantı göbeğinin içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70m/sn altında olduğundan gurultunun düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük güçlü RT'lerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde donen rotorun devir sayısını 1/n oranında arttıran dişliler kullanılır ve "Cut in" olarak adlandırılan hız değerine ulaşınca kadar, jeneratör boşa çalıştırılır [1].

### **Çok Kanatlı Rüzgâr Türbinleri**

Çok Kanatlı RT'ler rüzgârgüllerinin ilk örnekleridir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı RT'ler düşük hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe artım gösterir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır ve otomobillerde uygulama alanı bulan jeneratörler kullanılır. Rüzgârgülleri, rüzgârgülü pervane düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de, rüzgârgülü yönlendiricisi taşımaktadırlar [53].

### 4.5.3. Rüzgâr Hızına Göre Rüzgâr Türbinleri

#### 4.5.3.1. Düşük Hızlarda Çalışan Rüzgâr Türbinleri

İlk olarak 1870'li yıllarda ABD'de çok kanatlı düşük hızlarda çalışan türbinler üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde 12 ile 24 adet arasında değişen kanatlar, rotorun neredeyse tüm yüzeyini kaplar. Yerleştirilen kuyruk kanadı dümen işlevini görür. Genellikle bu tip rüzgâr türbinlerinin çapı 5 ile 8 m arasında değişir. Bu tipin en büyük örneği ABD'de inşa edilmiş olup, çapı 15 m'dir. Yavaş çalışan rüzgâr türbinleri 2-3 m/s arası rüzgâr hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlarlar. Bu türbinlerin özellikleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Genellikle hızları 3-7 m/s arasında değişen rüzgârlarda kullanılırlar.
- Elektrik üretimi için verimleri düşüktür.
- Çap büyüdükçe ağırlık artacağından, bu türbinleri kurmak kolay değildir.
- Bu tipteki türbinler, daha çok su pompalama işi için idealdirler. Genellikle pistonlu pompalarda kullanılırlar [52].

#### 4.5.3.2. Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgâr Türbinleri

Yüksek hızlarda çalışan bu tip rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı 1 ile 4 adet arasındadır. Düşük hızlarda çalışan çok kanatlı rüzgâr türbinlerinden çok daha fazla hafiftirler. İki kanatlı türbinler, üç kanatlılara göre %2-3 daha az verimlidir. Tek kanatlı türbinler ise, iki kanatlı türbinlerden %6 daha az verimlidirler. Ayrıca tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır. Yüksek rüzgâr hızlarında çalışan bu tip türbinlerde kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Söz konusu türbinlerin yavaş hızlarda çalışan rüzgâr türbinlerine göre avantajları şunlardır;

- Düşük kanat sayısı; bu tipteki türbinlerin fiyatını ve ağırlığını önemli ölçüde azaltır.

- Ani rüzgâr patlamalarından kaynaklanan basınç değişimlerinden az etkilenirler.
- Çok yüksek hızlarda çalışan kanat koruyucu sistemleri, bu tip türbinlerde daha ucuzdur.
- Yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amaçlı kullanılan rüzgâr türbinlerinin büyük çoğunluğu bu tip türbinlerdir [52].

#### 4.5.4. Güç Kontrol Sistemine Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, nominal gücü vermek üzere tasarlandıkları hızların (nominal hız) üzerinde, türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu sistemler, türbin nominal hızı astıktan sonra palaların aerodinamik performansını düşürerek jeneratörde oluşabilecek aşırı yüklemeyi önlerler. Bu amaçla kullanılabilen 5 temel tasarımdan söz edilebilir. Bunlar kullanım yaygınlıklarına göre:

- Pasif Stall Kontrolü
- Aktif Pitch Kontrolü
- Aktif Stall Kontrolü
- Sapma Kontrolü
- Pasif Pitch Kontrolü

Bunlardan sapma kontrollü ve pasif pitch kontrollü olan tasarımlar geniş uygulama alanı bulamadılar. Sapma kontrollü türbinler, türbinlerin çoğunda, türbini rüzgâr yönüne çevirmek için mevcut bulunan sapma kontrollü sistemini güç kontrolü için de kullanma düşüncesine dayanıyor. Bu sistemler, rüzgâr tasarım hızının üzerine çıktığında türbini rüzgâr akımının doğrultusundan çıkartmak böylece türbinin güç katsayısını düşürmek prensibine dayanırlar. Fakat bu sistem yeterli sapma hızlarına ulaşmanın içerdiği zorluklar ve pala ile makine dairesinin dönüş esnasında yarattığı momentten dolayı yaygın bir sistem değildir. Bu tür sistemlerde, sapma özellikle ilk 10° civarında önemli bir güç katsayısı düşüşü sağlayamamaktadır, bu sebeple bu değer üzerine çıkmak için geçen sürede aşırı yüklenme ihtimali artmaktadır. Ancak bu dezavantajlarına rağmen, bu tasarım İtalya'da 60 m çaplı 8°/sn'lik yüksek dönme hızına sahip bir türbinde kullanılmıştır [54].

Pasif pitch kontrolünde ise temel düşünce, palayı yüksek hızlarda burularak istenen pitch acısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde güç kontrolü sağlamaktır. Prensip mantıklı ve basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zor, çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile pala üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmayabilir [1]. Bu iki sistem yaygın bir kullanıma sahip değildir. Yaygın olarak diğer üç sistem kullanılmaktadır.

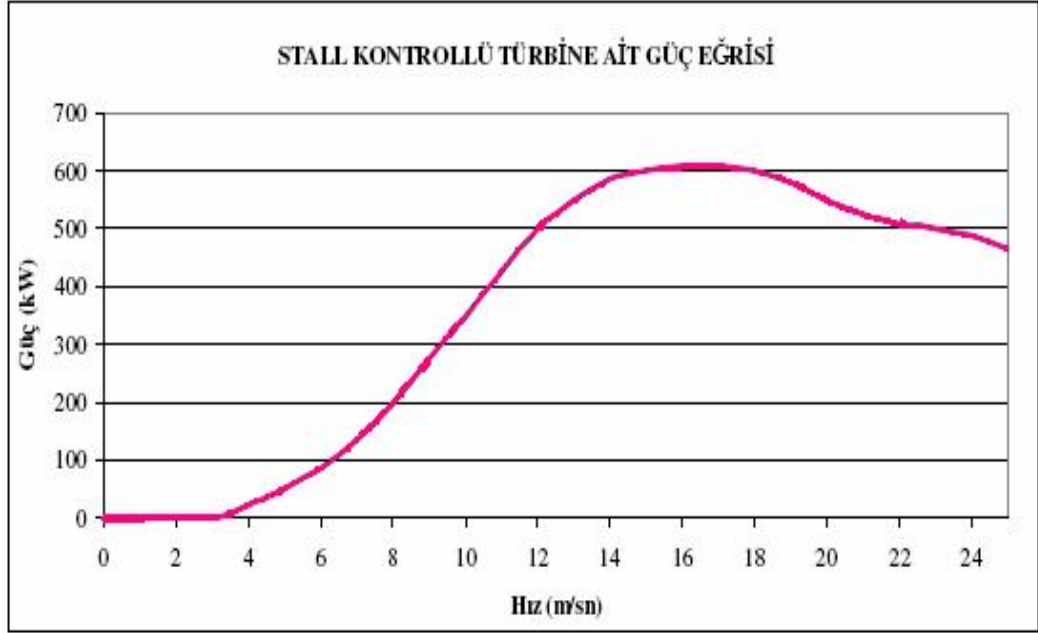
#### **4.5.4.1. Stall Kontrollü Türbinler**

Stall kontrollü türbinlere geçmeden önce stall olayını kısaca açıklamak gerekir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, normalde rüzgâr kanat yüzeyini her iki taraftan yalayarak geçer. Özellikle kanat profilinin üst yüzeyinde bu durum önem kazanmaktadır. Akış çizgilerinde herhangi bir kopma olsun istenmez. Profilin üst yüzeyinde hava akış hızı alt kısımdaki akış hızından daha yüksektir. Bu durum basınç farkı doğurur ve kanat harekete geçer. Ancak rüzgâr şiddeti fazla olduğunda hücum acısı (angle of attack) artırılarak profilin üst yüzeyinde vorteks oluşumu sağlanır. Akım çizgileri yüzeyden ayrılır. Ayrılma olan bölgede basınç aniden düşer. Kanat rüzgâra direnir. Böylece kanat kendisine ani frenleme yapar. Çok yüksek hızlara çıkamaz. Türbinin zarar görmesi önlenmiş olur.

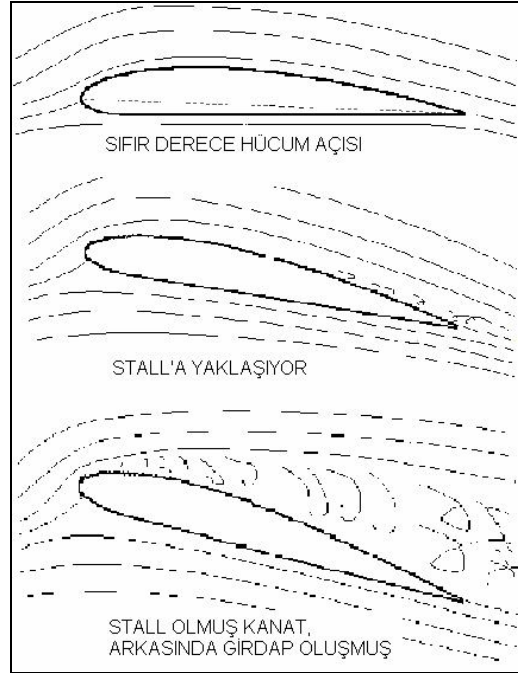
Stall kontrollü türbinler, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş palalara sahiptir. Bu sistem, rüzgâr hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve palanın stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlarlar. Pala geometrisi, rüzgâr nominal hızın üzerindeki hızlarda arttıkça, performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Pala kok bölgesinden başlayarak stall etkisine girer, bu şekilde tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yükleme sebebiyle türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenmiş olur.

Stall kontrollü sistemler nominal hızın üzerindeki hızlarda, pitch kontrollü türbinler gibi sabit bir güç seviyesini koruyamamaktadırlar, bu sebeple nominal hız üzerinde enerji üretimi pitch kontrollü türbinlerden düşüktür. Stall kontrollü türbinlerin temel avantajı, rotorda hareketli parçalara sahip olmamaları ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu türbinler sadece türbinlerin çalıştırılması ve

durdurulması için kontrole ihtiyaç duyarlar. 600 kW'lık Bonus Mk IV Türbinine ait veriler kullanılarak oluşturulmuş, stall kontrollü bir türbine ait güç eğrisi Şekil 1.3.'te görülmektedir [55].



Şekil 4.4. 600 Kw Stall kontrollü türbine ait güç eğrisi [56].

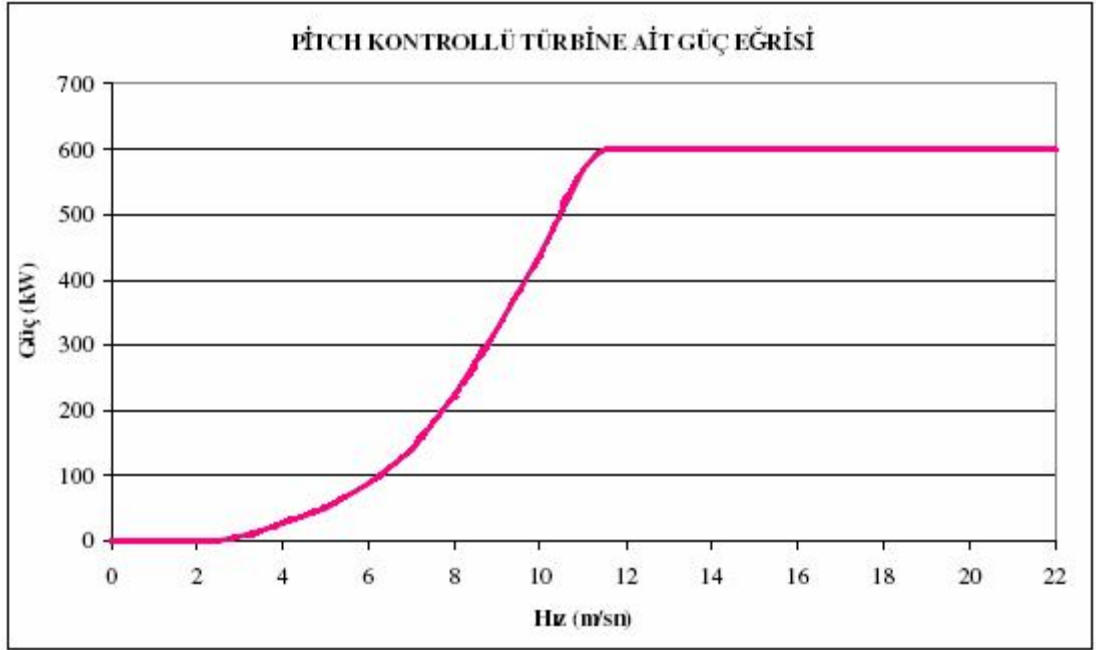


Şekil 4.5. Stall oluşumu [57].



#### 4.5.4.2. Pitch Kontrollü Türbinler

Pitch kontrollü türbinlerde palalar, stall kontrollü olanların aksine göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Pala, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgâr hızına göre eksenini etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar. Ancak stall etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgârlara karşı hassastırlar. Şekil 4.4'te pitch kontrollü 600 kW'lık bir türbin olan Dewind D-4'e ait verilerle oluşturulmuş güç eğrisi görülmektedir [55].



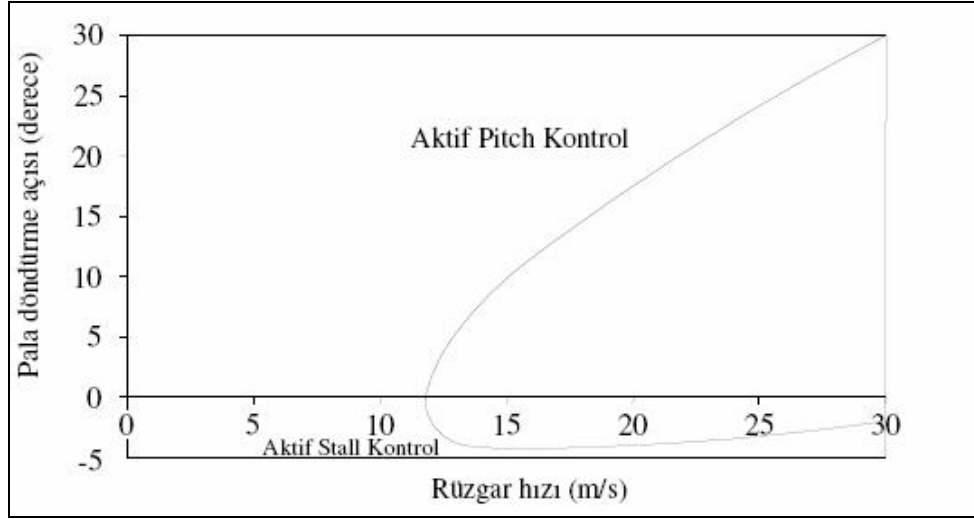
Şekil 4.6. 600 Kw Pitch kontrollü türbine ait güç eğrisi [58].

Pitch kontrol mekanizmasının kullanımı farklılıklar gösterebilir. Sistem, bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir ya da sistemde aşınmayı azaltmak için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir. Bu sistemler MW sınıfı türbinlerde daha yaygın olarak kullanılmakla birlikte, 600 kW sınıfı türbinlerde de kullanılmaktadır. Pitch kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle

yüksek hızlarda yapısal sorunlar yaşamaya, sabit palaya sahip stall kontrollü türbinlere oranla daha eğilimlidirler [1].

#### 4.5.4.3. Aktif Stall Kontrollü Türbinler

Aktif stall kontrolü, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarımıdır. Bu sistemde de pitch kontrollü türbine benzer şekilde güç kontrolü için pala, eksenini etrafında döndürülerek nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır, fakat dönüş yönü pitch kontrolündekinin tersidir. Pitch kontrollü türbin, nominal hızın üzerine çıktığında palayı hücum acısını düşürecek şekilde dondurulurken, aktif stall kontrollü bir türbin palayı ters yönde çevirip, türbini stall etkisine sokar. Aktif stall kontrollü türbinin güç eğrisi pitch kontrollü türbine benzemektedir [1]. Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinler için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması Şekil 6.6.'da görülebilir.



Şekil 4.7. Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması [54].

Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi, bu tasarımda güç kontrolü için gerekli pala döndürme açıları, aktif pitch kontrolüne göre oldukça düşüktür. Bu sayede türbin rüzgâr hızındaki değişimlere daha hızlı yanıt verebilir. Ayrıca türbin nominal hızın üzerinde stall etkisine girmiş olacağından, ani rüzgârlara karşı hassasiyeti daha düşük olacaktır.

#### **4.5.5. Rotor Hızına Göre Türbinler**

##### **4.5.5.1. Sabit Hızlı Türbinler**

Sabit hızlı türbinler, sabit devirde dönerler ve sabit güç üretirler. Bu sistemin tasarımı ve uygulaması daha kolaydır. Şebeke bağlantılı pek çok rüzgâr türbininde kullanılmıştır. Ancak sadece tek hızda döndükleri ve buna bağlı olarak sadece belirli bir rüzgâr hızında ve civarında en verimli şekilde çalışmak üzere tasarlandıkları için bu nominal hızdan uzaklaştıkça verimleri düşer [1].

##### **4.5.5.2. İki Hızlı Türbinler**

Bu türbinler iki farklı hızda çalışabilmektedir. Bu türbinlerde önceleri iki farklı jeneratör kullanılmakta iken artık tek jeneratör kullanılmaktadır. Bu jeneratörün kutup sayısı (4/6) değiştirilerek, jeneratörün senkron hızı (genellikle 1000/1500 dev/dk) ayarlanabilmektedir. İki hızlı türbinler, düşük hızlarda üç hız oranına göre ayarlama yaparak verimi yükseltmektedir. Fakat bu sistemler jeneratör kutupları arasındaki geçiş sırasında oluşabilecek akım yükselmesi gibi sorunlara karşı önlem almayı gerektirmektedir. İki hızlı türbinler, dünya genelinde en yaygın kullanılan sistemlerdir, çünkü sabit hızlı türbinler gibi daha basit mekanizmalardır ve onlara oranla enerji üretiminde artış sağlarlar [1].

##### **4.5.5.3. Değişken Hızlı Türbinler**

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin temel avantajı, geniş bir rüzgâr hızı aralığında optimum üç hız oranında çalışabilmeleri, böylece rotor verimliliğini yükseltip daha fazla enerji elde edilmesini sağlamalarıdır. Bu türbinler genel olarak, birlikte kullanıldıkları pitch sistemi ile birlikte nominal hızdan çok düşük hızlarda dahi yüksek verimlilikle çalışabilirler. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgâr hızlarında ve düşük devirlerde çalıştıkları için gürültü konusunda da avantaj sağlarlar. Değişken hızlı türbinlerde daha farklı jeneratör kullanılması gerekmektedir. Ayrıca gelişmiş bir güç elektroniği uygulaması gerektirmektedir. Bunlar maliyeti yükseltmektedir. O yüzden

büyük ölçekli santrallerin kurulmasında kullanılırlarsa optimum bir noktada bu türbinlerden faydalanılabilir [1].

#### **4.5.6. Kullanım Yerine Göre Türbinler**

##### **4.5.6.1. Şebeke Bağlantılı Rüzgâr Türbinleri**

Rüzgâr enerjisi çok kesintili bir enerji kaynağıdır. Bugün kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi rüzgâr enerjisi, elektrik enerjisine çevrilerek şebekeye verilmeden önce çeşitli kademelerden geçmektedir. Şebeke bağlantılı rüzgâr türbinleri yüksek rüzgâr hızlarında, yüksek devir sağlamak için 2-3 kanatlı yapılmaktadır. Su pompalamak için kurulan rüzgâr türbinleri ise, çok kanatlı olduğu için düşük devir sağlamaktadır. Şebeke bağlantılı rüzgâr santralleri küçük ölçekli ihtiyaçları karşılayabileceği gibi, belirli bir yerde çok sayıda şebekeye elektrik sağlamak amacıyla da kurulurlar. Günümüzün büyük güçlü rüzgâr santralleri elektrik şebekesine bağlı ve birden fazla türbin içeren rüzgâr çiftlikleri biçimindedir. Merkezi elektrik şebekesine elektrik veren rüzgâr türbinleri, uygulamada en çok rastlanan sistemlerdir. Birbirine bağlanmış çok sayıda rüzgâr türbini yerel dağıtım şebekesini besler ve yerel tüketici firmalara da bu elektrik satılabilir. Bu tür rüzgâr çiftliklerinden üretilen elektriğin kWh maliyeti 4-7 cent'e kadar düşürülebilir. Bunun dışında rüzgâr türbinleri genel elektrik şebekesine bağlı olan meskenlere, işyerlerine ve çiftliklere elektrik vermek üzere tesis edilirler. Rüzgâr gücünün düşük olduğu zamanlarda elektrik genel şebekeden satın alınır. Rüzgâr türbinleri fazla güç ürettiğinde ise elektrik genel şebekeye verilir.

Üretilen elektrik enerjisinin türbin çıkışından itibaren son kullanıcı olan tüketicilere ulaştırılmasında iletim hatlarına gereksinim duyulur. İletim hatlarının yanı sıra üretilen elektrik enerjisinin kullanıcılara iletimi sırasında trafolar sayesinde üretilen gerilimin yükseltilerek iletimi sağlanır. Bu sayede iletim esnasında oluşacak kayıplar en aza indirgenmiş olur. Tüketicilere gelindiğinde elektrik enerjisi tekrar trafolar sayesinde kullanılabilir seviye olan 220 V'a düşürülür. Bilindiği gibi iletim esnasında kullanılan trafolar, iletim hatları ve direkler birer maliyettir. İletim maliyetlerini en aza indirmek için rüzgâr türbininin kurulduğu yerin elektrik

sağlayacağı bölgeye uzak olmaması gerekir. Uzaklık iletim maliyeti ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. İletim esnasında kullanılan iletkenlerin kalitesi de maliyeti üzerinde rol oynamaktadır. Rüzgâr türbinleri, çoğu gelişmiş ülkede basit sigortalı ayırıcılar ve her bir türbin için bir trafo ile şebekeye bağlanmakta ve basında eleman bulunmadan işletilebilmektedir. Türbinler için bilgisayarlı bir kontrol sistemi gerekmektedir. Arıza çıktığında uzaktan sinyal ile müdahale edilebilmektedir. Ülkemizde ise, trafoları, türbinleri ve bağlantı kablolarını korumak için kesici ve ayırıcı gibi ilave teçhizat ve kablo arızalarına karşı ring sisteminin kullanılması şart koşulmaktadır [59].

#### **4.5.6.2. Şebeke Bağlantısız Rüzgâr Türbinleri**

Bu tür rüzgâr jeneratörleri genellikle üç kanatlı, transmisyon sistemi, DC jeneratör, yöneltici kuyruk ve fren sisteminden oluşmaktadır. Makine daha çok direk tipi kule üzerine yerleştirilir. Elde edilen DC elektrik akü ile depolanabilir. gösterilen, şebekeden bağımsız rüzgâr elektrik sistemleri birkaç kW ile 100 kW arasında kullanılmakla birlikte, çoğunlukla 30 kW'ı aşmamaktadır. Şebekeden bağımsız büyük güçlü (10-100 kW) sistemler, yedek enerji kaynağı olarak diesel jeneratörlerle paralel çalıştırılmaktadır. Böyle bir sistemde diesel jeneratörün rüzgârdan yararlanarak % 40-50 yakıt tasarrufu sağlaması amaçlanmaktadır. Rüzgâr-Diesel sistemlerde DC/AC invertör kullanılarak tüketici AC ile beslenmektedir. Bu tür sistemler özellikle kırsal alanlarda ve enterkonnekte şebekeye uzak olan bölgelerde tercih sebebidir.

Türbinden elde edilen elektrik çeşitli ünitelerden geçerek kullanıma sunulmaktadır. Rüzgârın esmediği durumlarda ise yani türbin tarafından elektrik üretimi olmadığında; akü içerisinde depolanmış olan elektrik kullanıma sunulur. Türkiye'de özellikle 10 kW'dan küçük güçlerde rüzgâr ve güneş enerjisinin beraber kullanıldığı elektrik sistemlerine bir talep olduğu ve bu tür sistemlerin piyasaya çıkarıldığı da görülmektedir. Bu sistemler DC karakterli ve akülüdürler. Ancak, pahalı olmaları yaygınlaşmalarını engellemektedir [59].

## 4.6. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ÖMRÜ, BAKIMI VE GÜVENLİĞİ

### 4.6.1. Türbin Ömrü

Günümüzde 20-25 yıldan daha fazla çalışan türbin olmadığı için kesin bir ömür verilmemekle birlikte, beklenen türbin ömrünün 25-30 yıl olabileceği düşünülmektedir. Dünyada bugün için yaklaşık 30 000 türbin çalıştığı bilinmektedir. Rüzgâr türbinlerinin kanatları cam elyafı (fiberglass) polyester malzemeden, nadiren de tahtadan yapılmaktadır. Kuleler ise; çelik boru şeklinde, kafes tipi veya betondan üretilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbinleri yaklaşık 3-5 m/s de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15 m/s 'de ulaşır ve yaklaşık 25 m/s 'ye ulaştığı zaman çalışmayı durdurur. Kanatlar dakikada yaklaşık 15-50 kez döner, ancak değişken kanat hızlı türbin çeşitlerinin sayısı giderek artmaktadır. Türbinlerdeki 20 yıllık tasarım ömrü üreteçler tarafından belirlenmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbin kapasitesine hem de lokal klimatolojiye bağlıdır. Örneğin, sitedeki türbülans miktarı gerçek ömrü önemli oranda belirleyen değişkendir [60].

### 4.6.2. Türbinlerin Bakımı

Modern rüzgâr türbinleri 20 yıllık ömürlerinde 120 000 saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobilin 4000-6000 saatlik çalışma aralığından çok daha fazladır. Pratikteki deneyimler, yeni türbinlerde bakım maliyetlerinin de azaldığını göstermektedir. Danimarka'da 1975'den beri kullanılan 4400 türbin üzerinde yapılan çalışmalar, yeni üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinin, eski üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinden oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Eski Danimarka türbinlerinin yıllık bakım maliyetleri, türbin yatırım maliyetinin %3'ü dolayındadır. Yeni üretim türbinlerde ise bu oran, yatırım maliyetlerinin %1,5-2,0'si dolayındadır. Tek türbinin bakım maliyeti, bir rüzgâr parkındaki türbinlerin ortalama bakım maliyetinden daha pahalı olmaktadır. Bazı rüzgâr türbini parçaları bozulmaya ve değiştirilmeye, diğer parçalardan daha çok maruz kalırlar. Bu, özellikle rotor kanatları ve vites kutusunda görülür. Özellikle kanatlar, vites kutusu ve üreteç, türbin fiyatının % 15-20 arasında değişen kısmını oluşturmaktadır [60].

#### **4.6.3. Türbin Güvenliği**

Büyük modern rüzgâr türbinlerinde normal olarak konik çelik boru şeklinde kuleler kullanılır. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlüğü, daha güvenli olması ve rüzgâr türbininin bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamasıdır. Kusuru ise, maliyetinin yüksek olmasıdır. Kafes tipi kulelerin en büyük kusurları, rüzgâr çiftliğine daha az uygun olması ve bakım onarım sırasında yanına ulaşılabiliirliğin zor olmasıdır. Bakım, onarım ve servis için güvenlik açısından bazı sakıncalar içermektedir. Kule yüksekliğinde, türbinleri kurarken ve bakım-onarım çalışması yaparken tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Fakat yeni rüzgâr türbinlerinde personelin düşmemesi için inerken ve çıkarken her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Bakım anında makinelerin tamamen durdurulması gerekmektedir. Kritik parçaların bozulması durumunda veya şebekeden ayrılma durumunda, rotorun ve türbinin durması gerekmektedir. Bu durma olmazsa, rotor çok kısa sürede hızlanmaya başlayacaktır. İşte bu durumlarda aşırı hızlanma koruması olmalıdır. Yeni modern türbinlerde bu önlem vardır [60].

#### **4.6.4. Çevresel Etkiler**

Rüzgâr enerjisi temiz bir kaynaktır. Bugün dünyanın en önemli çevre sorunu atmosferdeki CO<sub>2</sub> (karbondioksit) artışından ve sera etkisinden kaynaklanan küresel ısınmadır. Oysa rüzgâr santralleri CO<sub>2</sub> emisyonu olmayan santrallerdir. Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi yöntemi, çevre dostu, asit yağmurlarına yol açmayan, CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltan, fosil yakıt tasarrufu sağlayan, radyoaktif etkisi olmayan bir yöntemdir [60].

Rüzgâr türbini gürültüdür ve kuş ölümlerine neden olur, radyo ve TV alıcılarında parazitlenme yaparlar. Bu nedenle İngiltere başta olmak üzere birçok Avrupa ülkesinde büyük rüzgâr türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır [61].

#### **4.6.4.1. CO<sub>2</sub> (Karbondioksit) Salınımı**

Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) kömür, petrol ve (daha az ölçüde) doğal gaz yanması sonucu kaçınılmaz olarak oluşan bir yan üründür. Sonuç olarak, bu gazın atmosfer içindeki konsantrasyonu endüstri devriminden bu yana %30 artmıştır ve bilim adamları küresel iklime insan etkisinin izlenebilir olduğu sonucuna varmışlardır. Karbon dioksit ve diğer sera gazlarının süregelen birikimi enfeksiyon hastalıklarının giderek yayılması, daha sık ve ciddi ısı dalgaları, fırtınalar, kuraklık, sel ve deniz seviyelerinin yükselmesi sonucu kıyıların su baskınına uğraması, ekonomik ve sosyal yıkım riskleri oluşturan ekosistemlerin tahribi dahil olmak üzere pek çok olumsuz etkileri ile insan sağlığını ve varlığını tehdit etmektedir [61].

#### **4.6.4.2. Rüzgâr Enerjisinde Kara Kullanımı**

Rüzgâr enerjisi parklarının geniş alan istemesi bir sorun gibi gözükabilir. Tek türbin açısından bakıldığında alan gereksinimi 700-1000 m<sup>2</sup>/MW düzeyindedir. Rüzgâr parklarının birim kurulu güç başına toplam alan gereksinimi ise, bunun 150-200 katı üzerinde olup, tarla özgül alanı 0.1-0.2 km<sup>2</sup>/MW (150x700=105 000 m<sup>2</sup>/MW, 200x1000=200 000 m<sup>2</sup>/MW) arasındadır. Ancak rüzgâr tarlalarında türbinlerin kapsadığı gerçek alan, park toplam alanının %1-1.2'si kadardır. Türbinlerin aralarında tarımsal amaçlarla kullanılabilirdiğinden, arazi kaybı söz konusu değildir [60].

#### **4.6.4.3. Rüzgâr Santrallerinde Su Tüketimi**

Alışlagelmiş enerji üretiminde su, termodinamik çevrim, kömürün temizlenmesi ve yanma sürecinde kullanılır. Böylece rüzgârdan birim elektrik enerjisi üretiminde nükleerden 600 kat daha az, kömürden 500 kat daha az su tüketildiği görülür. Rüzgâr türbinlerinin rotor kanatlarının toz ve pislikten temizlenmesi için su kullanılır. Temizlik yapılmaz ise türbinin ömrü azalır. Rüzgârda su kullanımı, 250 kW'lık türbin için %25 kapasite çarpanı dikkate alınarak kanatların yılda 4 kez temizlenmesine göre hesaplanmıştır [60].



#### **4.6.4.4. Mekanik Gürültü Salınımları**

Mekanik gürültü, dişli kutusu, jeneratör ve yedek motorların oluşturduğu gürültüdür. Mekanik gürültü, akustik kılıfların kullanılması, özel dişlilerin kullanılması ve dönen parçaların ses emici malzeme ile kaplanması gibi birçok teknik kullanılarak azaltılabilir [62].

#### **4.6.4.5. Rüzgâr Türbinlerinde Ses**

Aerodinamik gürültü, hava içinde dönen kanatların hızına bağlı olarak artar. Rüzgâr santrali içerisindeki ses, geliştirilmiş türbinlerin bulunduğu ortamda bile 85 dB kadardır. Rüzgâr türbinleri yerleşim yerlerine yakın kurulursa, bu yerleşimin insanlar üzerinde görüntü ve gürültü etkileri olur. Ancak, 500 kW'lık bir türbinin 8 m/s rüzgâr hızında, yaklaşık 250 m uzaklıkta yapacağı gürültü, olağan gündüz gürültüsüne eşdeğerdir. Dünyanın çeşitli rüzgâr santrallerinin olduğu yerlerde yapılan araştırmalar, rüzgâr parkına 2-3 km uzaktaki insanların %50'sinden fazlasında gürültünün herhangi etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir [60].

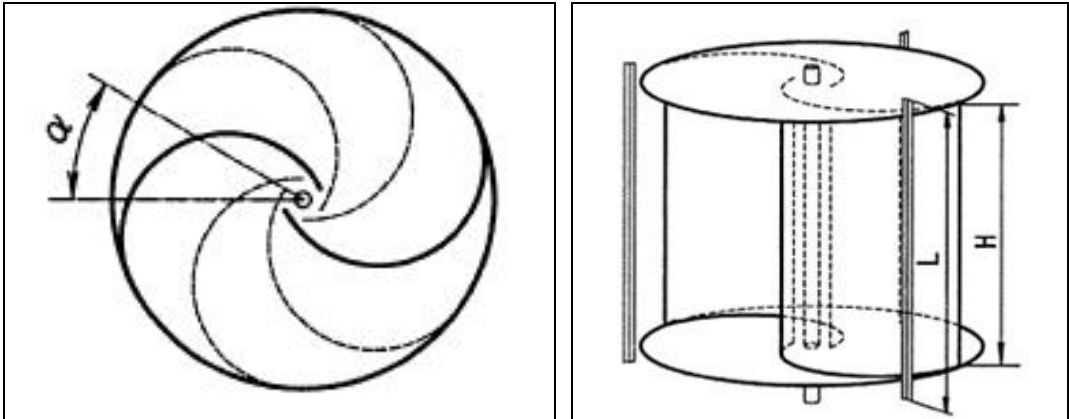
## BÖLÜM 5

### MATERYAL ve METOT

#### 5.1. TÜRBİN TASARIMI

Yatay helezonik rüzgâr türbininin tasarımına savonius rüzgâr türbinlerinden yola çıkılarak başlanılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucu elde edilen bulgular toplanarak nasıl bir tasarımın yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda tasarıma giden süreç aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Savonius türbinlerinin en ilkeli tek katlı savonius türbinidir. Şekil 5.1.'de tek katlı savonius türbinini görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi rüzgâr hangi yönden eserse essin türbin rüzgârı yakalayabilmektedir. Bu savonius türbinlerinin en önemli özelliğidir. Böylece kuyruk gibi donanıma gerek duyulmaksızın türbinden enerji elde edilebilmektedir.



Şekil 5.1. Tek katlı savonius rüzgâr türbini [9].

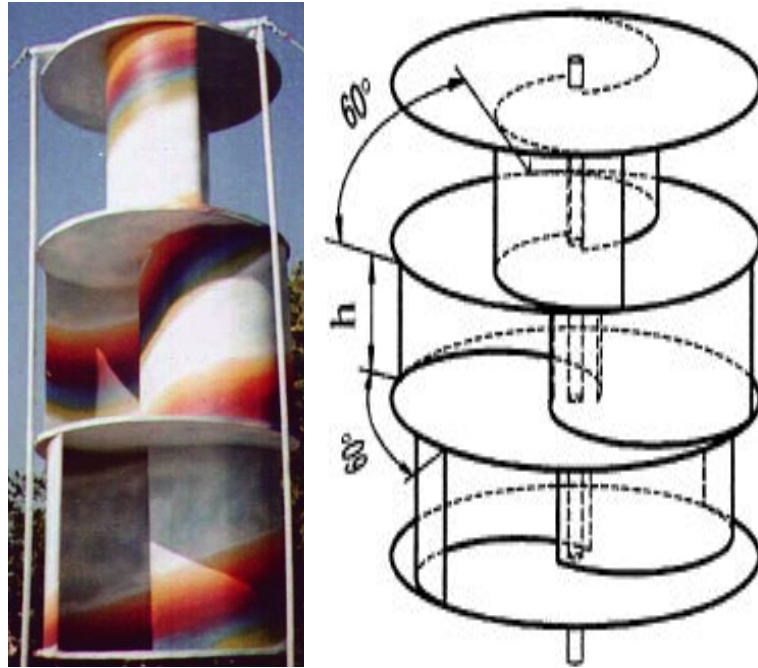
Yapılan farklı çalışmalarda tek katlı savonius türbininin performansını arttırmak amacıyla çok katlı savonius türbin tasarımları düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda Menet, J.L., elektriğin yerel üretimi için küçük bir savonius rotorunun

(iki katlı) üretimi hakkında bir çalışma yapmıştır. Şekil 5.2.'de iki katlı savonius tasarımı görülmektedir.



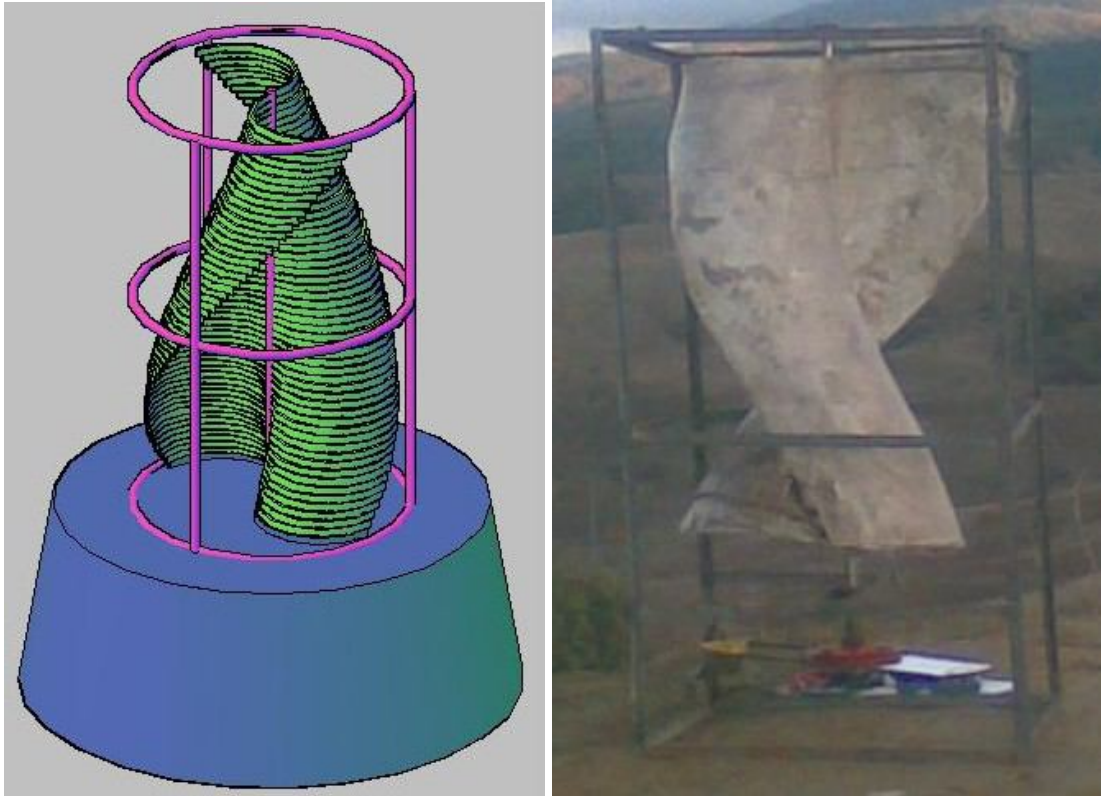
Şekil 5.2. İki katlı savonius rüzgâr türbini [10].

Şekil 5.3.'de ise S. Taşkın ve İ. Güney tarafından yapılan “Rüzgâr ve Güneş Enerjisinin Karayollarında Kullanılmasına Yönelik Bir Değerlendirme” konulu çalışmada ele alınmış üç katlı savonius rüzgâr türbini görülmektedir.



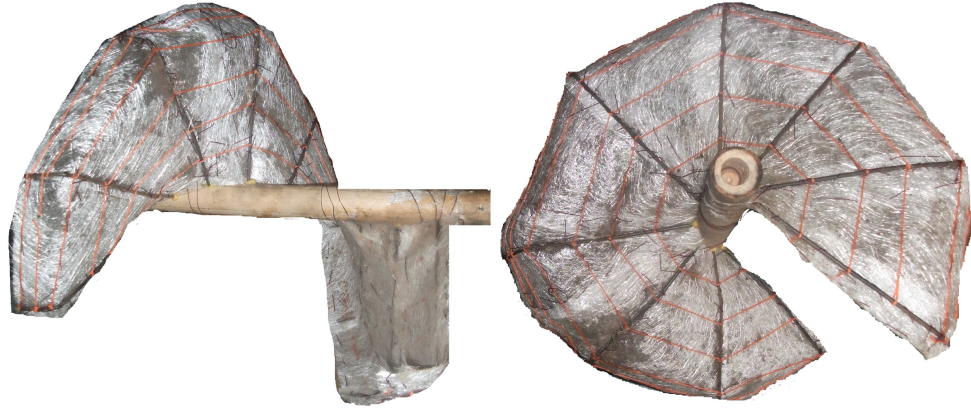
Şekil 5.3. Üç katlı savonius rüzgâr türbini [64].

Şekil 5.4.'de çok katlı savonius türbin tasarımlarından yola çıkılarak F. Kılıç tarafından tasarım ve imalatı gerçekleştirilen dik eksenli helezonik rüzgâr türbini görülmektedir. Bu çalışmada çok katlı savonius türbinin katları arasındaki bölüntüler birleştirilerek helezonik bir tasarım düşünülmüştür. Bu tasarım sayesinde yatayla açılı şekilde esen rüzgârın sisteme yapabileceği frenleme etkisi de azaltılmış olmaktadır.



Şekil 5.4. Dikey eksenli helezonik rüzgâr türbini [39].

Tarafımızdan yapılan bu çalışmada ise dik eksenli helezonik rüzgâr türbininin yatay eksenli olarak çalışabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda tek sarımlı ve çift sarımlı olmak üzere iki farklı yatay eksenli helezonik rüzgâr türbini tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Şekil 5.5.'de tek sarımlı helezonik rüzgâr türbini görülmektedir. Tek tur üzerinden yapılan tasarımda çap 55 cm, uzunluk ise 75 cm olarak imal edilmiştir.



Şekil 5.5. Tek sarımlı yatay eksenli helezonik rüzgâr türbini

Şekil 5.6.'da ise çift sarımlı helezonik rüzgar türbini görülmektedir. Tek sarımlıda olduğu gibi tek tur üzerinden çap 55 cm, uzunluk ise 75 cm olarak imal edilmiştir. Her iki tasarımda da öncelikle silindirik ahşap malzeme üzerine ince demir çubuklar tutturulmuştur. Rüzgarı daha iyi tutabilmesi amacıyla ince demir çubukların uçları 5cm kadar yaklaşık 110°'lik açıyla öne doğru kıvrılmıştır. Daha sonra cam elyafı çubuklar üzerine dokunarak şekillendirme tamamlanmıştır. En son olarak da cam elyafı üzerine reçine sürülerek sağlamlaştırma işlemi yapılmıştır. Kullanılan cam elyafının diğer malzemelere göre üstünlükleri kısaca şöyle sıralanabilir;

- Hafif olması.
- Darbelere dayanımının yüksek olması.
- Azda olsa değişiklik yapabilme imkânı sağlaması.
- Paslanmaz bir yapıya sahip olması.



Şekil 5.6. Çift sarımlı yatay eksenli helezonik rüzgâr türbini

Tasarım ve imalatı tamamlanan türbinlerin yataklama işlemine geçilmiştir. Bunun için iki adet rulman kullanılmıştır. Bu çalışmada amaç sadece türbinin rüzgârda dönme işlemini gerçekleştirip gerçekleştirilemediğidir. Dolayısıyla türbinden elektrik üretimi ikinci planda tutulmuştur. Bu yüzden türbinin arka uç kısmına 3W/6V özelliğine sahip küçük bir dinamo yerleştirilmiştir. Helezonik türbin yatay eksenli olduğundan rüzgârı yakalaması için de sisteme kuyruk imalatı yapılarak eklenmiştir. Şekil 5.7.'de yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin bitmiş hali görülmektedir.



Şekil 5.7. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin bitmiş hali

Tasarım ve imalatı tamamlanan türbin sistemi denenmek üzere dış ortama çıkarılmıştır. Şekil 5.8.'de yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin dış ortamda denenmesi görülmektedir. Denemeler neticesinde 2 m/s gibi düşük rüzgâr hızında bile türbinin oldukça rahat bir dönüş sağladığı gözlemlenmiştir.





Şekil 5.8. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin dış ortamda denenmesi

Bu denemelerden sonra yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininde tek sarım ile çift sarımın türbinlerin elektrik üretimi performansı üzerine etkisini incelemeye geçilmiştir. Bu işlem için havalandırma kanallarında kullanılan elektrikli fan kullanılmıştır. Şekil 5.9.'da yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin atölye ortamında denenmesi sırasında kullanılan elektrikli fan görülmektedir.



Şekil 5.9. Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininin denenmesinde kullanılan fan

## 5.2. RÜZGÂR ÖLÇERLER

Anemometre; rüzgâr hava hızını ölçen alete denir. Bir başka deyişle “rüzgâr ölçer” de denilmektedir. Havalandırma sistemlerinde ve meteoroloji istasyonlarında kullanılır. Dakikadaki devir sayıları elektronik olarak kaydedilir. Anemometreler fincanlar yerine, pervanelerle de donatılabilirler, ama bu yaygın değildir. Bunların dışında, sesin fazla yükselmesi ve hava moleküllerinden yansıyan coherent ışığını tespit eden ses üstü ve lazer anemometreleri de vardır. Sıcak kablo anemometreleri, rüzgâr ve rüzgâr altına yerleştirilen kabloların arasında meydana gelen dakikalık sıcaklık farkından dolayı rüzgâr hızını tespit eder. Mekanik olmayan anemometrelerin avantajı, buzlanmaya karşı az hassas olmalarıdır. Bununla beraber uygulamada fincan anemometreleri her yerde kullanılmakta olup elektrikle ısıtılan mil ve fincanlı özel modeller kutuplarda da kullanılmaktadır. Şekil 5.10.’da elektronik rüzgar ölçer görülmektedir.



Şekil 5.10. Elektronik rüzgâr ölçer (anemometre).

Rüzgâr enerjisi üretiminde doğru Rüzgâr değerlerinin elde edilmesi çok önemlidir. Çünkü enerji potansiyeli tespit edilecek bölgenin Rüzgâr karakteristikleri bu bölge için seçilecek türbin elemanlarının seçimini, yerleşimini önemli ölçüde etkiler.



### 5.3. ELEKTRİKSEL GÜÇ HESABI

Birim zamanda yapılan iş miktarı Enerji, iş yapabilme kabiliyeti, kapasitesi; güç ise, belli bir işi yapmanın hızıdır. Birimi Erg/s veya Newton.metre/saniye=Joule/s (J/s)dir. Yaygın olan güç birimleri ise, Watt (W) ve beygir gücü (Buhar Beygiri, BG, BB, PS, CV)'dür. Güç ile ilgili bağıntılar:

$$\text{Güç} = \text{İş} / \text{Zaman} = \text{Kuvvet} * \text{Hız}$$

$$1\text{W} = 1\text{J/s}$$

$$1\text{BG} = 736 \text{ W}$$

$$P = W / t$$

Elektrikte güç, akım ve gerilim (voltaj) çarpımından ibarettir. Bir doğru akım devresinden geçen akım amper, gerilim de volt cinsinden ölçüldüğünde, bunların çarpımıyla elde edilen güç, watt olarak elde edilir. 1000 watta eşit olan kilowatt ise daha sık kullanılan bir birimdir. Bir doğru akım devresinde güç P şu biçimde bulunabilir:

$$P=I \cdot V \quad \text{veya} \quad P = I^2 \cdot R \quad \text{veya} \quad P = ( V^2 / R )$$

Alternatif akım devrelerinde güç hesabı ise farklıdır. Akım ve gerilim değerleri her an değişeceğinden, güç değeri de değişecektir. Bu yüzden alternatif akım devrelerinde “ortalama güç”ten bahsedilir. Bir alternatif akım devresinde akımın etkin değeri  $I_e$ , potansiyel farkının etkin değeri  $V_e$ , akım ile gerilim arasındaki faz farkı  $\phi$  ise, güç:

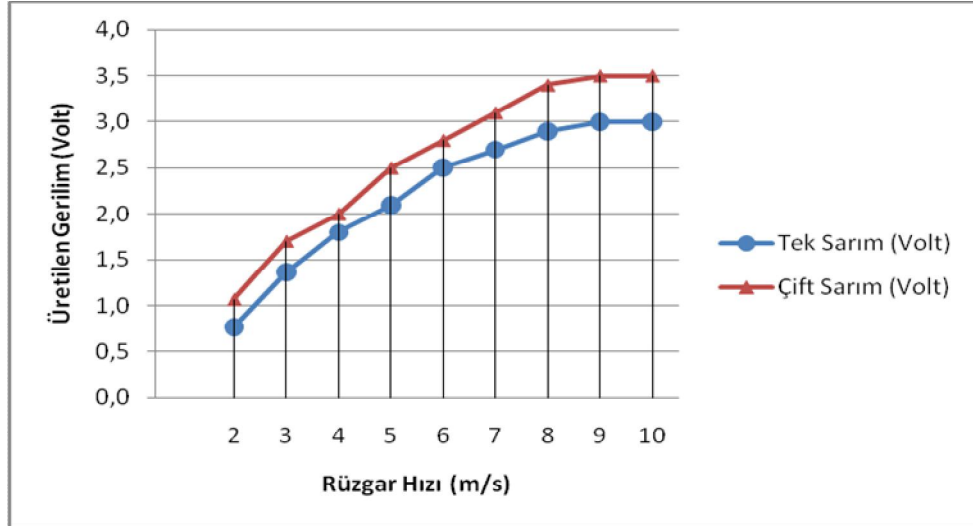
$$P = I_e \cdot V_e \cdot \cos\phi$$

Şeklinde ifade edilir. Burada  $\phi$  voltaj ile akım arasındaki faz açısıdır. Evlerde kullandığımız elektrik sayaçları şehir şebekesinden çektiğimiz güçle orantılı olarak dönen bir disk esasına göre çalışır. Böylece sonuç kilowatt-saat (kWh) olarak numaratörde görünür. Enerji değerleri; kilovolt-amper-saat (KVAh) olarak da verilebilir. Bu kWh'e eşit değildir.

#### 5.4. DENEY SONUÇLARI

Yatay eksenli helazonik rüzgâr türbin sisteminin dış ortamda 2m/s gibi düşük rüzgâr hızlarında dönme işlemini gerçekleştirmesinin ardından tek sarım ile çift sarım arasındaki farkın sistem üzerindeki etkisini inceleme işlemine geçilmiştir.

Karabük ili coğrafi konum itibariyle düzenli rüzgârların olmadığı bir yer olduğundan sistemin elektrik üretimi üzerine etkilerini deneysel olarak incelemek amacıyla havalandırma kanallarında kullanılan elektrikli fan düzeneğinin kurulu olduğu atölye ortamına geçilmiştir.



Şekil 5.11. Üretilen Gerilim.

Deneysel ortamda oluşturulan yapay bir ortamda simülasyon şeklinde gerçekleştirilmiştir. Havalandırma kanallarında kullanılan fana yaklaşılarak ve uzaklaşılarak istenilen rüzgâr hızlarının türbine ulaşması sağlanmıştır. Şekil 6.1.'den de anlaşılacağı gibi en iyi gerilim çift sarımlı türbinde gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.1. Çift sarımlı ile tek sarımlı türbinin deney sonuçları.

Rüzgâr Hızı (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tek Sarım (Volt)	-	0,8	1,4	1,8	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,0
Çift Sarım (Volt)	-	1,1	1,7	2,0	2,5	2,8	3,1	3,4	3,5	3,5

Çizelge 5.1.'den anlaşıldığı gibi tek sarımlı türbinin ürettiği gerilim 3,0 volt olarak sabitlenirken çift sarımlıda üretilen gerilim 3,5 volt olarak sabitlenmiştir. Rüzgar hızının 1 m/s olduğu durumda türbinlerin her ikisinde de bir gerilim üretimi olmamıştır.

## 5.5. TARTIŞMA

Rüzgâr hızının 10 m/s olduğu durumda çift sarımlı türbinde 3,5 volta ulaşılırken, tek sarımlı türbinde 3,0 volta ulaşılmıştır.

Çift sarımlı ile tek sarımlı helezonik türbin arasında rüzgâr hızına bağlı üretilen gerilim açısından bir paralellik meydana gelmiş ve çift sarımlı türbin tek sarımlıya göre yaklaşık %19 civarında daha fazla gerilim üretmiştir.

3W/6Volt özelliğine sahip dinamonun kullanıldığı sistemlerde en yüksek gerilim seviyesine ulaşamamıştır.

Rüzgâr türbini helezonik olduğundan rüzgâra karşı bir frenleme meydana gelmemekte ve esinti helezon içerisinden akmaktadır.

Yatay eksenli helezonik rüzgâr türbininden daha iyi sonuç almak için torkun artırılması yönünde çalışmalar yapılmalıdır.

## BÖLÜM 6

### SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan literatür taraması sonucu savonius türbinleri hakkında genel bilgiler edinilmiştir. Bunlardan farklı olarak dik eksenli helezonik tasarımının yapıldığı çalışmadan farklı olarak yatay eksenli helezonik rüzgar türbininin tasarım ve imalatı yapılmıştır. Sarmal (helezonik) yapıda olan bu modelin diğer savonius kanat tiplerine göre avantajlı ve dezavantajlı durumları incelenmiştir. Kanat malzemesinin bakalit katkılı fiber malzemesinden olması hafifliğin sağlanması bakımından tercih edilmiştir. Tek sarımlı ve çift sarımlı olmak üzere iki farklı yatay eksenli rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Yapılan deneylerde kanat tipinin sarmal yapıda olmasının diğer savonius kanat tiplerine oranla üstünlükleri şu şekilde özetlenebilir;

- İlk kalkış için diğer savonius türbin tiplerine göre daha az bir rüzgâr hızı yeterli olmaktadır.
- Sarmal (helezonik) yapıda olan bu modelin şekil üstünlüğünden dolayı hava türbülansları en aza indirilmiştir.
- Yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde daha önce yapılmış sac kanatlı savonius türbinlerine göre daha iyi sonuç alındığı gözlemlenmiştir.
- Kanat malzemesi diğer sac ve ahşap v.s malzemelere göre daha hafif tasarlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu yapılacak öneriler ise aşağıdaki şekilde belirtilebilir;

- Torku arttıracak şekilde güç aktarım tasarımları yapılabilir.
- Rüzgâr hızına müdahale edilemeyeceğinden performansı arttırmak için, türbin boyutları büyütülebilir.
- Rüzgâr hızlarının yüksek olduğu bölgelerde performansının daha fark edilir oranda yüksek olacağı söylenebilir.

## KAYNAKLAR

20. Karadağ, H. İ., “Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisinin önemi ve rüzgar türbini tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-50 (2009).
21. Tümerden, O., “Rüzgar enerjisi teknolojisi ve Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-50 (2002).
22. Vardar, A., “Trakya yöresinde kırsal kesimde kurulacak bir rüzgar türbini için en uygun kanat tipinin, kanat açısının ve kanat konumunun belirlenmesi üzerine bir araştırma”, Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ, 12-60 (2002).
23. Murai, Y. and Nakada, T., “Particle tracking velocimetry applied to estimate the pressure field around a Savonius turbine”, *Meas. Sci. Technol*, 22: 2491–2503 (2007).
24. İnternet: “Elektrik işleri etüt dairesi“<http://www.eie.gov.tr/eie/yayinlar>” (2008).
25. Kishinamia, K., Taniguchib, H., Suzukia, J., Ibanoc, H Kazunoud, T. and Turuhamie, M., “Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine”, *Energy*, 30: 2089–2100 (2005).
26. Bilgili, M., Şahin, B. ve Kahraman, A., “Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey”, *Renewable Energy*, 36: 1733-1745 (2003).
27. Charlier, R. H., “A Sleeper awakes: tidal current power”, *Free University of Brussels Belgium Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7: 515–529 (2003).
28. Hayashıt, T., Hara, Y. and Li, Y., “Wind tunnel tests on a different phase three-stage savonius rotor”, *International Journal*, 48: 9-16 (2005).
29. Menet, J.L., “A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study”, *Renewable Energy*, 29 (11): 1843-1862 (2004).
30. Atılğan, M. ve Deda Altan, B., “Savonius rüzgâr çarklarının performansının geliştirilmesi ve karşılaştırılması”, *Mühendis ve Makine*, 15 (533): 38-44 (2004).
31. Köse, F. ve Özgören, M., “Rüzgâr enerjisi potansiyeli ölçümü ve rüzgâr türbini seçimi”, *Mühendis ve Makine*, 46 (551): 20-30 (2005).
32. Özgener, Ö., “A review of structures of swtss in the aegean region and performance analysis”, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5 (12): 128-136 (2003).

33. Eriksson,S., Bernhoff, H. and Leijon,M., “Evaluation of different turbine concepts for wind power”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28: 58-66 (2006).
34. İnternet: Fosil Enerji Araştırmaları  
“<http://www.fe.doe.gov/international/turkover.html>” (2003).
35. Büyükmert, Rüzgar türbinli tahrikli ısı pompasının kullanılabilirliği, *Zonguldak Karaelmas Yüksek Lisans Tezi* (2005)
36. Çelik, A.N., “A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey”, *Renewable Energy*, 29: 593–604 (2003).
37. Şahin, B., Bilgili, M., and Akıllı, H., “The wind power potential of the eastern mediterranean region of turkey”, *Elsevier*, 93: 171-183 (2005)
38. Güven, Ş.Y., Üçgül, İ., ve Şenol, R., “Güneş enerjisi ısı uygulamaları ve güneş kulelerinin incelenmesi”, *Mühendis ve Makine dergisi*, 32: (533) 24-36 (2004).
39. Büyükmert, A., “Rüzgar türbini tahrikli bir ısı pompasının kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-20 (2006).
40. Noyan, Ö.F., “Türkiye’nin enerji politikasında temiz enerji ve hidrojen enerjisinin geleceği”,Sempozyumu *Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Manisa 130 (2005).
41. Kadırgan, F., *Department Of Chemistry, Istanbul Technical University, Faculty Of Science And Letters*, 31: 153-154 (2005).
42. Tugrul, A. , “Avrupa birliği sürecinde Türkiye ve enerji açılımları”, *TMMOB 5. Enerji Sempozyumu*, Ankara 151-162 (2005).
43. Akkaya, S., “Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi ve bir rüzgar enerjisi uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 10-20 (2007).
44. Ediger, S., Akar,ve S., Berkin, U., “Forecasting production of fosil fuel sources in Turkey using a comparative regression and ARIMA model”, *Energy Policy*, 34 (18): 3836-3846 (2006).
45. Ediger, S. V., Kentel, E., “Renewable energy potential as an alternative to fossil fuel in Turkey”, *Energy Conversion & Management*, 40: 743-755 (1999).
46. Atılğan, İ., “Türkiye’nin enerji potansiyeline bakış”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15 (1): 31-47 (2000).
47. Yüksek, O., Kömürcü, M., Yüksel, I. and Kaygusuz, K., “The role of hydropower in meeting Turkey’s electric energy demand”, *Energy Policy*, 34 (17): 3093-3103 (2006).

48. Ilgar, R., “Ekolojik bakışla jeotermal kaynaklara dualist yaklaşım”, *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 4 (13): 88-98 (2005).
49. Kaygusuz, K., “Energy policy and climate change in Turkey”, *Energy Conversion and Management*, 44 (10): 1671-1688 (2003).
50. İnternet: Çukurova Üniversitesi Resmi Sitesi  
“[http://tarimmakinalari.cu.edu.tr/index.php?option=com\\_phocadownload&view=section&id=2%3Asunular&Itemid=84&lang=tr](http://tarimmakinalari.cu.edu.tr/index.php?option=com_phocadownload&view=section&id=2%3Asunular&Itemid=84&lang=tr)” (2005).
51. İnternet: Elektrik işleri etüt dairesi“<http://www.eie.gov.tr/eie/yayinlar>” (2006).
52. TÜSİAD, “21. Yüzyıla girerken Türkiye’nin enerji stratejisinin değerlendirilmesi”, *TÜSİAD*, İstanbul, T(98): 80 (1998).
53. Walker, F. J. and Jenkins, N., “Wind Energy Technology”, *John Wiley & Sons, Ltd.*, 60-178 (1997)
54. Şahin, A., "A review on research and development on wind energy in Turkey", *Clean-Soil Air Water.*, 36 (9): 734-742 (2008).
55. Talayoğlu, S., “Denizli ilinin tavas ilçesine ait rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması ve ekonomik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 20-50 (2010).
56. Karadeli, S., “Rüzgar enerjisi“, *Tübitak Yayını*, Ankara, 33: 6-14 (2001).
57. Wizelius, T., *Developing Wind Power Projects*, London, 54-113 (2007).
58. Kılıç, F., “Helezonik savonius türbini imalatı ve denemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-20 (2009).
59. Irabu, K., and Nath, R. J., “Characteristics of wind power on Savonius rotorusing a guide-box tunnel”, *Faculty of Mechanical Engineering University of the Ryukyus Experimental Thermal and Fluid Science*, 32: 580-586 (2006).
60. İnternet: “<http://www.dmi.gov.tr/deniz/metu3-ruzgar.aspx>” (2009).
61. Ersoy, H., “Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının dünü bugünü incelenerek elektrik enerjisine olan katkının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 50-53 (2007)
62. İnternet: “[www.frmtr.com/fizik/997485](http://www.frmtr.com/fizik/997485)” (2010).
63. Deniz, M., “Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli ve Türkiye’nin enerji ihtiyacına katkısı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 3-24 (2002).
64. Yılmaz, A., “Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 1-33 (1995).

65. Yılmaz, M., “Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli ve maliyet analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 6-42 (2000).
66. Yenilmez, U., “Rüzgar enerjisi ve Türkiye’de mevcut durum”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 10-42 (2002).
67. Uyar, S., “Sürdürülebilir enerji teknolojilerinde gelişmeler ve Türkiye’deki uygulamaları konferansı bildiriler kitabı”, *Makine Mühendisleri Odası Yayınları*, 214: 60-112 (1999).
68. Mehel, N., “Dünya’da ve Türkiye’de rüzgar enerjisi: potansiyeli, kullanımı ve almanya-türkiye karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Eskişehir, 5-25 (2009).
69. Tümerdem, O., “Rüzgar enerjisi teknolojisi ve türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-36 (2002).
70. Demirtola, M., “Türkiye’nin yeni enerji stratejileri, alternatif enerji yatırımlarının dünya ve türkiye’deki uygulamaları enerji ve çevre politikalarının uyumlu geleceği”, *Türkiye Enerji Forumu Yayınları*, Ankara, 30-98 (2001).
71. Şen, C., “Gökçeada’nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 20-28 (2003).
72. Nurbay N., ve Çınar A., “Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü*, Kocaeli, 4-51 (2005).
73. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, *John Wiley & Sons, Ltd.*, 35-143 (2001).
74. Emniyetli, G., “Evsel elektrik ihtiyacının karşılanması için rüzgar türbini tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi*, Edirne 16-24 (2007).
75. Bonus, “Bonus 600 Kw”, *Brochure*, 4-19 (2004).
76. İnternet: İzmir formule Model fuarı resmi sitesi  
“<http://www.formulamodel.com/bilgiler/stallattack.htm>” (2008).
77. DeWind, “D4-Series”, *Brochure*, 2-6 (2004).
78. Özgür M.A., “Kütahya’da seçilen bir konumda rüzgar verileriyle elektrik enerjisi üretim potansiyelinin bulunması”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 36-42 (2002).
79. İnternet: Elektrik Mühendisleri Odası Resmi sitesi  
“[http://www.emo.org.tr/eski/merkez/sempozyumlar/enerji\\_sempozyumu.htm](http://www.emo.org.tr/eski/merkez/sempozyumlar/enerji_sempozyumu.htm)” (2005).



80. Özyurt, M., Dönmez G.,“ Alternatif enerji kaynaklarının çevresel etkilerinin değerlendirilmesi”, **3. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi**, Mersin, 39 (2005).
81. Öger, Ö. G., “Pelton tipi rüzgar türbini kullanılarak elektrik enerjisi üretme”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi**, Ankara, 34-39 (2006).
82. İnternet: Gebze Yüksek Teknik Enstitüsü, “[www.gyte.edu.tr/enerji](http://www.gyte.edu.tr/enerji)” (2009).
83. Taşkın, S.,ve Güney, İ., “Rüzgâr ve güneş enerjisinin karayollarında kullanılmasına yönelik bir değerlendirme”,Yüksek Lisans Tezi **Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Bölümü** , İstanbul,23-32 (2008).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Umut YILDIRIM 1985 yılında Gaziantep’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Hacı Sami Konukoğlu Anadolu Meslek Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2004 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başladı ve 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programında öğrenimine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimler Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel: (532) 583 92 74

E-posta: ummutyildirim@hotmail.com