

T.C.
KARABÜK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ



RÜZGAR TÜRBİNİ
KANAT TASARIMI VE ANALİZİ

BİTİRME TEZİ

Hazırlayanlar

Berkcan ÇAKIR	2011010226024
Efe HELVACI	2011010226021

Tez Danışmanı

Doç.Dr. Ahmet DEMİR

KARABÜK-2016

İÇİNDEKİLER

İçindekiler.....	II
Tablo Listesi.....	XII
Şekil Listesi.....	XIII
Önsöz.....	X
Kabul Ve Onay.....	XIII

Bölüm 1

RÜZGAR

1.Rüzgar.....	1
1.1 Rüzgar Nasıl Oluşur.....	1
1.2 Rüzgar Enerjisi.....	2
1.3 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	2
1.4 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	4
1.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	5
1.6 Dünya’da Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	7
1.7 Dünya’da Rüzgar Kaynağı Kullanım Hedefleri.....	8

Bölüm 2

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	11
2.1 Türbinlerin Sınıflandırılması.....	12
2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	12
2.2.1 Yavaş Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri.....	13
2.2.2 Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri.....	13
2.3 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	14

Bölüm 3

RÜZGAR TÜRBİNİ EKİPMANLARI

3 Rüzgar Türbini Ekipmanları.....	15
3.1 Kule.....	17
3.2 Rotor Kanatları(Pervaneler).....	18
3.2.1 Kanat Sayısının Etkisi.....	20
3.3 Rüzgar Türbini Frenleme Sistemi.....	21
3.4 Dişli kutusu.....	22
3.5 Yaw (Saptırma) Mekanizması.....	23
3.6 Rüzgar Jeneratörü.....	24
3.7 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol	26
3.8 Yön Denetimi.....	26
3.9 Hız Denetimi.....	27
3.10 Güç Kontrolü.....	31

Bölüm 4

TÜRBİN KANADI AERODİNAMİĞİ VE RÜZGAR YÜKÜ

4	Türbin Kanadı Aerodinamiği ve Rüzgar Yüğü.....	32
4.1	Sürüklenme ve Kaldırma Kuvveti.....	32
4.2	Geliştirilmiş Olan Modeller.....	33
4.3	İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti.....	34
4.4	Kanat Elemanı Teorisi.....	38
4.5	Kayıplar.....	44

Bölüm 5

TÜRBİN KANATLARINDA KOMPOZİT KULLANIMI

5.	Türbin Kanatlarında Kompozit Kullanımı.....	46
5.1	Kanat Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	49

Bölüm 6

ÇEVRESEL ETKİLER

6. Çevresel Etkiler.....	56
6.1 Yer Seçimi ve Alan İhtiyacı.....	56
6.2 Gürültü Etkisi.....	57
6.3 Elektromanyetik Alana Etki	58
6.4 Habitata Etki.....	58
6.5 Görsel Etkiler.....	59

Bölüm 7

RÜZGAR TÜRBİN ÖMRÜ, BAKIMI VE GÜVENLİĞİ

7.Rüzgar Türbin Ömrü, Bakımı ve Güvenliği.....	60
7.1 Türbin Ömrü.....	60
7.2 Bakım.....	60
7.3 Güvenlik.....	61

Bölüm 8

RÜZGAR ENERJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

8.Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları.....	62
8.1 Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çevreye Yararları.....	62
8.2 Rüzgar Türbinleriyle Elektrik Enerjisi Üretiminin Avantajları.....	63

Bölüm 9

BÖLÜM 9 TÜRBİN KANAT PROFİL KESİTLERİ

ve ANALİZİ

9.Türbin Kanat Profil Kesitleri ve Analizi.....	66
9.1 Statik Basınç Konturları	67
9.2 Hız Konturları.....	68
9.3 Hız Akım Çizgileri.....	71
Kaynaklar.....	74
Özgeçmiş.....	78

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 1998-2007 yılları arasında Türkiye'deki Rüzgar santralleri Yapılan fizibilite çalışmaları.....	6
Tablo 1.2 Dünyanın teknik rüzgar potansiyel dağılımı.....	7
Tablo 1.3 Dünyada planlanan rüzgar enerjisi gelişmesi.....	8
Tablo 1.4 Dünya rüzgar kurulu gücünün dağılımı.....	9
Tablo 1.5 2003 yılı itibariyle Avrupa Birliği'nde kurulan rüzgar kurulu gücü.....	10
Tablo 2.1 Rüzgar türbin tipleri ve kullanım alanları.....	11
Tablo 3.1 Pitch ile Stall kontrolün karşılaştırılması.....	31
Tablo 6.1 Olumsuz Çevresel Etkiler.....	59
Tablo 8.1 Yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ile emisyon azalma oranları.....	62
Tablo 8.2. Farklı bölgelerin geçmiş ve gelecekteki dünya enerji tüketimi ve karbondioksit emisyon miktarları.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Rüzgar hızının yüksekliğe bağlı değişimi..	1
Şekil 1.2 Pers Uygarlığında kullanılan yel değirmeni.....	3
Şekil 1.3 Putnam Rüzgar Türbini.....	4
Şekil 1.4 Elektrik Üretimi İçin Kurulu Kapasite.....	5
Şekil 2.1 Rüzgarı Önden ve Arkadan Alan Yatay Eksenli Türbin Tasarımları.....	13
Şekil 2.2 Çok kanatlı türbin ile su pompalama sisteminin şematik görünümü.....	13
Şekil 2.3 Düşey Eksenli Rüzgar Türbini.....	14
Şekil 3.1 Rüzgar Türbininin Başlıca Elemanları..	15
Şekil 3.2 Türbin Bileşenleri.....	16
Şekil 3.3 Tipik Bir Türbin Pervanesinin Görünümü.....	19
Şekil 3.4 Mekanik Frenleme Sistemi.....	21
Şekil 3.5 Rüzgar Türbini Dişli Kutusu.....	22
Şekil 3.6 Yaw mekanizması (saptırma) yatağı ve yaw motoru.....	23
Şekil 3.7. Rüzgar Enerjisi Elektrik Sisteminin Genel Bileşenleri.....	25
Şekil 3.8 Kuyruk Plakası ile Çalışan Yön Bulma Sistemi.....	27
Şekil 3.9 Hız Denetim Bölgeleri.....	28
Şekil 3.10 Türbin Pervanesinde Gücün Hıza Bağlı Değişimi.....	30
Şekil 4.1 Örnek Bir Profil Üzerine Gelen Kuvvetle.	32
Şekil 4.2 Akım Tüpündeki Hareketli Diskten Geçen İdealleştirilmiş.....	35
Şekil 4.3 Akım Tüpü Boyunca Hız ve Basınç Dağılımı.....	37
Şekil 4.4 Kanat Elemanlarının Şematik Görünüşü..	39
Şekil 4.5 Herhangi Bir Kanat Kesitinde Meydana Gelen Hızlar.....	40
Şekil 4.6 Kanat Elemanına Etkiyen Bileşke Kuvvetleri.....	42
Şekil 4.7 Girdap Kayıplarının Devirlik Sayısına Göre Değişimi.....	45
Şekil 5.1 Epoksi Reçinelerin Organik Bağ Yapısı..	50
Şekil 5.2 Epoksi Reçinelerde Görülen Çekme Gerilmesi/Dayanım Eğrisi.....	51
Şekil 5.3 Cam ve Karbon Liflerinin Serbest ve Kompozit Yapı İçindeki Büyütülmüş Görüntüleri.....	52
Şekil 5.4 Cam ve Karbon Liflerinden Elde Edilmiş İplik Bobinleri.....	52

Şekil 5.5 Çok Yönlü Dokunmuş Cam Kumaşlarının İplik Açılarından Örnekler Ara (Core) Malzemeler.....	53
Şekil 5.7 Balsa Kütükleri ve Kanat İçinde Balsa Görünümü.....	53
Şekil 5.8 Bal Peteği Görünümlü Malzeme Örnekleri.. ..	54
Şekil 5.9 Bir Sandviç Yapı Uygulamasında Eğilmeye Karşı Oluşan Kuvvetle.....	54
Şekil 5.10 Kanat Kesitinde Sandviç Yapıların Görüntüsü.....	55
Şekil 6.1 250 m mesafede diğer yaygın gürültü aktiviteleri ile rüzgar türbinlerindeki gürültü seviyesinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.1 Bakım.....	61
Şekil 9.1 Kanat Profili.....	66
Şekil 9.2 Seçilen Kanat Profilleri.....	67
Şekil 9.3 Profil Boyutları.....	67

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamızda değerli katkılarından dolayı sevgili hocamız Doç. Dr. Ahmet Demir'e, bizim bu bilgi birikimimize gelmemizde katkıları olan değerli bölüm hocalarımıza ve bize destek olan ailelerimize teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Berkcan ÇAKIR

Efe HELVACI

ÖZET

Rüzgar türbini kanat tasarımı ve analizi hakkında yapmış olduğumuz çalışma ile rüzgar enerjisinin tanımlanması ve tarihsel gelişimi, türbinlerin sınıflandırılması, türbin ekipmanlarının tanıtılması, kanat aerodinamiği, türbinlerin çevreye etkileri, türbinlerin bakımı, rüzgar enerjisinin avantaj ve dezavantajları konuları açıklanmıştır. Analiz kısmında iki farklı profil kesitleri ele alınmış ve bu profil kesitlerinin hücum açılarına göre statik basınç konturları, hız konturları, hız akım çizgileri Ansys Workbench analiz programı ile birlikte incelenmiştir.

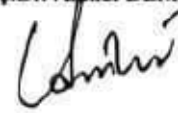
ABSTRACT

In this project our main purpose was to rebuild a wind turbine where we could analyze the different components which are used by the system, the aerodynamics of the wind blades, the effects the turbine has on the environment, the maintenance of the system and the advantage and disadvantages of the system. At the analyzing part of the project we choose two wind blades which have different profiles and different angles of attack so we could analyze the static pressure contours, velocity contours and velocity flow graphs which we get on ansys workbench.

KABUL VE ONAY

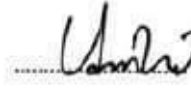
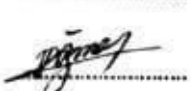
Berkcan ÇAKIR ve Efe HELVACI tarafından hazırlanan "RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMI VE ANALİZİ" başlıklı bu tezin Lisans Bitirme Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım. 14/04/2016

Tez Danışmanı
Doç.Dr. Ahmet DEMİR



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Lisans Bitirme Tezi olarak kabul edilmiştir. 14/04/2016

Tez Jürisi

Başkan:	Doç. Dr. Ahmet Demir	
Üye:	Arş. Gör. Elma DOKUR	
Üye:	Arş. Gör. Romana ÖZMEN	

KBÜ Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Mezuniyet Komisyonu ve Bölüm Başkanlığı bu tezi Lisans Bitirme Tezi olarak onamıştır. 14/04/2016

Yrd.Doç.Dr. İbrahim ÇAYIROĞLU
Mekatronik Müh. Bölüm Bşk. V.

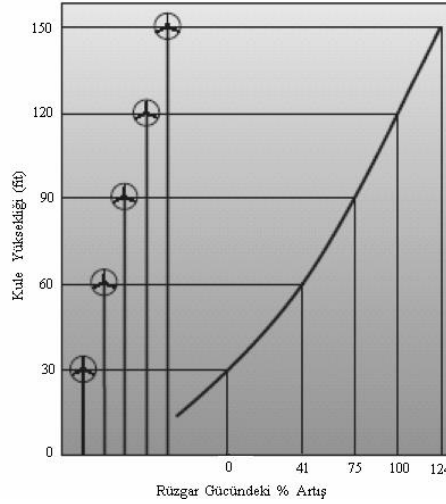


BÖLÜM 1 RÜZGAR

Rüzgar, atmosferde bulunan yüksek basınçlı hava ile alçak basınçlı havanın yeryüzüne doğru hareket etmesi sonucu ortaya çıkan bir hava hareketidir.

1.1 Rüzgar Nasıl Oluşur

Rüzgar basınç değişimi sırasında ortaya çıkan bir hava olayı olduğundan rüzgarın oluşması için yüksek basınçlı hava ile alçak basınçlı havanın yer değiştirmesi gerekir. Isı değişiklikleri, dünyanın dönmesi, yer yüzünün şekilsel yapısı ile bu basınç farkı çıkmaktadır. Havadaki basınç farkına daha çok sıcak hava ve soğuk hava neden olur. Isınan hava yükselerek alçak basıncı, soğuyan hava da alçalarak yüksek basınca neden olur. Bu iki hava akımının karşılaşması sonucu rüzgar oluşur. Yüksek hava basıncıyla alçak hava basıncı dengelendiğinde ise rüzgar durur. Rüzgar hızının yüksekliğe göre değişimi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Rüzgar hızının yüksekliğe bağlı değişimi

Rüzgar hızı çok küçük periyotlarla daima değişen dalga özelliği göstermektedir. Değişimin büyüklüğünün nasıl olduğu hem havaya hem de yüzey koşulları ve engellere bağlıdır.

Arazide türbinleri en iyi yerleştirilecek yer, hakim tepe ve sırtlarıdır. Bu durumu arazide baskın rüzgar yönü açısından olabildiğince üstünlük sağlar. Ayrıca, tepelerde rüzgar hızları, çevre arazilerden genellikle yüksektir. Tepenin rüzgarlı yanı ile kıyaslandığında, hava tepeye ulaşır ve tekrar dağılarak rüzgarsız yamaçtan alçak basınca doğru hareket eder. Düzgün ve pürüzsüz olmayan tepelerde yüksek rüzgar hızı üstünlüğüne karşın türbülans (girdap) önemli bir olumsuzluk oluşturur.

Çok engebeli ve pürüzlü arazilerde binalar, ağaçlar gibi engeller çok fazla türbülans yaratır. Türbülans, düzenli olmayan rüzgar akışıdır. Bu akış çevrede dönme ve vorteks yaratır. Türbülans, rüzgar türbininde, rüzgardan enerji üretim verimliliğini azaltır. Türbülans, türbinde yıpranma hasarlanma ve bozulmalara neden olur. Kulelerin genellikle yüksek yapılmasının bir nedeni, hem türbülansdan kaçınmak hem de yüksek rüzgardan daha çok yararlanıp daha çok elektrik üretmektir. Düşük türbülans yoğunluğu, rüzgar türbinleri için daha fazla ömür sağlar. Denizlerde türbülans karadan daha azdır bu nedenle denize kurulan türbinler karaya kurulanlardan daha uzun ömürlüdür.

1.2 Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisinin bir biçimidir. Güneş ışınları, yeryüzünde farklı sıcaklık, basınç ve nem oluşturur. Bu oluşumdan dolayı rüzgar enerjisi meydana gelir. Güneş dünyaya saatte 10^{18} Watt enerji gönderir ve bunun %1-2'si rüzgar kinetik enerjisine dönüşür .

1.3 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

M.Ö 3000 yıllarında Mısır'da İskenderiye'de kurulan rüzgar çarkları Nil vadisinde toprakların sulanması sağladı. M.Ö 250 yıllarında İran'da ilk düşey eksenli rüzgar çarkları tahıl öğütmede kullanıldı ve daha sonra tüm İslam ülkelerine ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkelere yayılmıştır. Avrupa'ya 13.yüzyılda haclı seferleri esnasında Anadolu'dan götürülmüştür. 1890'da Danimarka'da Paul La Cour adındaki bir Fransız tarafından 9 kW'lık iki jeneratörün çalıştırılmasıyla ilk uygulamalar başlamıştır. 1932'lu yıllarda A.B.D'de 15 m/s rüzgar hızında 20 MW'lık bir türbin tasarlanmıştır, tasarım sadece kağıt üzerinde kalmıştır. A.B.D' de ilk büyük rüzgar jeneratörü 1941 yılında S.Morgan Smith Co. İle General Electric Co. Firmaları tarafından Vermont'ta kuruldu. İlk yatay eksenli hesaba dayalı olarak yapılan yatay eksenli rüzgar çarkları 1930'lu yıllarda Betz tarafından yapılmıştır. Bu çarkların teorik verimleri %59 civarındadır. Modern düşey eksenli rüzgar çarkları üzerindeki ilk çalışmalar Savonius ve Darrieus tarafından yapılmıştır.

1974-1978 yılları arasında meydana gelen petrol bunalımlarından sonra, enerji talebindeki artış diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi rüzgar enerjisinin de önemini arttırmıştır. Avrupa’da en büyük kurulu güç Almanya’da olup onu Danimarka, İspanya ve diğer ülkeler takip etmektedir. Rusya’da 1931 yılında 100 kW’lık rüzgar türbini yapılmıştı.

1961 yılında Roma’da birleşmiş milletler tarafından düzenlenen “Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansı’nda” ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisi idi. Böylece çok eskiden bu yana tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor, yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu.

1985 yılında 1000’den fazla türbinden oluşan California rüzgar çiftliği kurulmuştur. 1983-1987 yılları arasında Kuzey Denizi kıyısında 300 kW’lık Voith-Hütter türbini kurulmuştur. 1997 yıllarında buzlu ve soğuk yerler için rotor kanadı siyah yapılmıştır. 1998’de 1,5 MW’lık Enercon E66 rüzgar türbinlerinden oluşan Almanya’da Avrupa’nın en büyük rüzgar çiftliği (52,5 MW) kurulmuştur.



15m/s Rüzgar Hızında 20 MW Güç Üretmek İçin Tasarlanan Türbin



Şekil 1.2 Pers Uygarlığında kullanılan yel değirmeni

1941 yılında ABD’de Vermont, Rutland yakınlarında Grandpa’s Knob’da kurulan Putnam rüzgar türbini, 1250 kW gücü ile o dönemin en büyük rüzgar kuvvet makinesi olmuştur.



Şekil 1.3 Putnam rüzgar türbini

1.4 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

1973-1978 yılları arasında Tarım Bakanlığı tarafından yapılan 871 adet su çıkarma ve 23 adet elektrik üretim amaçlı rüzgar türbini olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu rüzgar makineleri güçleri 1 kW’nın altında güce sahip olup, yerli olanları ilkel yapıydı. Türkiye’de rüzgar enerjisi üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar 1960’larda Ankara Üniversitesi, 1970’lerde Ege Üniversitesi daha sonraki yıllarda ODTÜ’de yapılmış olup, 1980’li yıllarda TÜBİTAK-MAM’da bünyesinde bazı çalışmalar yapılmıştır. MAM’da ilk rüzgar atlası çalışması başlatılmıştır. Gebze-Özbek tepede pompa çalıştırma ve elektrik üretim amaçlı çeşitli rüzgar türbinleri kurularak denenmiştir. Ancak pompa çalıştırmak için seçilen makine büyük elektrik üretimi için seçilen makine küçüktür. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar atlası ile ısı haritalarının oluşturulması için Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından sürdürülen ve kullanılabilir ilk sonuçları alınmış bir çalışmada vardır. EİE’nin girişimleri ilk 1992 yılında Bakanlar Kurulu kararına dayanarak, Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi (AREB – TŞ) kurulmuştur. Bugün Türkiye’de gücü 1 kw üzerinde ve çalışır durumda olan elektrik üretim amaçlı çok sayıda rüzgar türbini vardır.

Ülkemizde rüzgâr enerjisiyle ilgili çalışmaların başlangıç tarihi çok eskilere dayanmamaktadır. Bu konudaki çalışmaları ilk başlatan kurum 1980’ lı yılların ortalarında Elektrik İşleri Etüt İdaresi olmuştur. Başlangıç çalışmaları rüzgâr potansiyelini tespit amacıyla gerçekleştirilen etüt faaliyetlerinden ibarettir. Hatta bu yıllarda rüzgâr enerjisini konu alan herhangi bir kanuni düzenleme bulunmamaktaydı. 1995 yılından başlayarak bazı küçük uygulamalar Yap - İşlet - Devret modeliyle gerçekleştirilmiştir. Türkiye’de ilk rüzgâr santrali Demirer Holding’in Çeşme’ de kurduğu santraldir.

İzmir Çeşme Germiyan' da (1.5MW), Alaçatı' da (7.2MW); Çanakkale Bozcaada'da (10.2MW); İstanbul Hadımköy' de(1.2MW) gerçekleşen rüzgâr santralleri bu şekilde ortaya çıkmıştır.

Türkiye bugün tükettiği enerjinin yaklaşık %4,5'ini rüzgar santrallerinden karşılıyor.Türkiye'de, 2013 yılı sonu yıllık rüzgar enerjisi üretim miktarı 7.518 GWh'dir. 2013 yılı sonu itibarıyla işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü ise 2.760 MW'dır.



Şekil 1.4 Elektrik Üretimi İçin Kurulu Kapasite

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye 126 adet rüzgar enerji santrali bulunmakta lisansında ki güç 4465,10MW'dır.

1.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de en büyük pay fosil yakıtlarına aittir. Enerji tüketimimizin yarıya yakınına karşılaman petrol ve doğal gaz kaynakları Türkiye’de yeterli düzeyde değildir. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça iyi durumdadır. 1961 yılında yapılan bir araştırmaya göre dokuz ile yayılmış olarak 718 tane su çıkarma amaçlı ve 41 tane de elektrik üreten rüzgar türbini tespit edilmiştir.

Türkiye’nin toplam rüzgar enerji potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgar hızının yer yüzeyinden 10 metre yükseklikte, 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğunun 24 W/m² olduğu belirlenmiştir. Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin rüzgar gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir. Türkiye’de Marmara, Ege ve Akdeniz kıyıları, dünyada rüzgar gücü potansiyeli açısından ilk %30’luk alana girmektedir.

Ülkemizde 1984 yılında kurulmuş olan 55 kW kapasiteli bir rüzgar türbini Çeşme’de turistik bir tesisin elektrik enerjisi ihtiyacının %5’ini karşılamaktadır. Ticari amaçlı ilk rüzgar santrali olan Alaçatı’nın Germiyan Köyü’nde kurulmuş otoprodüktör statüsündeki 1,5 MW kurulu gücündeki santral, yılda yaklaşık 5.000.000 kWh enerji üreterek çevre bölgede yaşayan beş bin kişinin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Ayrıca 7,2 MW kapasiteli Alaçatı Rüzgar Santrali 1998 yılında üretime başlamıştır. Bunların yanı sıra, Bodrum Belediyesi ve Çanakkale İntepe Belediyesi kendi elektrik ihtiyaçlarını rüzgar enerjisinden karşılamak için girişimlere başlamışlardır. Bodrum Yarımadası’nın 1998 yılı tüm elektrik ihtiyacını 100 adet rüzgar türbini ile karşılamak mümkündür.

Çeşitli firmalar da rüzgar hızının fazla olduğu yerlerde, enterkonnekte sisteme bağlı rüzgar enerjisi projelerinin ön fizibilite çalışmalarına devam etmektedir.

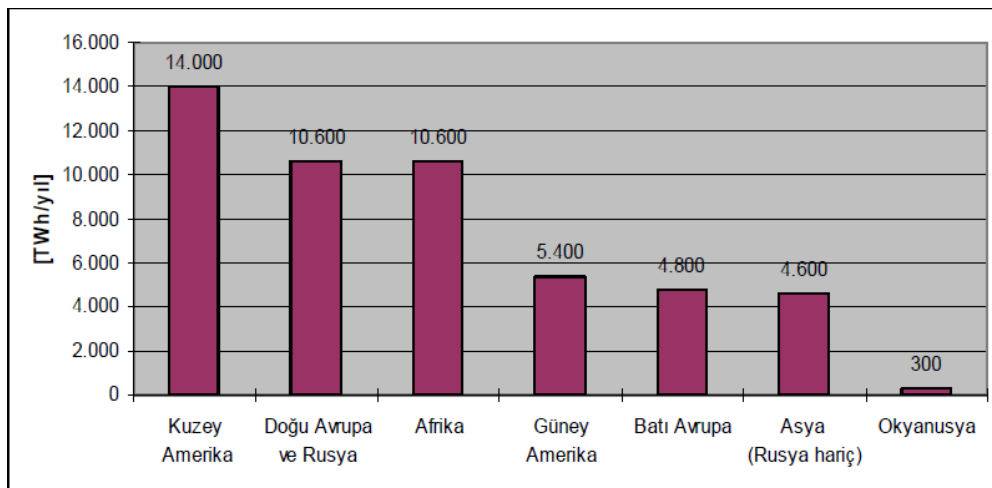
Elektrik Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu güç (MW)	Firma	Yer
Şubat 1998	1,5	Demirer	Çeşme - İzmir
Kasım 1998	7,2	Güçbirliği	Çeşme - İzmir
Haziran 2000	10,2	Demirer-Enercon	Bores - Çanakkale
Kasım 2003	1,2	Sunjut-Demirer	Hadımköy - İstanbul
2004 Yılı Mevcut RES’ ler	20,1		
Mayıs 2006	30,0	Bares -Bilgin	Bandırma
Ağustos 2006	39,2	Demirer-Enercon	Çeşme İzmir
Kasım 2006	30,4	Demirer-Ado	Çanakalan - Çanakkale
2006 sonunda üretime geçecek RES’ler	99,6		
Mart 2007	15,0	Demirer-Polat	Gelibolu - Çanakkale
Mayıs 2007	30,4	Demirer-Polat	Sayalar - Manisa
Aralık 2007	28,8	Demirer-Enercon	Dares - Datça
2007’de üretime geçmesi planlanan RES’ler	74,2		
TOPLAM	193,9		

Tablo 1.1’de 1998-2007 yılları arasında Türkiye’deki Rüzgar santralleri Yapılan fizibilite çalışmaları.

Türkiye'nin özellikle Marmara ve Ege Bölgelerinin rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri için uygun olduğunu göstermiştir. Elektrik sarfiyatının en yüksek olduğu bölgelerin Marmara ve Ege olduğu göz önüne alınırsa buralara kurulacak olan rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri ile elektriğin iletimi sırasında ortaya çıkacak kayıpların da azalacağı açıktır. Ayrıca, yapılan son kanuni düzenlemelerde özel şirketlerin kuracağı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin ulusal şebekeye vereceği elektrik enerjisini satması veya verdiği elektrik enerjisi kadarını kullanması gündeme gelmiştir.

1.6 Dünya'da Rüzgar Enerjisinin Durumu

Grubb ve Meyer tarafından yapılan ve “ IEA – World Energy “ tarafından yayınlanmış çalışmada, 5,1 m/s üzerinde Rüzgar kapasitesine sahip bölgelerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile %4'ün kullanılacağı esasına dayalı çalışmada, Dünya Potansiyeli 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerin Dünyadaki dağılımı, Şekil 1.5'de verilmektedir. Bu hesaplamalar sadece karasal bölgeler için yapılmıştır, dikkate alınmayan denizsel bölgelerin de ihmal edilemeyecek ciddi bir potansiyeli mevcuttur. Şekil 1.5'te belirtilen, teknik potansiyelin (53.000 TWh/yıl) 2020 yılı için tahmin edilen Dünya tüketiminin 25.900 TWh/yıl civarında olacağı düşünülünce, ne denli ciddi olduğu görülmektedir.



Tablo 1.2 Dünyanın teknik rüzgar potansiyel dağılımı.(Dünya toplamı 53.000 TWh/yıl)

1.7 Dünya’da Rüzgar Kaynağı Kullanım Hedefleri

Dünya elektrik enerjisi talebi, WEC ve IEA tarafından sürekli değerlendirilmektedir. WF-10 ve WE Outlook, bunlardan en önemlileridir. WF-10 bilahare (1998) WF-12 olarak yeniden revize olarak ortaya konmuştur. 2000 yılında güncelleştirilen, dünya elektrik enerjisi talep projeksiyonu ve rüzgar kaynaklı üretim hedefleri, Şekil 1.6’daki gibi yayınlanmıştır.

Yıllar	Yeni Kapasite ilavesi [MW]	Kümülatif Kapasite [MW]	Rüzgar’dan Üretim [TWh / yıl]	Dünya Elektrik Talep Proj. [TWh / yıl]	Rüzgar Oranı [%]
2001	6.800	24.900		15.578	0,35%
2002	8.500	33.400		16.014	0,46%
2003	10.625	44.025		16.463	0,59%
2004	13.281	57.306	125,5	16.924	0,74%
2005	16.602	73.908	161,9	17.397	0,93%
2006	20.752	94.660	207,3	17.885	1,16%
2007	25.940	120.600	264,1	18.385	1,44%
2008	31.128	151.728	332,3	18.900	1,76%
2009	37.354	189.082	414,1	19.429	2,13%
2010	44.824	233.906	512,3	19.973	2,56%
2011	53.789	287.695	705,7	20.493	3,44%
2012	64.547	352.242	864,0	21.025	4,11%
2013	74.229	426.471	1.046,0	21.572	4,85%
2014	85.363	511.834	1.255,4	22.133	5,67%
2015	98.168	610.002	1.496,2	22.708	6,59%
2016	107.985	717.987	1.761,1	23.299	7,56%
2017	118.783	836.770	2.052,4	23.905	8,59%
2018	130.661	967.431	2.372,9	24.526	9,68%
2019	143.727	1.111.158	2.725,4	25.164	10,83%
2020	150.000	1.261.158	3.093,4	25.883	11,95%
2030	150.000	2.551.277	6.306,8	31.318	20,14%
2040	150.000	3.044.025	7.999,7	36.346	22,01%

Tablo 1.3 Dünyada planlanan rüzgar enerjisi gelişmesi

2001 yılında 24.700 MW olan Rüzgar Kurulu Gücünün 2007 yılında 120.600 MW’a yıllık % 25’lik bir artışla yükseleceği, daha sonra bu artış oranının düşerek, Kurulu Gücün 2020 yılında 1.261.158 MW’a çıkacağı, bu tarihten sonra sıfır artış hızı ile (yılı sabit 150.000 MW Kurulu Güç ilavesi ile) 2030 yılında 2.551 GW, 2040 yılında ise 3.044 GW Kurulu Güce ulaşılacağı hedeflenmiştir. Bu tarihte,

Rüzgar Enerjisi kullanımında doyum noktasına gelineceği varsayılmaktadır. Ayrıca, 20 yıl olarak tahmin edilen türbin ömürlerinin sonunda % 5'inin yeni teknolojiye dayalı türbinler ile değiştirileceği düşünülmektedir. İleride tesis bedellerinin % 50'sine kadar düşebileceği varsayılan rüzgar enerjisi tesislerinin, birim elektrik enerjisi maliyetinin de 3,61 €/KWh seviyelerine inebileceği düşünülmektedir.

Dünyada Rüzgar Enerjisi konusunda asıl büyüme oranının, Kuzey Avrupa, ABD ve Japonya'da denizsel kapasitelerde olacağı tahmin edilmektedir. Bu potansiyelin, özellikle ABD ve Japonya'da oluşmakta olan elektrik enerjisi talebinin, iki katına yakın (%180) potansiyel içerdiği hesap edilmektedir.

2020 yılı itibari ile dünyada planlanan, rüzgar kaynağına dayalı elektrik üretimi ile ilgili kurulu güç ve yıllık üretim ile dünyanın 2020 yılındaki elektrik enerjisi talep tahmininin dağılımı, Tablo 1.4'de verilmektedir.

Bölgeler	Kurulu Güç Dağılımı [MW]	Kurulu Güç Dağılım Oranı [%]	2020 Toplam Elektrik Talep Tahmini Dağılımı [TWH / yıl]
OECD Avrupa	230.000	18,3 %	4.514
[OECD] Amerika	250.000	19,8 %	5.729
[OECD] Kanada	60.000	4,8 %	–
Latin Amerika	100.000	7,9 %	1.745
OECD Pasifik	90.000	7,1 %	2.041
Doğu Asya	80.000	6,3 %	2.081
Güney Asya	60.000	4,8 %	1.695
Çin	190.000	15,1 %	3.691
Orta Doğu	25.000	2,0 %	907
Afrika	25.000	2,0 %	2.615
Diğer Ülkeler	150.000	11,9 %	864
Dünya Toplamı	1.260.000	100,0%	25.882

Tablo 1.4 Dünya rüzgar kurulu gücünün dağılımı.(2020 projeksiyonu IEA World Energy)

2003 yılı AB ülkelerine ait rüzgar kurulu güçleri Tablo1.5’de verilmiştir.

Ülkeler	Rüzgar (MW)				Toplam Kurulu Güç (MW)		Rüzgarın Toplamdaki Payı (%)	
	2002	2003	2003'te giren	%	2002	2003	2002	2003
Almanya	11.994	14.609	2.645	21.8	124.420	126.531	9.6	11.5
İspanya	5.042	6.411	1.369	27.2	59.738	63.819	8.4	10.0
Danimarka	2.889	3.110	243	7.6	12.879	12.948	22.4	24.0
İtalya	788	904	116	14.7	76.950	78.358	1.0	1.2
Hollanda	685	910	232	32.8	20.813	20.965	3.3	4.3
İngiltere	552	648	103	17.3	77.133	78.200	0.7	0.8
İsveç	328	399	71	21.6	32.263	33.361	1.0	1.2
Yunanistan	302	390	88	29.1	10.990	10.990	2.7	3.5
Portekiz	194	301	107	55.2	11.450	11.654	1.7	2.6
Fransa	153	253	100	65.2	116.200	116.380	0.1	0.2
İrlanda	138	187	49	35.5	5.400	5.550	2.6	3.4
Avusturya	139	415	276	198.6	17.799	17.842	0.8	2.3
Finlandiya	43	51	8	18.6	16.566	16.647	0.3	0.3
Belçika	35	67	31	89.2	15.627	15.684	0.2	0.4
Lüksemburg	16	22	5	32.9	1.129	1.129	1.4	1.9
Avrupa Birliği (AB- 15)	23.299	28.676	5.443	23.1	599.357	610.058	3.9	4.7
Polonya	29	60	31	108.8	31.013	31.699	0.1	0.2
Letonya	23	24	1	4.3	2.175	2.141	1.1	1.1
Çek	3	10	7	233.3	15.133	16.005	0.0	0.1
Estonya	5	5	0	0.0	2.427	2.427	0.2	0.2
Macaristan	3	3	0	0.0	7.492	7.998	0.0	0.0
Slovakya	0	3	3	0.0	7.757	7.777	0.0	0.0
Kıbrıs	2	2	0	0.0	988	988	0.2	0.2
Litvanya	0	0	0	0.0	5.761	5.784	0.0	0.0
Malta	0	0	0	0.0	577	577	0.0	0.0
Slovenya	0	0	0	0.0	2.729	2.772	0.0	0.0
Avrupa Birliği (AB-25)	23.360	28.780	5.486	23.2	675.409	688.226	3.5	4.2
Türkiye	19	19	0	0.0	31.846	35.587	0.1	0.1
Romanya	1	1	0	0.0	17.846	35.502	0.0	0.0

**Tablo 1.5 2003 yılı itibariyle Avrupa Birliği'nde kurulan rüzgar kurulu gücü
(Rüzgar kurulu gücü için EurObserv'ER 2004, toplam kurulu güç için
Eurelectric istatistikleri)**

BÖLÜM 2 RÜZGAR TÜRBİNLERİ SINIFLANDIRILMASI

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir makinedir. Şekil 2.1’de çoğunlukla kullanılan türbin tipleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Rotor Tipi		C_p	Rpm	Tork	Kullanım Yeri
PERVANE TİPİ		0,42	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
DARRIEUS TİPİ		0,40	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
CYLOGIRO TİPİ		0,45	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
ÇOKKANAT TİPİ		0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
YELKEN KANAT TİPİ		0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
FAN TİPİ		0,30	Orta	Orta	Su Pompalama
SAVONIUS TİPİ		0,15	Alçak	Yüksek	Su Pompalama
HOLLANDA TİPİ		0,17	Alçak	Yüksek	Su Pompalama ve Değirmen

Tablo 2.1 Rüzgar türbin tipleri ve kullanım alanları

2.1 Türbinlerin Sınıflandırılması

Rotor ekseninin yeryüzüne göre konumuna göre sınıflandırma ;

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri

2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip rüzgar türbinleri, dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel, kanatları ise rüzgarın esme yönüne dik olarak çalışırlar. Kanatların rüzgarın esme yönüne dik olması ile türbin rotoru maksimum enerjiyi tutabilmektedir. Kanatlardaki kaldırma kuvveti rotorun dönmesini sağlar. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin, rüzgarı önden ve arkadan alan tasarımlar olmak üzere iki tipi mevcuttur (Şekil 2.1). Yatay eksenli türbinlerin kule üzerinde yatay eksen yönündeki hareketi, motorlar (rüzgar veya elektrik), rüzgara yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgarı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açılı ile sağlanır .



Şekil 2.1 Rüzgarı Önden ve Arkadan Alan Yatay Eksenli Türbin Tasarımları

türbinlerden %6 daha verimsizdirler. Ayrıca tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır.

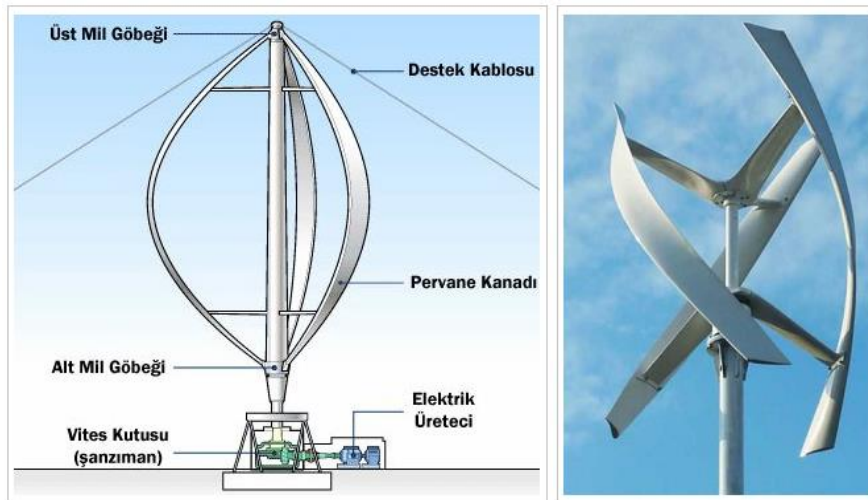
Yüksek rüzgar hızlarında çalışan türbinlerde, kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir.

2.3 Düşey Eksenli Rüzgar Türbini

Düşey eksenli türbinlerde, kanatların iç bükey ve dış bükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşmaktadır. Bu türbinlerin dönme eksenleri düşeydir. Çalışma basitliğinden dolayı kullanılan en eski rüzgâr türbini çeşididir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşük verime sahiptir .

Rotor Tipi	λ (kanat uç hız oranı)	C_p (Güç Katsayısı)	Kullanım Amaçları
Pervane Tipi	3-10	0,42-0,57	Elektrik Üretimi
Darrieus Tipi	5-6	0,40	Elektrik Üretimi
Cyclogiro Tipi	3-4	0,45	Elektrik Üret. veya su pomp.
Fan Tipi	1	0,3	Su Pompalama
Çok Kanatlı Tip	3-4	0,35	Elektrik Üret. veya su pomp.
Yelken Kanat Tipi	4	0,35	Elektrik Üret. veya su pomp.
Savonius Tipi	1	0,15	Su Pompalama
Hollanda Tipi	2-3	0,17	Su Pomp. veya değirmen

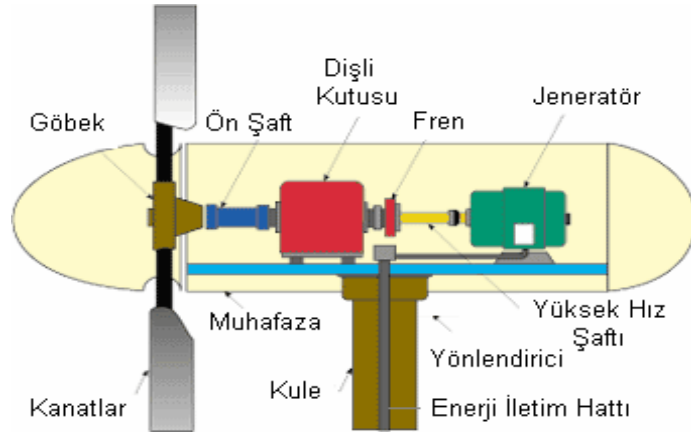
Tablo 2.2 Bazı yatay ve düşey eksenli rüzgar türbin tipleri ve kullanım amaçları



Şekil 2.3 Düşey Eksenli Rüzgar Türbini

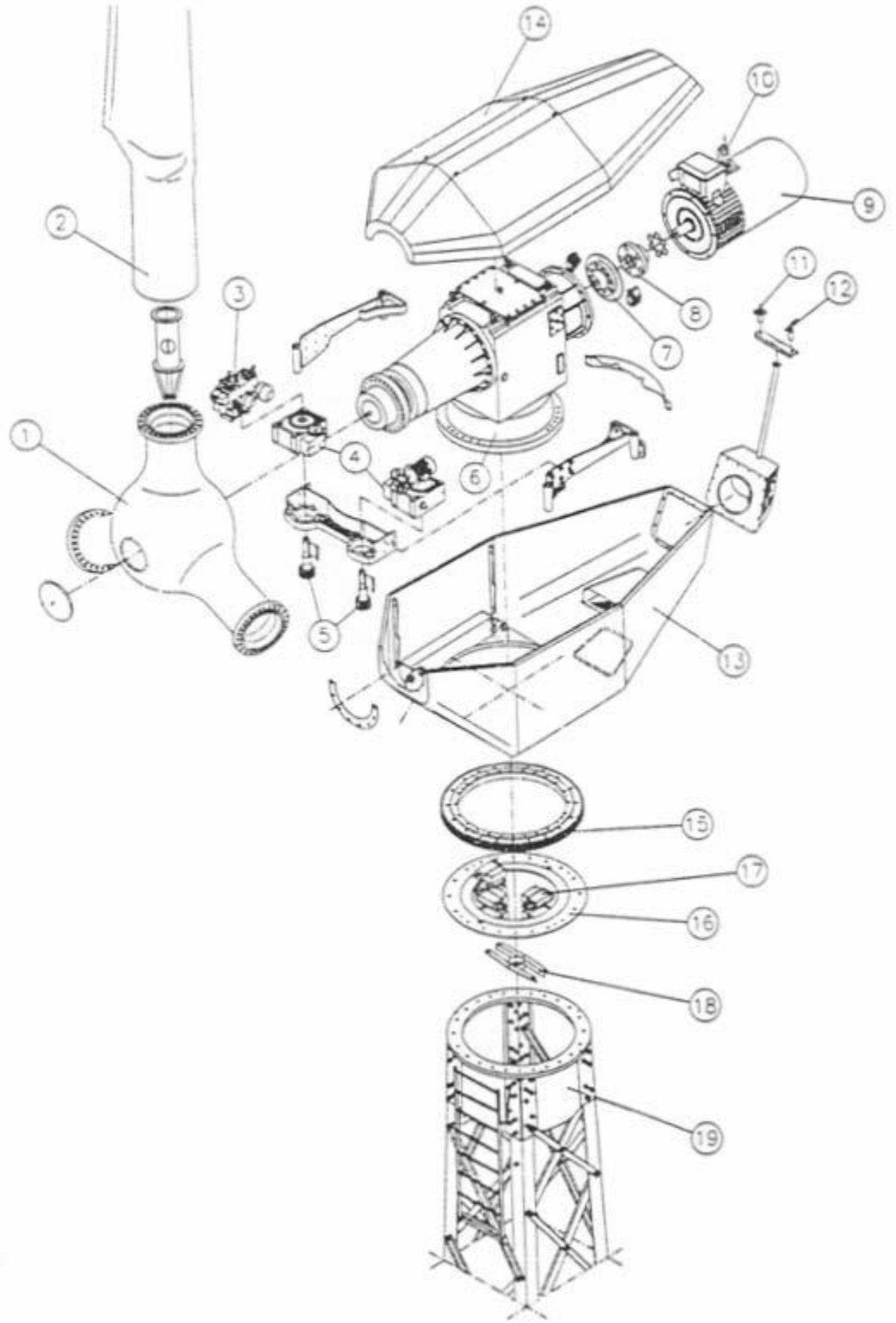
BÖLÜM 3 RÜZGAR TÜRBİNİ EKİPMANLARI

Rüzgar türbinleri rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, mekanik enerjiden de elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgar türbini; kule, pervane, gövde, yüksek ve düşük hız şaftları, dişli kutusu, frenleme sistemi, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, yaw mekanizması ve jeneratör kısımlarından meydana gelmektedir. Şekil 3.1’de rüzgar türbinine ait ekipmanlar ve bu ekipmanların konumları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Rüzgar Türbininin Başlıca Elemanları

Rüzgar türbinleri tasarım ve konstrüksiyona göre farklı elemanlardan oluşabilir. Fakat her türbinde özellikleri farklı olsa da aynı görevi üstlenen benzer bileşenler vardır. Şekil 3.2’de bir türbinin bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Türbin Bileşenleri

Şekildeki türbin bileşenleri aşağıda belirtilmiştir.

1. Hub (Kanat Gövdesi)
2. Kanatlar
3. Hidrolik İstasyon
4. Yönlendirme Sistemi Elemanları
5. Yönlendirme Sistemi Kontrol Dişlileri
6. Ana Dişli Kutusu
7. Fren Diski
8. Jeneratör Kuplajı
9. Jeneratör
10. Titreşim Sensörü
11. Anemometre
12. Rüzgar Yönü Belirleme Sensörü
13. Alt Muhafaza Kutusu
14. Üst Muhafaza Kutusu
15. Yönlendirme Sistemi Ana Dişlisi
16. Yönlendirme Sistemi Fren Diski
17. Yönlendirme Sistemi Kalibrasyonu
18. Kablo Geçiş Elemanı
19. Kule

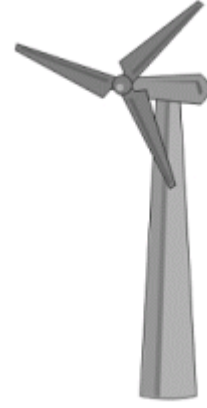
3.1 Kule

Kule silindirik konik yapıdadır. Bu yapı sıcak çekilmiş sac ile oluşturulur ve kulenin tasarımına uygun olarak , iki veya üç metrelik merdanelerde, konik profiline uygun olarak bükülür. Konik bükme tekniği oldukça zordur. Çelik plakanın konik bükülebilmesi için merdane yüzeylerinde farklı kuvvetlerin oluşturulması gerekir. Segmentler halinde üretilen kule elemanlarının, alt ve üst yüzeylerine, içeriden flanşlarla kaynatılır. Burada kullanılan flanşlar kule elemanlarının cıvata ile birbirine bağlanmasına imkan verir. Kuleler, flanşlarla monte edilebildiği gibi kaynaklama ile de monte edilebilir. Kuleler, 20m 'den başlamakta, rotor çapına göre 100m 'ye kadar çıkabilir. Büyük kuleler; flanşlı modüller halinde montaj veya taşınabilecek boyutlarda kaynaklı olarak üretilir.

Örneğin, 44m 'lık bir rotor çapına sahip, 600 kW 'lık bir türbinin 50m yükseklikte ve 40 ton ağırlığında kuleye ihtiyacı vardır. Türbinin her bileşeni yapısal, dinamik ve aerodinamik testlerden geçirilmelidir. Kuleler silindirik tüp biçiminde veya çelik kafes biçiminde olabilir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11-20' si kule imalatına aittir.



çelik kafes



silindirik tüp

3.2 Rotor Kantları (Pervaneler)

Pervane; gelen rüzgar hareketini, şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, buradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadına çarpan rüzgar, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe, daha dik bir açıdan gelir. Rotor kanadı çok dik bir rüzgar geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgarın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı burulmak zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgarla aynı yöne doğru itilir.

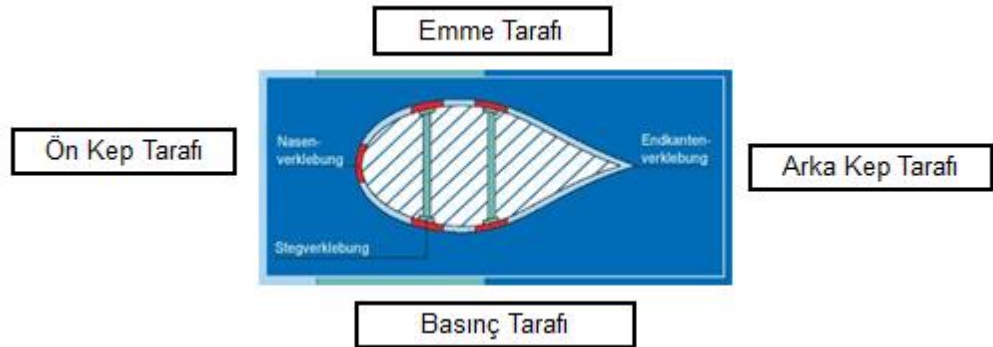
Çoğu modern rüzgar türbin rotor kanatları cam lifli polimer GFRP (*Fiber Reinforced Polymers/Plastic*) yapılıdır (Şekil 5.6). Diğer kullanılan malzeme ise karbon lifli polimer CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) veya aramid lifli polimer AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers*) dir. Ancak bunlar, büyük türbinler için ekonomik değildir. Çelik veya alüminyum karışımlarının ağırlık ve malzeme yorulmasından kaynaklanan problemleri olmakla beraber küçük türbinler için günümüzde kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 Tipik Bir Türbin Pervanesinin Görünümü

Türbin kanatları sabit veya değişken açılı olabilir. Bazı tasarımlarda rotor frenlediğinde açığı arttıran özel bir regülatör kullanılarak başlatma kolaylaştırılır. Sabit kanat açılı yüksek hızlı rüzgar türbinlerinde, jeneratör başlama esnasında motor gibi davranır ve dönme hızı nominal hıza ulaştığında jeneratöre dönüşür. Rotor kanatları veya pervane, helikopterlerde olduğu gibi en önemli bileşenlerin başında yer almaktadır. Helikopterlerden farklı olarak, kanatçık airfoillerinin çoğu zaman az bir zorlanma ile çalışması istenir.

Rüzgâr Türbini Kanadının kök kısmından uç kısmına gidildikçe kesitte değişim olmaktadır. Kanadın birleşim yerinde oluşacak momentten tutun da, yüzeyine etkiyecek yüklere ve uca doğru gidildikçe oluşacak yüksek çevresel hızlara, kanat boyuna ve yüzey genişliğine ve kalınlık dağılımı vb. gibi daha birçok tasarım parametresine göre profil kesitinin değişimi kaçınılmazdır.



Burada rüzgârı kesen kenar Ön Kep (Leading Edge), Rüzgarın kesitten çıktığı kenar Arka Kep (Trailing Edge), rüzgârı gören yüzey Basınç Yüzeyi (Pressure Face), rüzgârı gören yüzeyin arkasındaki yüzey de Emme Yüzeyi (Suction Face) olarak adlandırılır.

Basınç Yüzey'ine gelen rüzgârın oluşturduğu kuvvetlerin, emme kabuğuna aktarılması için iki kabuk arasında bulunan perde şeklindeki elemanlara da kesme perdesi ya da omurga (Shear Web) olarak isim verilmektedir.

3.2.1 Kanat sayısının etkisi

Türbin dizaynında ilk göz önüne alınması gereken parametre kanat sayısıdır. Rüzgar makineleri kanat sayısı 2 ile 40 arasında değişecek şekilde dizayn edilebilirler. Kanat sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hızı oranlı rotorlar için kullanılırlar. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir. Yüksek uç hızı oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanır. Kanat sayısı kararlaştırılırken dikkat edilecek ana faktörler;

- Güç katsayısı üzerine etkisi
- Uç hız oranı (Bu oran pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır)
- Maliyet

Önceleri tek kanatlı ve 2 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılsa da, günümüzde yaygın olarak 3 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılır. 3, 2 ve 1 kanatlı türbinlerin karşılaştırılması aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 3 kanatlı rüzgar türbinleri, 2 kanatlılara göre daha düzgün bir çıkış gücüne sahiptir.
- 3 kanatlı rüzgar türbinleri Avrupa'da daha yaygın olmakla birlikte, yaklaşık 1MW'lık türbinlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamışlardır.
- 3 Kanatlı pervanenin diğer bir avantajı da bu tipte tüm hızlarda sabit atalet momentini meydana gelir. Bu avantajından ötürü rüzgar türbinleri üzerinde ek bir yük meydana gelmemektedir.
- 2 kanatlı rüzgar türbinlerinin bir kanat eksik olmasından dolayı maliyet ve ağırlık gibi avantajları vardır.
- 2 kanatlı rüzgar türbinleri aynı çıkış gücünü verebilmeleri için daha büyük döndürme hızına ihtiyaç duyarlar. Bu gürültü kirliliği açısından büyük bir dezavantajdır.
- 2 kanatlı rüzgar türbinleri dönmeden dolayı meydana gelen ve kulenin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum türbin üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve bu durum sadece sallanan göbek (teeterin hub) ile giderilebilir. Sallanan göbek kullanılmasının nedeni, dönen pervane üzerinde büyük atalet momentini değişimlerinin etkilerini önlemektir.

- Sallanan göbek gereksiniminden dolayı 2 kanatlı rüzgar türbinleri daha kompleks bir yapıya ihtiyaç duyarlar. Bu dizayn öyle olmalıdır ki, sallanan göbek ihtiva etmelidir. Bu sayede, rotor, rotor kanatları kuleyi geçtiği zaman şiddetli şoklardan korunabilmek için eğilme özelliğine sahiptir.
- 1 kanatlı rüzgar türbinlerinin avantajı kanattan tasarruf etmektir.
- 1 kanatlı türbinlerde yüksek hız gereksiniminden dolayı gürültü problemlerine ek olarak rotoru dengelemek için ters yönde ağırlık takviyesine gereksinim duyulur. Bu durumda açıkça 1 kanattan kaynaklanan maliyet avantajı yok olur.

3.3 Rüzgar Türbini Frenleme Sistemi

Modern rüzgar türbinlerinin fren tertibatı aerodinamik fren sistemi ve mekanik fren sistemi olmak üzere ikiye ayrılır. Aerodinamik fren sistemi, rotor kanatlarının boyuna eksen etrafında yaklaşık 90° 'lik döndürülmesini (derece veya aktif kontrollü türbinler için geçerli) veya rotor kanat uçlarının 90° döndürülmesini esas alır. Türbin kanatları sabit veya değişken açılı olabilmesi durumu aerodinamik fren sisteminin tasarımını etkileyen bir faktördür. Rotor kanatları bölümünde bu tasarım açıklanmıştır.

Mekanik frenleme sistemi ise türbinin kontrollü bir şekilde durdurulması için aerodinamik frenleme sistemlerine destek vermek amacıyla kullanılır. Devir sayısının belirli bir değerden sonra sabit tutulmasında, belirli bir sınırı aşmasına engel olunmasında, çarkın korunmasında etkilidir. Mekanik fren sistemi, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşur. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir.

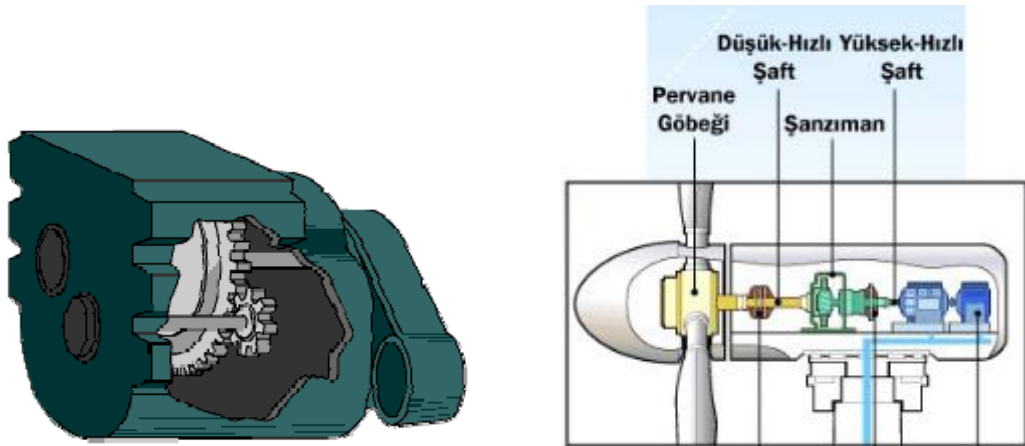


Şekil 3.4 Mekanik Frenleme Sistem

Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekir. Yağ basıncı olmadığında, fren blokları fren diskini sıkıştırır. Genel olarak frenleme sistemi, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur.

3.4 Dişli Kutusu

Pervaneden gelen düşük devirli torku, jeneratöre uygun yüksek devirli torka yükselten bir kuvvet aktarma mekanizmasıdır. Jeneratörlerin elektrik üretebilmeleri için dakikada 1200-1550 devirlik bir döndürme yükü almaları gerekmektedir. Genellikle rüzgar, rotoru bir dişli kutusu üzerinden elektrik jeneratörünü sürer. Rotorun göbeği rüzgar türbinin düşük hız şaftına bağlıdır. Modern 600 kW'lık rüzgar türbinlerinde rotor düşük hızla yaklaşık olarak dakikada 19 ile 30 devir arasında döner. Şaft hidrolik sistemin borularını içerir. Bunlar aerodinamik frenlerin çalışmasını sağlar. Dişli kutusu, düşük hız şaftı vasıtasıyla aldığı torku, yüksek hız şaftına ileterek, düşük hız şaftından 50 kat daha hızlı olarak sağa doğru döndürür. Yüksek hız şaftı dakikada yaklaşık 1500 devirle döner. Elektrik jeneratörünü yüksek hız şaftı çalıştırır. Dişli kutuları acil mekanik disk frenleri ile donatılmışlardır. Mekanik fren, aerodinamik frenin arızalanması durumunda veya türbin tamiri yapılırken kullanılır.



Şekil 3.5 Rüzgar Türbin Dişli Kutusu

3.5 Yaw (Saptırma) Mekanizması

Üç kanatlı türbinlerin rotorları, rüzgara doğru konumlanır. Yaw mekanizması burada rüzgarın hız değişimine göre, rotor kafasını, rüzgara dik tutacak şekilde ayarlamasını sağlar. İki kanatlı rotorlar ise kafalarını rüzgar doğrultusuna ters konumlandıkları için, yaw mekanizmasına ihtiyaç duymazlar.

Rotorun rüzgara dik olmadığı durumlarda rüzgar türbinin bir yaw (rotadan çıkma) hatasına sahip olduğu söylenir. Bir yaw hatası, rüzgardaki enerjinin düşük bir parçasının rotor alanına doğru akmasını ifade eder. Yaw kontrolü, rüzgar türbin rotorunun güç girişi kontrolünün en iyi yoludur. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hemen hemen tümünde yaw döndürme kuvveti kullanılır. Bu türbinlerde, rüzgara karşı elektrik motoru ve dişli kutuları kullanarak, döndürülen türbini tutan bir mekanizma vardır. Türbin çalıştırıldığında, pervane kanadı, konumunu belirli zaman aralıklarında elektronik kontrollerle yaw mekanizması vasıtasıyla hareket ettirir.



a) Yaw yatağı



b) Yaw motoru

Şekil 3.6 Yaw mekanizması (saptırma) yatağı ve yaw motoru

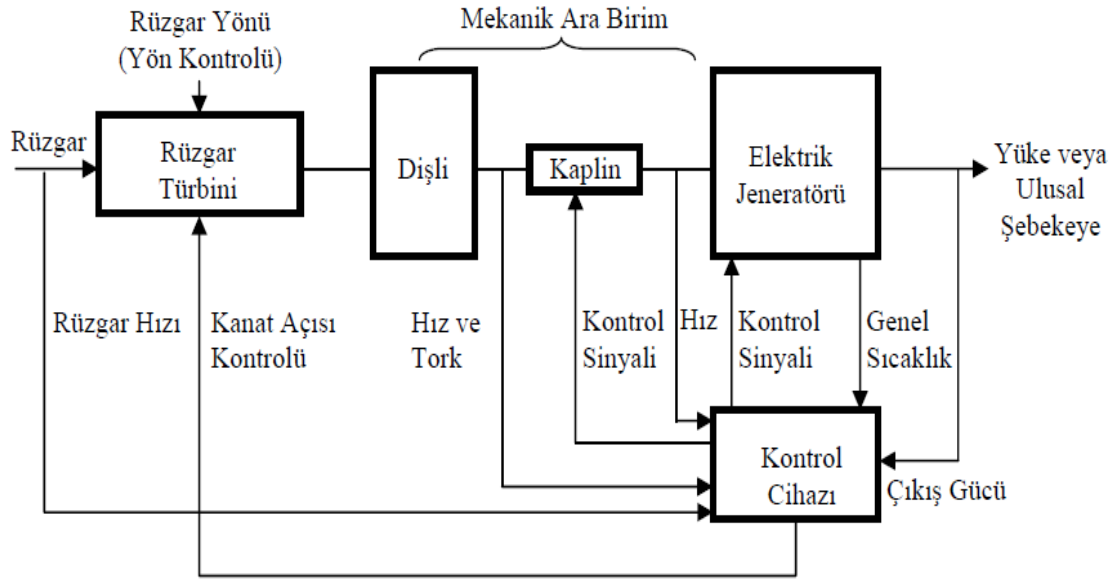
3.6 Rüzgar Jeneratörü

Basit bir jeneratörün çalışma prensibi; ilk olarak rotordan bir hareket sağlanır. Örneğin rüzgar, su vs. gücüyle türbin rotor miline hareket verilir. Verilen hareket sonucu, rotor sargılarındaki elektronlar göreceli olarak hareket ettiği için geleneksel motor durumunun tersi yönde bir döner manyetik alan oluşturur. Bu alan statorda elektrik akımı indükler ve statordan elektrik akımı çekilmeye başlanmasıyla elektrik enerjisi üretilmiş olur.

Genellikle rüzgar, pervaneyi bir dişli kutusu üzerinden hareket ettirerek elektrik jeneratörünü sürer. Dişli teknolojisinde ortaya çıkan gelişmeler ve düşük hızlı elektrik jeneratörlerinin maliyetinin yüksek olması, küçük sistemler dışında pervanenin jeneratör tarafından doğrudan sürülmemesi eğilimine yol açmaktadır. Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri az kanatlı ve yüksek hızlı makinelerdir.

Yüksek hızda çalışmalarının nedenleri;

- Eşit çaptaki yüksek hızlı bir rüzgar türbini, düşük hızlı bir rüzgar türbininden daha hafif dolayısıyla daha ekonomiktir.
- Dönme hızları daha yüksek olduğu için gerekli çevrim oranı daha düşüktür. Bu nedenle dişli kutusu daha hafiftir.
- Elektrik jeneratörünün çalışmaya geçmesi için gerekli başlangıç torku küçüktür. Rüzgar elektrik sisteminin genel bileşenleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Hareketli havadan mekanik enerji şeklinde elde edilen enerji, uygun bir kaplin ve dişli kutusu içeren mekanik aktarıcı yoluyla elektrik jeneratörüne aktarılır. Jeneratörden alınan elektrik çıkışı, uygulamaya göre bir yüke veya güç şebekesine bağlanır.



Şekil 3.7. Rüzgar Enerjisi Elektrik Sisteminin Genel Bileşenleri

Bu tür sistemlerde kullanılan kontrol cihazı, bir ya da daha fazla noktada rüzgar hızı ve yönü, mil hızları ve torkları (döndürme momenti), çıkış gücü ve gerekli ise jeneratör sıcaklığını algılayarak kanat açısı kontrolü, yön kontrolü (sadece yatay eksenli rüzgar türbinlerinde), yapmak ve rüzgar enerjisi girişi ile elektrik enerjisi çıkışını eşleştirmek amacıyla jeneratör kontrolü için uygun sinyalleri üretir. Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemleri gösteren akış şeması yukarıda verilmektedir.

Rüzgar türbinlerinde genel olarak iki tip jeneratör kullanılır.

Bu jeneratörler;

1. DC (Doğru Akım) Jeneratörler
2. AC (Alternatif Akım) Jeneratörler
 - a) Senkron Jeneratörler (Alternatörler)
 - b) Asenkron (İndüksiyon) Jeneratörler

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

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

3.7 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri

Rüzgar türbininden sürekli yüksek bir verim alabilmek için rotor güç katsayısı değerinin devamlı olarak maksimumda tutulması gerekir. Teorik olarak (güç faktörü) C_p 'nin maksimum değeri 0,59 iken, pratikte limit değeri 0,5'dir. 0,4'ün üstündeki değerler iyi olarak nitelendirilir. Rüzgar hızı değiştiğinde türbin hızı da değişecektir. Bu değişikliklere cevap verebilecek ve kontrolü sağlayabilecek mekanizmalar rüzgar türbin sistemlerinde kullanılmalıdır. Düşük rüzgar hızlarında da maksimum çıkış gücü elde edilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Türbin yönetimi, kontrol ünitesinin yönetimi demektir. Kontrol ünitesi yukarıda özetlenen türbinin beş temel bileşeni işleten sistemdir. Türbinler, elektronik, mekanik ve hidrolik kontrol sistemleri ile yönetilirler.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan denetleme mekanizmaları mekanik, elektronik veya aerodinamik ilkelere dayanan farklı teknikleri kapsar. Denetlenen özelliği dikkate alarak bir tasnif yapılırsa türbinlerde *yön* ve *hız* olmak üzere iki temel denetim parametresinden bahsetmek mümkündür.

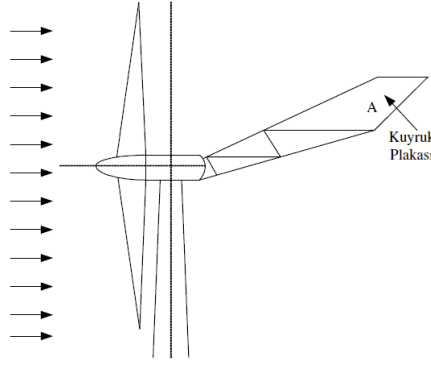
3.8 Yön Denetimi

Yatay eksenli rüzgar pervanelerinde, en iyi verimi almak için pervane dönme düzleminin rüzgar yönüne dik olması gerekir. Fakat rüzgar yönü zamanla değiştiğinden sistemin rüzgar yönünü takip ederek pervanesini uygun yöne çevirebilmesi için bir "*yönelme mekanizması*" kullanması gerekir.

Düşey eksenli pervaneler için yön problemi yoktur. Bu yüzden herhangi bir yön kontrol sistemi kullanmazlar. Uygulamada dört farklı yöneltme mekanizmasından söz edilebilir.

- Kuyruk plakası,
- Yardımcı pervane,
- Arkadan rüzgarlı tertip,
- Elektronik kontrollü dişli mekanizması.

Kuyruk plakası pervane çapı 6 metrenin altındaki küçük rüzgar türbinlerinde sıkça tercih edilen bir tekniktir. Pratik ve ucuz bir sistem olduğundan tasarımcılar tarafından tercih edilmektedir. Kuyruk plakasının çalışma ilkesine ait görüntü aşağıdaki şekilde verilmiştir.



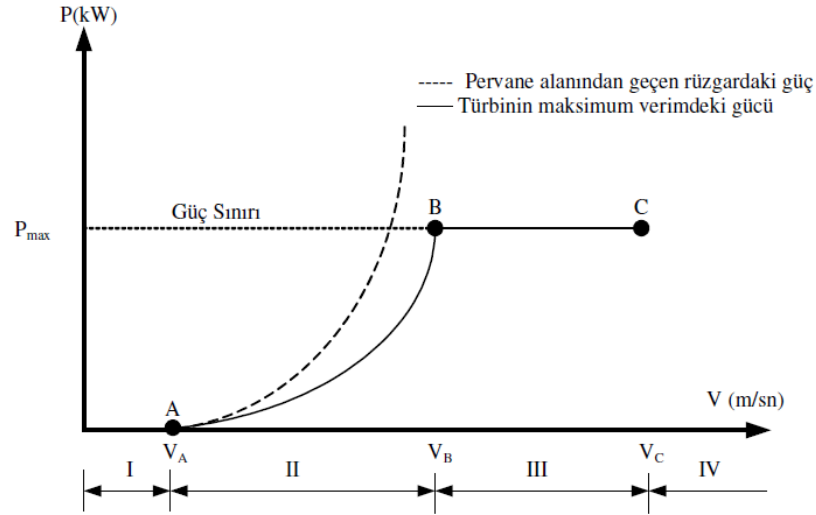
Şekil 3.8 Kuyruk Plakası ile Çalışan Yön Bulma Sistemi.

3.9 Hız Denetimi

Türbin pervanesinin dönme hızını denetleme gereğı temelde üç farklı nedene dayanır:

- Sistemin verimli çalışmasını sağlamak (maksimum verim bölgesi),
- Sistemin üreteceğı gücü sınırlayabilmek (maksimum güç bölgesi),
- Çok yüksek rüzgar hızlarında sistemin tahrip olmasını engellemek üzere sistemi durdurmak (emniyetsiz bölge).

Hız denetim bölgeleri: Hız denetim yaklaşımlarını daha iyi anlayabilmek için bir rüzgar türbininin güç eğrisindeki bölgeleri incelemek faydalı olacaktır.



Şekil 3.9 Hız Denetim Bölgeleri

Yukarıdaki şekilde belirtilen bölgelerden I. Yetersiz rüzgar bölgesi, II. Maksimum verim bölgesi, III. Maksimum güç bölgesi, IV. Emniyetsiz bölge olarak adlandırılır.

Bu bölgelere ilişkin açıklamalar aşağıda kısaca verilmiştir.

Yetersiz rüzgar bölgesi: Rüzgar türbinleri belli bir V_A rüzgar hızının altında çalışamazlar. Bu V_A hızına kadar olan bölge “*yetersiz rüzgar bölgesi*” olarak adlandırılır. Bu bölgede sistem çalışmadığı için hız denetimine de gerek yoktur. Maksimum Verim Bölgesi; Bu bölgede, sistemin maksimum verimle çalışması halinde, rüzgardaki enerjinin türbin tarafından yakalanabilecek miktarı türbinin güç sınırının altındadır. Bu yüzden bu bölgedeki kontrolün amacı aerodinamik verimin mümkün olan en yüksek değerde olmasını sağlamaktır. Bu durumda güç eğrisinin AB noktaları arasındaki bölgesini “*maksimum verim bölgesi*” olarak adlandırmak mümkündür. Bu bölgede ideal kontrol, aerodinamik verimin sürekli olarak maksimum değerde tutulabildiği durumdur. Fakat sabit hızla çalıştırılan türbin pervanelerinde bu mümkün olmamakta, maksimum aerodinamik verim sadece tek bir rüzgar hızında elde edilebilmekte ve diğer rüzgar hızlarında belli bir verim kaybı

kaçınılmaz olmaktadır. Aerodinamik verimin sürekli olarak maksimumda tutulabildiği durum ancak değişken hızlı denetim yaklaşımıyla elde edilebilmektedir.

Maksimum güç bölgesi: Rüzgar türbinleri tasarlanırken sistemin üretebileceği belli bir “*güç sınırı*” ve çalışabileceği belli bir “*hız sınırı*” göz önüne alınır. Pervane boyutları, jeneratör ve tüm sistem buna bağlı olarak tasarlanır. Bu yüzden artan rüzgar hızıyla birlikte türbinin güç üretimi bu sınıra yaklaştığında artık sistemin verimli çalışması değil, bu sınırın üzerinde güç üretmemesi istenir. Bu durumda güç eğrisinin B-C noktaları arasında kalan bu bölgesi “*maksimum güç bölgesi*” olarak adlandırılır. Bu bölgede rüzgardaki enerji türbinin kapasitesinin üzerinde ve gereğinden fazla miktardır. Sistem aerodinamik olarak maksimum verim noktasının altında çalışmasına rağmen maksimum kapasitede güç üretimi yapar. Başka bir deyişle bu bölgede rüzgar hızı artarken pervanenin aerodinamik verimi azalmak durumundadır. Ancak bu şekilde güç sınırında üretim yapılabilir. Bu bölgedeki hız denetiminin amacı, maksimum kapasitede sabit güç üretimi sağlamaktır.

Emniyetsiz bölge: Genellikle rüzgar türbinlerinin üretim yapabileceği bölgeyi belli bir rüzgar hızıyla sınırlandırmak gerekir. Rüzgar hızının yıllık frekans dağılımına bakıldığında yüksek rüzgar hızlarıyla yıl boyunca çok az karşılaşıldığı görülmektedir. Bu az karşılaşılan yüksek hızlardaki rüzgarlar karşısında sistemin yeterince dayanıklı yapılması, bu hızlarda sistemden yıl boyunca elde edilebilecek toplam enerji göz önüne alındığında oldukça pahalı olmaktadır. Bu yüzden türbinlerin çalışma alanı belli bir rüzgar hızıyla sınırlandırılır. Şekil x.x’te yer alan güç eğrisinde C noktasına karşılık gelen bu rüzgar hızının üzerindeki hızları kapsayan “*emniyetsiz bölge*” de sistemden enerji üretmesi beklenmez. Böylece yüksek rüzgar hızlarında oluşabilecek aşırı yüklere engel olunarak sistemin hasara uğraması önlenir.

Maksimum verim bölgesinde değişken hızlı denetim: İlk üretilen rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik jeneratörlerinin yapısı sabit hızda çalışmayı gerektirdiği için türbin pervaneleri de sabit hızda çalışmak üzere tasarlanmaya

başlamıştı. Hız kontrol yaklaşımı da elektrik jeneratörü için gereken sabit hız temelinde şekillendi. Sabit hız kontrolünü sağlamak üzere değişik mekanik ve aerodinamik fren sistemleri, döner palalı kontrol teknikleri vb. teknikler geliştirildi.

Güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte bu alanda yapılan araştırmalar, elektrik jeneratörlerinin geniş bir değişken hız aralığında az bir elektriksel verim kaybıyla nasıl çalıştırılabileceğini ortaya çıkardı. Böylece rüzgarın değişken doğasına daha uyumlu davranabilen türbin tasarımları ortaya çıkmaya başladı. Bu yeni rüzgar türbini tasarımları değişken hız kontrol tekniğine dayanmaktaydı. Sabit hızlı türbinler sadece tek bir rüzgar hızında maksimum aerodinamik verimle çalışırken değişken hızlı türbinler optimum verim bölgesindeki her rüzgar hızında maksimum aerodinamik verimle çalışabilme imkanına sahip oldu. Bu aynı zamanda rüzgar türbinlerinin güç üretiminde de belli bir artıyı beraberinde getirdi. Değişken hızlı denetim yaklaşımına temel teşkil eden aerodinamik prensipler ise şöyle sıralanabilir. Öncelikle türbin pervanesinde, pervane hızının güç üretimi üzerindeki etkisini incelemek gerekir. Belli bir rüzgar hızında pervanenin rüzgardan çekebileceği gücün pervanenin dönme hızına bağlı değişimini gösteren grafik aşağıdaki Şekildeki gibidir.

$P(kW)$

$W(rad/s)$

Şekil 3.10 Türbin Pervanesinde Gücün Hıza Bağlı Değişimi

3.10 Güç Kontrolü

Pervane kanatlarının üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden dolayı rüzgar türbinleri, rüzgardaki kinetik enerjiyi dönme (rotasyonel) mekanik enerjisine çevirir. Pervane kanatlarındaki bu kuvvetler uçak kanatlarının maruz kaldığı kuvvetlere çok benzer. Günümüzde kullanılan modern rüzgar türbinlerinde, iki farklı aerodinamik kontrol mekanizması kullanılır. Bunlar Stall (Pasif) ve Pitch (Aktif) kontrol mekanizmalarıdır. Bu iki mekanizma, jeneratörün rüzgardan çıkarabileceği enerjiye göre ayarlanır. Eskiden çoğu küçük ve orta büyüklükteki türbinler stall kontrol kullanırken, günümüzde rüzgar türbinleri üzerinde daha etkin bir kontrolü sağlayan Pitch kontrol mekanizması kullanılmaktadır. Stall olayı, akışın kanat profilinin negatif basınç bölgesini aniden terk ederken meydana gelen bir durumdur. Pitch kontrol olayı, jeneratörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch kontrollü rüzgar türbinlerinde bulunan elektronik aksamaya bağlı hız kontrol sistemi, saniyede birkaç kez güç çıkışını kontrol eder. Güç çıkışı normalden çok yüksekse, hız kontrol sistemi pervane Pitch mekanizmasına sinyal göndererek durumu bildirir. Gelen bu sinyalden sonra pervane kanatları da yönünü rüzgarın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar.

Pitch ile Stall kontrolün karşılaştırma tablosu aşağıda gösterilmektedir.

Nitelikler	Pitch Kontrol	Stall Kontrol
Enerji Sağlama	Prensip olarak daha iyi	Uygun güç eğrisi
Sabit hızda kontrol	Yüksek rüzgar hızında zor	Genel olarak tatminkar ancak tasarım belirsiz
Değişken hızda kontrol	Güç kalitesi daha iyi, herhangi bir stall seçeneğinden daha düşük sürücü yükü	Doğrulama gerektirir
Emniyet	Bütününle bir rotor koruması sağlar	Aşırı hız koruması için ek birimler gerektirir
Maliyet	Rotor sistemleri pahalıdır	Rotorun maliyeti düşük ancak frenleme sistemi pahalı

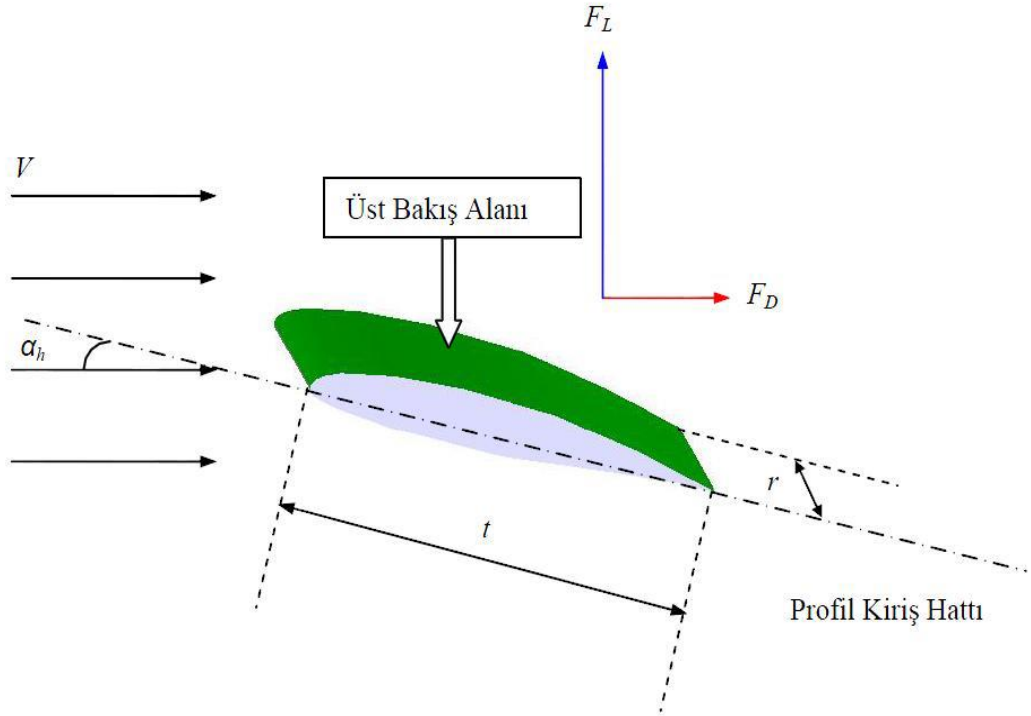
Tablo 3.1 Pitch ile Stall kontrolün karşılaştırılması.

BÖLÜM 4 TÜRBİN KANADI AERODİNAMİĞİ VE RÜZGAR YÜKÜ

4.1 Sürüklenme ve Kaldırma Kuvveti

Modern rüzgar türbinlerinin kanat kesitleri, akış esnasında kanat üzerinde meydana gelen yüklerden optimum gücün elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan özel profillerden (airfoil) seçilmektedir. Bu özel profillerin geliştirilmesinde amaç, meydana gelen kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesidir. En genel haliyle, profiller, bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 adet özel eğrinin birleşiminden oluşur. Üst eğrinin, alt eğriye göre daha kambur bir forma sahip olması, her iki tarafta farklı akışkan hızları oluşturur. Bu yüzden bir basınç farkı meydana gelir ve yüksek basınç tarafından alçak basınç yönüne doğru bir kaldırma kuvveti doğar. Bir serbest akım içerisinde yer alan, sahip olduğu kiriş hattı ile akışkan hızı arasındaki hücum açısı α_h olan örnek bir profil ve üzerine gelen kuvvetler ise aşağıdaki şekilde görülmektedir.

Akış sebebiyle meydana gelecek olan sürüklenme kuvveti (F_D), her zaman için akış yönüne paraleldir. Oluşan diğer kuvvet, kaldırma kuvveti ise (F_L), akışa ve sürüklenme kuvvetine dik yöndedir. Türbini döndüren kuvvet, bu iki kuvvetin bileşkesidir.



Şekil 4.1 Örnek Bir Profil Üzerine Gelen Kuvvetler

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (4.1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (4.2)$$

Burada verilen C_L ve C_D , sırasıyla kaldırma ve sürüklenme katsayılarıdır. Profiller için alan (A), üst bakış alanı olarak alınır. Buna göre A alanı ;

$$A = t \cdot r \quad (4.3)$$

Verilen bir bağıl pürüzlü, düşük hızlı akış için C_L ve C_D , α_h ve kirişe dayalı Reynolds sayısı ile değişmelidir.

$$C_L = f(\alpha_h Re_t) \quad C_D = f(\alpha_h Re_t) \quad (4.4)$$

Ayrıca, profil karakteristiğini saptamak için, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı ile verilen kayma sayısı (ε) adlı boyutsuz bir sayı tanımlanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{C_L}{C_D} \quad (4.5)$$

Profillerin C_L , C_D , ε değerleri, belirli bir Reynolds sayısı ve farklı hücum açıları için deneysel yöntemlerle elde edilmektedir. Geleneksel olarak “Polar Eğriler” adıyla ifade edilen bu veriler, profilin kalitesini belirler.

4.2 Geliştirilmiş Olan Modeller

Rüzgâr türbini üretimi için geliştirilen modeller güç tahmini için önem taşımaktadır. İdeal disk teorisi geliştirilmiş olan ilk teorilerdendir. Bu teoride koşullar ideal olarak düşünülmüştür. Bu teorinin temelinde sonsuz sayıda kanada sahip ve sıfır kalınlıkta bir rotor bulunmaktadır.

Kanat Elemanı Momentum Teorisi ise İdeal Disk Teorisi ve Kanat Elemanı Teorisinin birleşimidir. Kanat Elemanı Teorisi ile kanatların şekli tanımlanabilir ve kanattaki

diferansiyel (eğrisel) kısmın analizi yapılabilir. Glauert ise akım tüpü analizini kullanarak tek boyutlu momentum teorisi ve Kanat Elemanı Teorisini kullanarak kendi modelini geliştirmiştir. Yukarıda bahsedilen teorilerde 2 boyutlu akış olduğu kabul edilerek analizler yapılmıştır.

Prandtl ise kanatlar için “Kaldırma Çizgisi Teorisini” geliştirmiştir. Bu model ile yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin performans tahmininde yeni bir boyut ortaya çıkmıştır. Kaldırma Çizgisi teorisi, kanat üzerindeki kaldırmanın dağılımının hesaplanması için geliştirilmiş yoldur. “Kaldırma yüzeyleri metodu” ise karmaşık kanat şekilleri için yararlı bir hesaplama değildir. Değişik serbest rüzgâr hızları için yapılan diğer bir çalışma ise “Girdap Teorisi” dir.

4.3 İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti

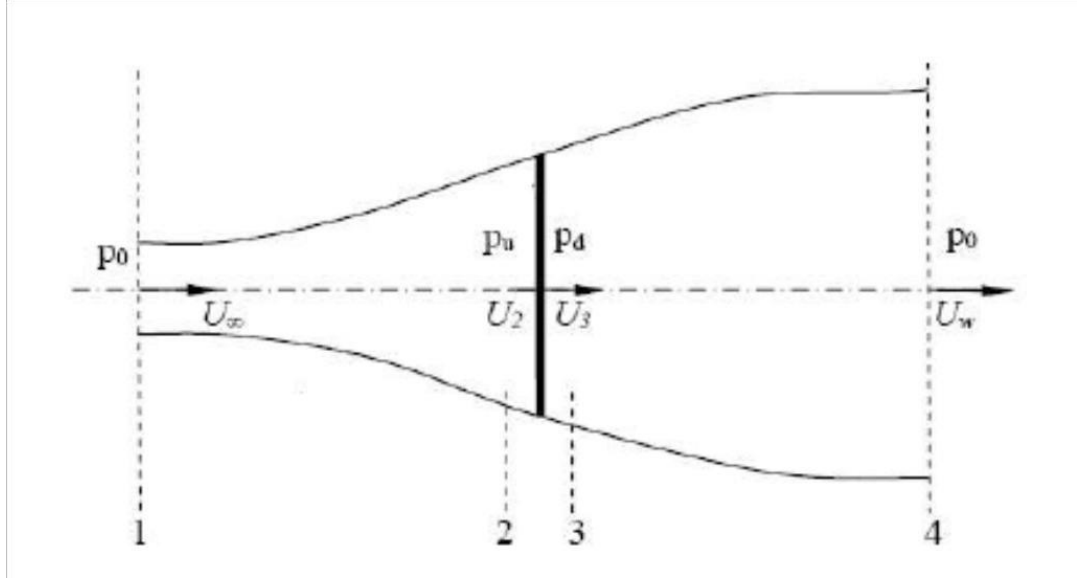
Rüzgârdan enerji elde etmek için kurulacak türbinin boyutları aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem ne kadar ideal olursa olsun rüzgârdan elde edilecek enerjinin bir üst limiti vardır. Betz tarafından 1919–1926 yılında belirlenen bu limite Betz limiti denir.

Betz söz konusu teoriyi hesaplarken hareketli diskin önünde, üzerinde ve gerisindeki hava akımları için enerjinin korunumu kanunlarını kullanmıştır. Betz’in ideal disk teorisine göre;

Diskten geçen havanın akış hızı, disk alanının her noktasında eşit olmasına rağmen basınç ani olarak düşer. Bu basınç farkından dolayı diskin hareket enerjisi artmış olur. Betz teoremine göre hesaplama yapılırken, akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılamaz olduğu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğu, sonsuz sayıda kanat olduğu ve diskin önünde ve arkasında türbülans olmadığı kabullenilmektedir.

İdeal disk teorisinin analizi, kontrol hacmi alınarak yapılır. Burada kontrol hacminin

sınırları aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi akım tüpünün sınırları ve akım tüpünün iki ucudur.



Sekil 4.2 Akım Tüpündeki Hareketli Diskten Geçen İdealleştirilmiş Akış

Burada diskin içinden geçen hava akış hızının sürekli olduğu varsayılırsa;

$$U_2 = U_3 = U_R \quad (4.6)$$

yazılır. Sabit debili bir akışta diskten geçen havanın debisi ise;

$$\dot{m} = \rho A U_R \quad (4.7)$$

olur. Tüm sistemi çevreleyen kontrol hacminde lineer momentumun korunumu ilkesi uygulanır, böylece kontrol hacminin içerisindeki net kuvvetler bulunur. Bernoulli fonksiyonu, hareketli diskin her iki tarafındaki kontrol hacminde de kullanılabilir. Serbest akış ve rotorun ön tarafı arasında ve rotorun arka tarafı ile oluşan dalga arasında sırasıyla Bernoulli fonksiyonu uygulanırsa;

$$p_o + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = p_u + \frac{1}{2} \rho U_R^2 \quad (4.8)$$

$$p_d + \frac{1}{2} \rho U_R^2 = p_o + \frac{1}{2} \rho U_w^2 \quad (4.9)$$

Burada T rotordaki rüzgâr kuvvetidir ve itme kuvveti olarak adlandırılmaktadır. İtme kuvveti, hareketli diskin her iki tarafındaki kuvvetlerin toplamı olarak da aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$T = Ap' \quad (4.10)$$

Burada p' hareketli disk yüzeyindeki basınç azalmasını ifade etmektedir.

$$p' = (p_u - p_d) \quad (4.11)$$

Es. 4.8 ve Es. 4.9 nolu Bernoulli denklemini kullanılarak basınç azalması;

$$p' = \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (4.12)$$

olarak yazılabilir. Es. 4.10, Es. 4.12 nolu eşitlikte kullanırsa;

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (4.13)$$

olur. Rotor düzlemindeki hız ise;

$$U_R = \frac{U_\infty + U_w}{2} \quad (4.14)$$

olarak ifade edilebilir. Böylece, rotor düzlemindeki rüzgâr hızı basit bir model kullanılarak ortalama olarak bulunur. Es. 4.14 nolu eşitlikten görüldüğü gibi hareketli disk üzerindeki akış hızı, diskin önündeki ve arkasındaki hızların aritmetik ortalamasıdır. Es. 4.14 nolu eşitliğe göre U_w , U_R ve U_∞ olur. Eksenel akış faktörü a ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$a = \frac{U_\infty - U_R}{U_\infty} \quad (4.15)$$

Eksenel akış faktörü 0-1 arasında değişen boyutsuz bir sayıdır. Buradan rotor düzlemindeki hız ile eksenel akış faktörü arasındaki ilişki;

$$U_R = U_\infty (1 - a) \quad (4.16)$$

ve diskten sonraki akış hızı ile eksenel akış faktörü arasındaki ilişki ise;

$$U_w = U_\infty (1 - 2a) \quad (4.17)$$

olarak belirlenir. Akım tüpü boyunca hız ve basınç dağılımına ilişkin aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Rotordaki güç çıkışı (P) ise, itme kuvvetinin ve rotor düzlemindeki rüzgâr hızının çarpımına eşit olarak şu şekilde belirlenir;

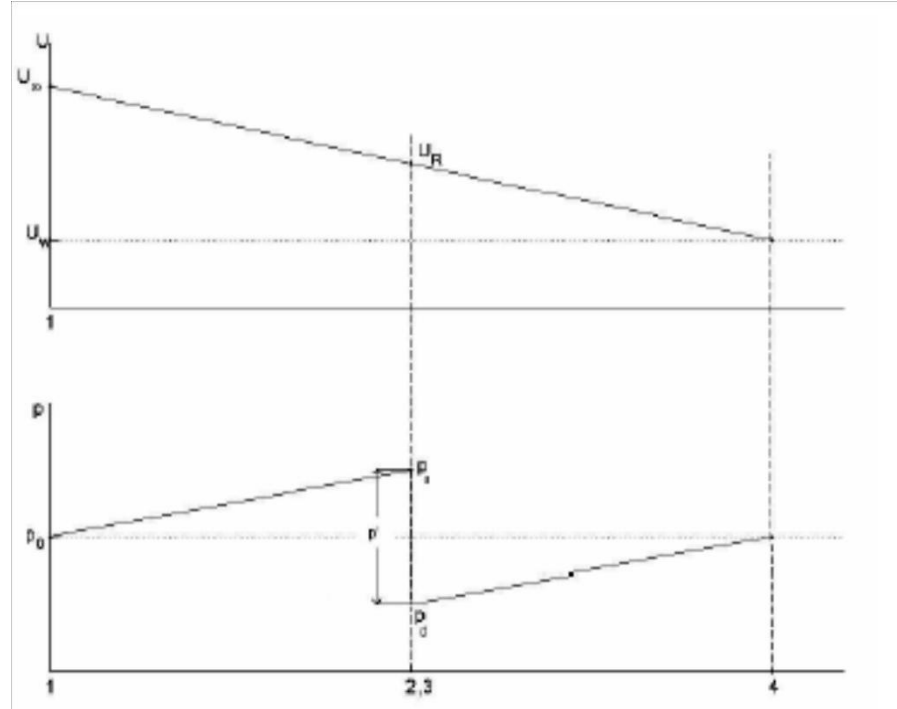
$$P = T U_R \quad (4.18)$$

yazılır. Es. 4.13 nolu eşitlik Es. 4.18 nolu eşitlikte kullanılırsa;

$$P = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty^2 - U_w^2) U_R \quad (4.19)$$

eşitliği elde edilir. Daha önce yazılan Es. 4.16 ve Es. 4.17 nolu eşitliklerden U_R ve U_w değerleri Es. 4.19 nolu eşitlikte yerine yazılırsa;

$$P = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty^2 - U_w^2) U_R \quad (4.20)$$



Sekil 4.3 Akım Tüpü Boyunca Hız ve Basınç Dağılımı

eşitliği elde edilir. Türbin güç katsayısı ise;

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (4.21)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Güç katsayısı c_p ise, Es. 4.20 nolu eşitlik Es. 4.21 nolu eşitlikte kullanılırsa,

$$c_p = 4a(1-a)^2 \quad (4.22)$$

haline gelir. Maksimum güç katsayısını c_p bulmak için Es. 4.22 nolu eşitliğin türevi alınıp, sıfıra eşitlenirse ($a=1/3$ olarak alındığında) ;

$$(c_p)_{\max} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (4.23)$$

elde edilir. Bulunan bu değer, ideal ortam şartlarında, rüzgârdan çekilebilecek enerjinin teorik olarak en üst limitidir. İdeal çalışma şartlarında rotor serbest şekilde akan rüzgârın ancak $2/3$ ününden faydalanabilir. Fakat pratik kullanımda istenilen ideal çalışma şartları sağlanamayacağından bu limite ulaşılması zordur. Bunun temel nedenleri; rotor gerisindeki dairesel dalgalar, sınırlı sayıdaki kanat sayısı ve kanat uç kayıpları ile aerodinamik sürtünmedir.

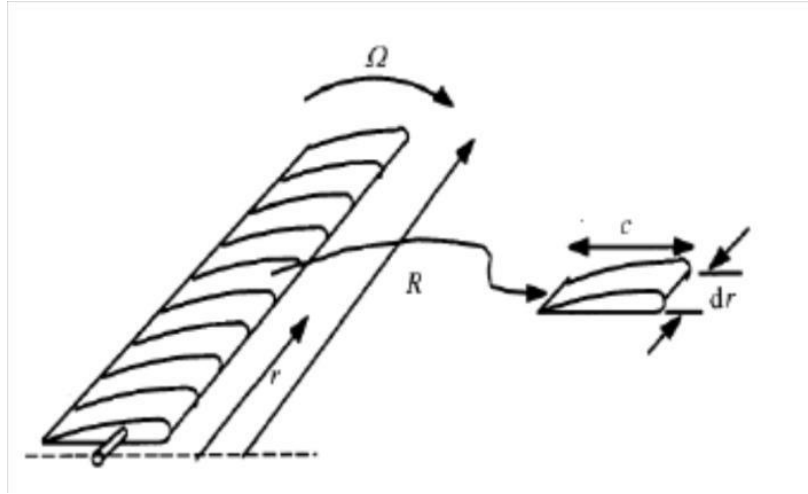
4.4 Kanat Elemanı Teorisi

Rüzgardan maksimum derecede güç çekilebilmesi için rüzgar türbinin kanat yapısının optimum düzeyde tasarlanması gereklidir. Glauert çalışmalarında Betz'den farklı olarak, rotor sonrasında oluşan girdaplı akımı da hesaba katmıştır. Böylece teori optimum kanat tasarımı da önem kazanmıştır. Glauert'in teorisine göre;

- Hava akımı homojen, türbülanssız ve sürekli,dir,
- Rotorun gerisinde silindirik bir iz meydana gelmektedir.
- Kanatın her bir elemanı bir sonraki kanat elemanından bağımsız hareket etmektedir.

- Uygulamada kullanılacak olan profilin karakteristikleri her bir elemana adapte edilmiştir.

Kanat elemanı teorisi iki ana esasa dayanır. Kanat elemanına etki eden kuvvet ve momentler; kanat profilindeki kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine bağlıdır. Her bir kanat elemanının bağımsız hareket etmesi kabulünden dolayı her bir kanat elemanı üzerine gelen kuvvetler, bölgesel rüzgâr hızları ile hesaplanır. Kanat elemanı teorisi, hava içindeki hareketinden dolayı kanatların davranışını analiz eden alternatif bir yöntemdir. Bu analizde şekilde gösterildiği gibi, kanadın N tane parçaya veya elemana bölüldüğü kabul edilmektedir ve her bir kanat elemanı için kabul edilen aerodinamik kuvvet, kanat elemanları için adapte edilen aynı kesitin uygun kanat profilindeki kuvvetler olarak düşünülmektedir. Her bir elemanın davranışı, aynı kanadın bitişik elemanları tarafından etkilenmez, kanat ucundaki kuvvet kanat boyunca tüm elemanlarındaki kuvvetlerin birbirine eklenmesiyle bulunabilir. Kanat elemanı şematik görünüşü şekilde verilmiştir.



Sekil 4.4 Kanat Elemanlarının Şematik Görünüşü

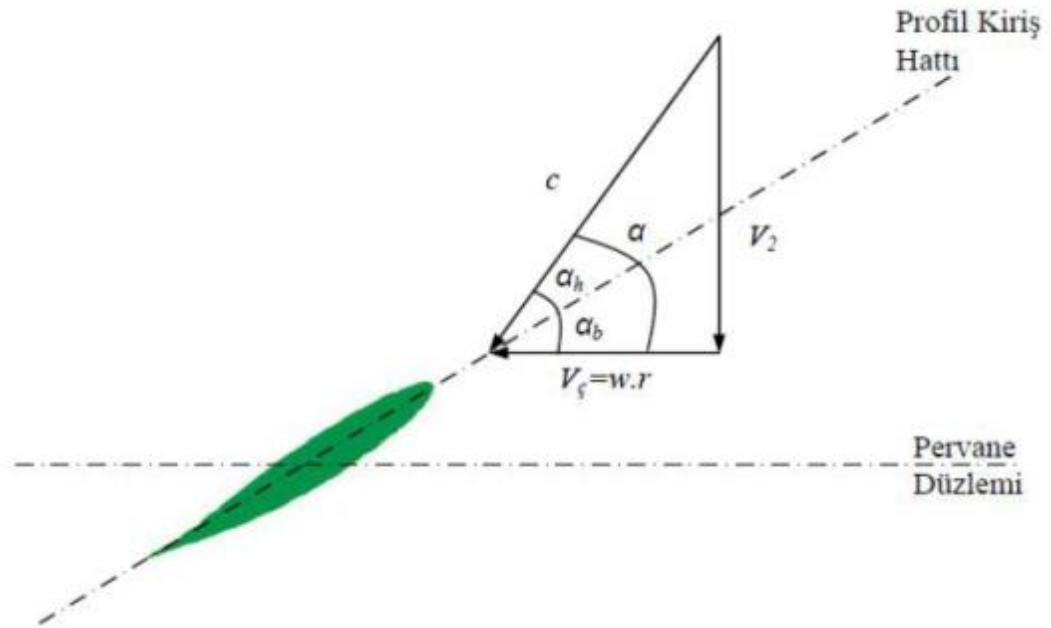
Kanat elemanında oluşan hızlar

Kanat boyunca herhangi bir r uzaklığındaki kesitte oluşan hızlar şekilde verilmiştir. Sabit w açısal hızıyla dönen bir rüzgar türbini kanadının herhangi bir kesitinde oluşan çevresel hız bileşeni V_φ , denklem ile verilmiştir.

$$V_\varphi = w \cdot r \quad (4.24)$$

Bu çevresel hız ile pervane düzlemindeki rüzgar hızı V_2 , c vektörü ile gösterilen bir bileşke hız meydana getirirler ve burada bir hız üçgeni oluştururlar. Bu hız üçgeninde geometriden yararlanılarak,

$$c = \sqrt{V_2^2 + V_\varphi^2} \quad (4.25)$$



Şekil 4.5 Herhangi Bir Kanat Kesitinde Meydana Gelen Hızlar

$$\alpha = \alpha_h + \alpha_b = \arctan\left(\frac{V_2}{V_\varphi}\right) \quad (4.26)$$

yazılabilir. Burada

α_h :Bileşke rüzgar hızı ile giriş hattı arasında kalan hücum açısı,

α_b :Kanat profilinin, pervane düzlemi ile arasında kalan bağlama açısıdır.

Dikkat edilecek olursa, profil üzerindeki çevresel hız bileşeni, V_ϕ , profilin türbin dönme merkezine olan r uzaklığına bağlı olarak değişmektedir. Kanat açısal hızı w , tüm kanat için sabit olacağına göre, kanat boyunca ilerledikçe, V_ϕ 'nin büyüdüğü görülür. Öte yandan, pervane düzlemindeki rüzgar hızı bileşeni V_2 , kanat boyunca aynı değerdedir. V_ϕ 'nin değişimi, bileşke hız vektörünü de değiştirecektir.Sonuç olarak, kanat boyunca ilerlendiğinde, bileşke hız vektörü c 'nin, hücum açısı α_h 'nin ve hız üçgeninin α açısının değiştiği görülecektir.

Optimum çalışma noktasında dizaynı yapılan rüzgar türbin kanadı için profil bağlama açısı,

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r}\right) - \alpha_{diz} \quad (4.27)$$

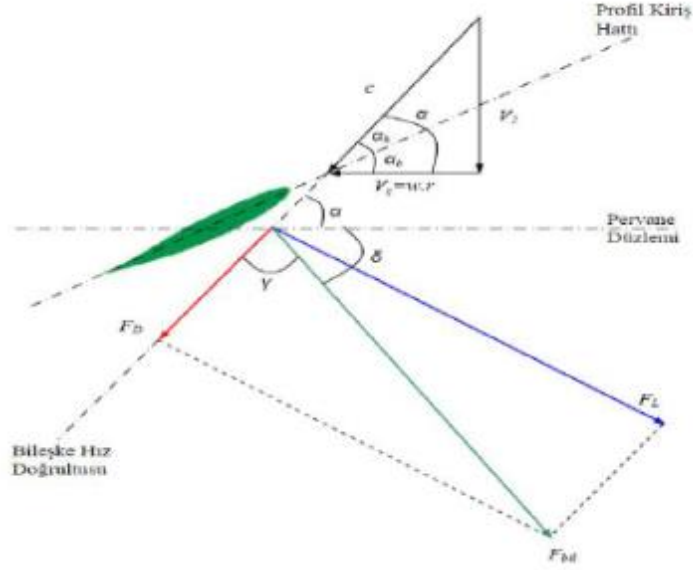
ile verilir (Gasch, 1996). Burada

R : Kanat boyu veya türbin yarıçapı,

α_{diz} : Dizayn hücum açısı,

λ_{diz} : Dizayn devirlilik sayısıdır.

Kanat elemanında oluşan kuvvetler ve güç eldesi



Şekil 4.6 Kanat Elemanına Etkiyen Bileşke Kuvvetleri

Kanat elemanına etkiyen ve bileşkesi F_{bil} olan F_L ve F_D aerodinamik kuvvetleri verilmişti. Kanadın dönmesine sebep olan kuvvet, bileşke kuvvetin pervane düzlemi üzerindeki izdüşümüdür. Buna göre,

$$F_{pd} = F_{bil} \cdot \cos \delta \quad (4.28)$$

olacaktır. Burada $\cos \delta$ değeri,

$$\begin{aligned} \delta &= 180 - \gamma - \alpha \\ \gamma &= \arctan\left(\frac{F_L}{F_D}\right) = \arctan(\varepsilon) \\ \delta &= 180 - \arctan(\varepsilon) - \arctan\left(\frac{V_2}{V_\varphi}\right) \\ \cos \delta &= \cos\left[180 - \arctan(\varepsilon) - \arctan\left(\frac{V_2}{V_\varphi}\right)\right] \end{aligned} \quad (4.29)$$

ile bulunabilir (Hennchen, 1982). Kanat elemanında elde edilecek güç, kuvvet ile çevresel hızın çarpımı olarak ifade edilir.

$$P = F_{pd} \cdot V_\varphi \quad (4.30)$$

F_{pd} , aerodinamik kuvvetler cinsinden yazılırsa,

$$\begin{aligned} F_{bil} &= \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \\ \varepsilon &= \frac{C_L}{C_D} = \frac{F_L}{F_D} \\ F_{bil} &= \sqrt{F_L^2 + \frac{F_L^2}{\varepsilon^2}} \\ F_{bil} &= F_L \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \end{aligned} \quad (4.31)$$

elde edilir. Sonsuz küçük kalınlıktaki kanat elemanı için verilen denklem ile kaldırma kuvveti denklemi yeniden yazılır ve birleştirilirse,

$$dF_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot t \cdot dr \cdot c^2 \quad (4.32)$$

$$dF_{bil} = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot t \cdot dr \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \quad (4.33)$$

elde edilir. O halde pervane kanadını döndüren kuvvet F_{pd} için,

$$dF_{pd} = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot t \cdot dr \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \quad (4.34)$$

yazılabilir. Pervaneye aktarılan güç ifadesi yeniden düzenlenecek olursa,

$$dP = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot t \cdot dr \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \cdot V_\varphi \quad (4.35)$$

ifadesi, türbinin tek kanadından elde edilecek gücü verecektir.

Optimum çalışma noktasında dizaynı yapılan rüzgar türbin kanadı için profil boyu t ,

$$t(r) = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{C_L} \cdot r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r} \right) \right] \quad (4.36)$$

ile verilmiştir. (Gasch, 1996). Burada profil boyu ifadesi, denklemde yerine yazılırsa,

$$dP = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{C_L} \cdot r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r} \right) \right] \cdot dr \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \cdot V_\varphi \quad (4.37)$$

elde edilir. Denklem, pervane göbeğinden ($r=r_1$) kanat ucuna ($r=R$) kadar entegre edilir ve z kanat sayısı ile çarpılır ise pervaneden elde edilecek olan güç denklemi bulunmuş olur.

$$\begin{aligned} dP &= z \cdot \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{C_L} \cdot r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r} \right) \right] \cdot dr \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \cdot V_\varphi \\ dP &= 8 \cdot \pi \cdot \rho \cdot r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r} \right) \right] \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \cdot V_\varphi \cdot dr \\ P &= 8 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_{r=r_1}^{r=R} r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{diz} \cdot r} \right) \right] \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \cdot \cos \delta \cdot V_\varphi \cdot dr \end{aligned} \quad (4.38)$$

4.5 Kayıplar (Gasch, 1996)

Optimal bir rüzgar türbini pervanesinden alınabilecek güç, en çok,

$$P_{per} = C_{p-Betz} \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 = 0,5926 \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (4.39)$$

olmaktadır. Fakat, uygulamada bu değere ulaşamaz. Bunun nedeni kayıplardır. Bu kayıplar 3 ana başlık altında toplanabilirler.

Profil kayıpları

Profil kayıpları, ihmal edilen direnç kuvvetlerinden kaynaklanır. Hesaplamalarda,

$$\eta_{profil}(\lambda, \varepsilon) = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon} \quad (4.40)$$

ile dikkate alınır. Bu çalışmada, türbine iletilen gücün hesaplanmasında, direnç kuvvetleri de dikkate alındığından, profil kayıpları tekrar hesaba katılmayacaktır.

Uç kayıpları

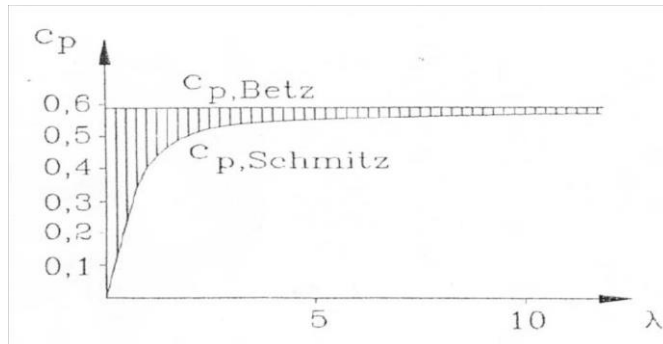
Kanat ucunda, profil alt kısmından profil üst kısmına doğru hava akımı oluşur. Kanat uçlarındaki bu akım ile kanada gelen hava akımı üst üste binerek, gittikçe genişleyen girdap oluştururlar. Hesaplamalarda bu kayıp,

$$\eta_{uc}(z, \lambda) = 1 - \frac{1,84}{z\lambda} \quad (4.41)$$

ile dikkate alınır.

Girdap kayıpları

Betz teorisine göre rüzgar hızı, pervane düzlemi öncesi ve sonrasında doğrultusunu değiştirmez. Halbuki kanada çarpan hava kütlesi, kanat sonrasında doğrultusunu değiştirir ve girdap oluşturur. Girdap kayıpları, Schmitz tarafından verilen $C_{p-Schmitz} - \lambda$ eğrisi yardımıyla hesaba katılır. Şekil;



**Şekil 4.7 Girdap Kayıplarının Devirlilik Sayısına Göre Değişimi
(Gasch'tan 1996)**

BÖLÜM 5 TÜRBİN KANATLARINDA KOMPOZİT KULLANIMI

Teknolojik gelişimin hızla ilerlemesi ile sektördeki tüm firmaların ürettiği türbinlerin alt standartları iyice yükselmiş ve önemli bir unsur olarak kanatların dizaynı, malzemesi ve üretim şekli önem kazanır olmuştur. Artık günümüzde rüzgâr türbini kanatlarının, türbin verimliliğinde ciddi oranda etkisi olduğu kabul edildiğinden, mühendislik ve teknoloji olarak önemli yatırımlar yapılmakta ve sürekli gelişim-değişim yaşanmaktadır.

Rüzgâr Türbini Kanatlarından en büyük beklenti; uzun sürede dayanıklılığını koruması, aerodinamik olarak türbinin enerji verimliliğine ilave katkı sağlaması, tüm dış etkenlere karşı bütünlüğünü ve yüzey kalitesini kaybetmemesi gibi özelliklerdir. Bu özelliklerin sağlamak için de yapılan tüm çalışmalar ve denemeler sonucunda Rüzgâr Türbinleri Kanatları'nın kompozit teknolojisi ile üretilmesinin en uygun yöntem olduğu ve kullanılan malzemelerde de günden güne gelişim yaşanması ile bunun desteklendiği görülmüştür. Malzeme seçimi için beş metot tercih edilmektedir. Bu metotlar: ekonomik ve performans karakteristikleri, özellik ölçüm değerleri, değerlerin analizi, hasar analizi, ekonomik ve fayda analizi olarak adlandırılır.

Türbin yapımında kullanılan kompozit malzemelerin avantajları da aşağıdaki gibidir;

Sağlamlık ve Dayanım: Lifli kompozitlerin, geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında en önemli avantajı yüksek dayanım ve sağlamlığıdır. Bu özellikler mühendislik yapılarının tasarımında çok önemli olan performansın iyileştirilmesini ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Optimal Tasarım: Üretilen kompozit malzemeler, her uygulamanın belirli taleplerini karşılamak için projelendirilebilirler. Mümkün tasarım seçenekleri; malzeme (fiber ve matris), işleme yöntemi ve tabaka tipi (tek yönlü veya dokuma) seçimini, tabaka konumlarının, verilen doğrultudaki tabaka sayısının ve tabakaların kalınlığının değiştirilmesini içermektedir. Kompozitler için tasarım değişikliklerinin bu geniş aralığı, geleneksel mühendislik malzemelerine göre zıt bir durumdur. Bu malzemelerin tasarımlarındaki bu geniş çeşitlilik, daha az malzemenin artık olarak

atılmasıyla üretilen verimli yapıların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca çeşitlilikteki bu büyük imkan, kompozit yapıların üretilmesinde bilgisayarlar, optimizasyon, uzman sistemler ve yapay zeka kullanılmasını ve tasarımların geliştirilmesini sağlamaktadır.

Yorulma Süresi: Kompozit malzemelerin yorulma süresi, havacılık endüstrisinde kullanılmasının ana sebeplerinden biridir. Yorulma süresi, diğer birçok yapı (ulaşım araçları, köprüler, endüstriyel bileşenler ve çeşitli rüzgar ve su yüklerine maruz kalan yapılar) içinde önemlidir.

Ölçüsel Kararlılık: Hemen hemen tüm yapılar, kullanım süreleri boyunca sıcaklık değişikliklerine maruz kalmaktadır. Sıcaklık değişimiyle ilgili gerilmeler, boyut veya şekilde değişikliklerle, sürtünmenin artmasıyla ve termal gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı uygulamalarda bu termal etkiler kritik olabilmektedir. Hareketli parçalar (örneğin, motorda) arasında sürtünmenin artması, aşırı ısınmadan dolayı hatalara neden olabilir. Uydulardaki küçük şekil değişiklikleri işlev görmemesine yol açabilmektedir. Karayolları ve çatı sistemlerinde de ısı genleşme hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıfır veya sıfıra yakın ısı genleşme katsayısına sahip malzemelerin kullanılmasının gerekli olduğu birçok uygulama vardır. Uygun tasarım sayesinde, sıfır ısı genleşme katsayısına sahip kompozit malzemeler elde etmek veya termal gerilimi ve uygunsuzluğu minimuma indirmek amacıyla diğer bileşenlerin ısı genleşme katsayısı ile eşleştirmek için kompozitin ısı genleşme katsayısını dizayn etmek mümkündür.

Korozyon Direnci: Polimer ve seramik matrisli malzemeler, kompozit malzemelerin nem ve diğer kimyasallara karşı korozyon direncini arttırmak için seçilebilirler. Bu matris malzemeleri kullanılarak üretilen kompozitler, geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında bakım gerektirmemektedirler.

Etkin Üretim: Kompozit yapılar; filaman sargısı, püskürtme ve şerit katman gibi otomatikleştirilmiş metotların kullanılmasıyla etkili bir şekilde üretilmektedir. Üretimdeki verim, kompozit malzemelerin çok az artık malzeme çıkaracak şekilde üretilmesini de sağlamaktadır. Bu, son ürünün elde edilmesine kadar büyük miktarlarda talaşın artık olarak oluştuğu metal malzemelerle karşılaştırıldığında

kompozit malzemelerin avantajıdır. Üretim maliyetleri de doğrudan yapıdaki parçaların sayısı ile ilgilidir ve kompozit malzemeler son şekli bir kerede üretebilme yeteneğine sahip olmasından ve perçin bağlantılarından daha etkili birleşme sağlamasından dolayı bu parça sayılarını önemli şekilde azaltabilmektedir. Örnek olarak; uçak gövdesinin iki kesiti, alüminyum bileşenlerin perçinlenmesiyle ve kompozit bileşenlerin yapıştırılarak bağlanmasıyla yapılmaktadır.

Alüminyum yapı yaklaşık 11000 parçadan, aksine kompozit yapı yaklaşık 1000 parçadan

oluşmaktadır. Parça sayısındaki bu azalma, bileşen ve montaj maliyetinde kayda değer tasarruflar sunmaktadır.

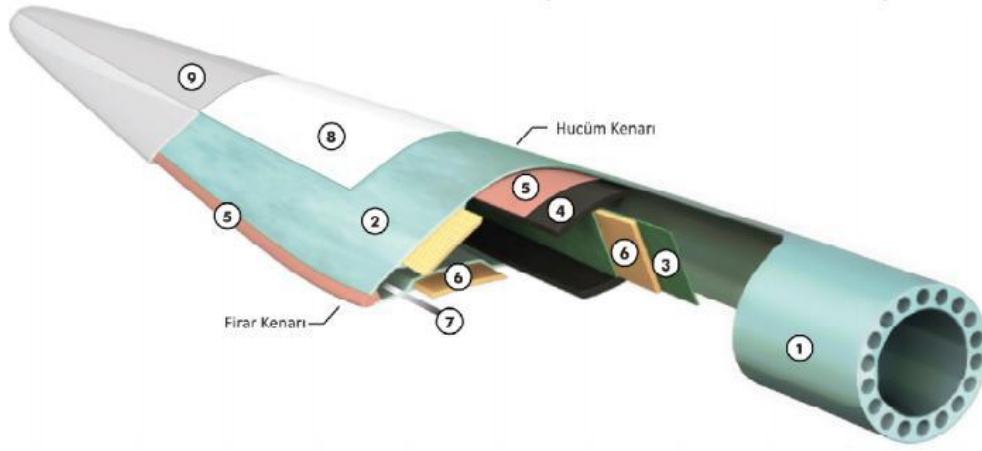
Yalıtkanlık: Birçok mühendislik yapılarının elektriksel yalıtkanlığa sahip olması istenmektedir. Örnek olarak; cam/polyester merdiven ve ışık direklerinin elektrik iletkenliklerini azaltmak için çelik ve alüminyumlara göre tercih edilmesi verilebilir. Yalıtkan bileşenler, elektronik endüstrisindeki uygulamalar için de önemlidir. Aksine bakır matrisli kompozitlerin, bakırın yüksek termal iletkenliğinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıma çalışmaları devam etmektedir.

Tüm Maliyetlerin Hesaba Katılması: Kompozit malzemelerden yapılan yapıların maliyet

değerlendirmesi, ürün toplam ömür maliyetini içermelidir. Kompozitler, genellikle geleneksel

malzemelerden daha pahalıdır. Fakat, tüm diğer faktörler maliyet karşılaştırılmasında hesaba katılmalıdır. İlk olarak, kompozit malzemeler daha yüksek dayanım ve sağlamlığa sahiptir. İkinci olarak, üretimde otomasyona gidilmesi kompozit malzeme maliyetini düşürmektedir. Üçüncü, taşıma ve kurma maliyetleri kompozit yapılar için genellikle daha düşüktür. Son olarak, kompozit yapılar geleneksel malzemelere göre daha uzun ömürlüdürler ve kullanım ömrü süresinde daha az bakım gerektirirler.

5.1 Rüzgar Türbini Kanat Üretiminde Kullanılan Temel Malzemeler



Monolit Laminat

1 Kök İnfüzyon

2 Kabuk Reçine

3 Kesme Ağı

Reçine: Epoksi, Poliester veya Vinilester

Takviye: Cam, Karbon veya Aramid Elyaf

Sandviç Laminat

4 Ana Kiriş

5 Birleşimler

6 Kor Malzemesi

7 Yıldırım Koruması

Takviye: Tek Eksenli Cam veya Karbon Elyaf

Yapısal yapıştırıcı

Köpük, Balsa veya Bal peteği

Metal profil veya iletken tel

Yüzey

8 Astar

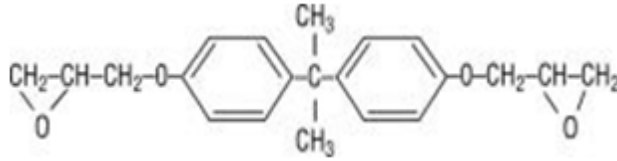
9 Son kat

Poliüretan boya, Jelkot veya Epoksi Jelkot

Epoksi reçine

Bir kompozit yapı olan kanatların üretiminde, kompozit teknolojisinden bahsedilirken anlatıldığı gibi genel olarak Polimer Yapıda Termoset Reçineler kullanılır. Bunların içinde de Epoksi Reçineler özellikle hacimsel çekme dayanımlarının ve boyutsal stabilite değerlerinin diğer Termoset reçinelere oranla yüksek olması nedeniyle kullanılması tercih edilir.

Genel olarak Epoksi Reçinelerin organik yapıları aşağıdaki gibidir:

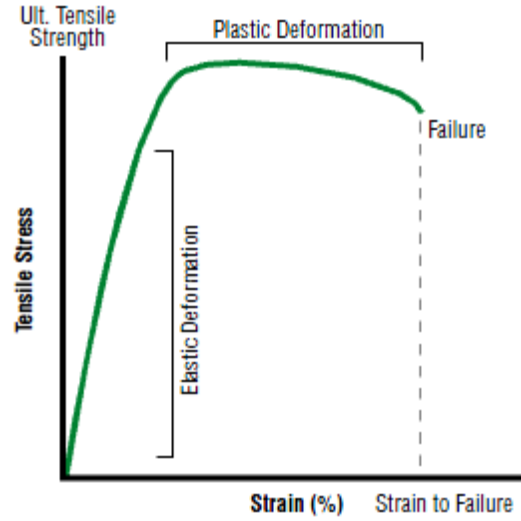


Şekil 5.1 Epoksi Reçinelerin Organik Bağ Yapısı

Epoksi reçineler öncelikle üstün mekanik özellikleri, korozyon sıvılara ve ortamlara dayanım, üstün elektriksel özellikleri, yüksek ısı derecelerine dayanım veya bu değerlerin bir kombinasyonu olarak yüksek performanslı kompozit ürünlerinin üretiminde tercih edilmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin kanatlarının dışında, denizcilikte özellikle büyük tekne ve yatların üretiminde, otomotivde, savunma sistemlerinde, havacılıkta özellikle savaş uçaklarında ve diğer bazı sektörlerdeki kompozit parçaların üretiminde, performans faktörünün maliyet faktöründen daha önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır.

Epoksi reçineler, herhangi bir kompozit elemanı oluşturmak için takviye malzemeleri ile birleşmeden önce, üreticiler tarafından belirtilen oranlarda ve uygun yapıda bir sertleştirici ile karıştırılmalıdır.



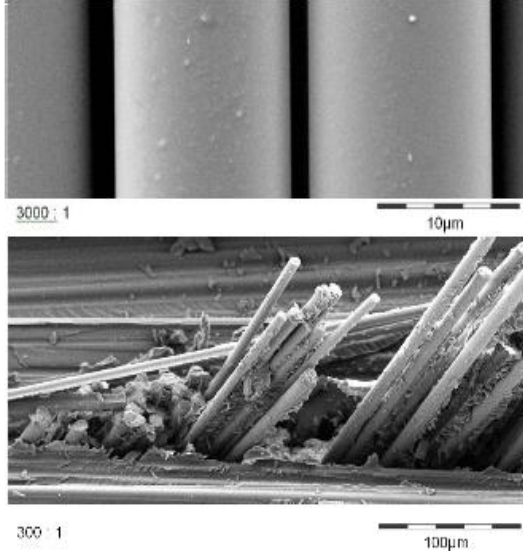
Şekil 5.2 Epoksi Reçinelerde Görülen Çekme Gerilmesi/Dayanım Eğrisi

Cam ve karbon kumaşları

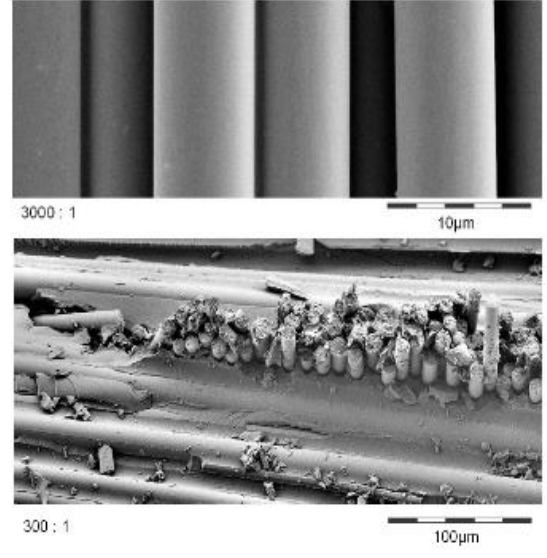
Takviye olarak genelde çok yönlü bir şekilde Cam veya Karbon liflerinden oluşan ipliklerin dokunması ile elde edilen kumaşlardan yararlanılır.

Cam kumaşları ile karbon kumaşların arasındaki en belirgin farklar arasında; karbon liflerinin hafifliği ve yüksek mukavemeti, cam kumaşlarının daha ucuz ve yaygın olarak bulunması, karbonun elektriksel iletkenliğinin fazla olması, cam kumaşlarının infüzyon ve el yatırma uygulamalarında daha kolay izlenebilirliği sayılabilir.

Glass Fibre



Carbon Fibre



Resim 5.3 Cam ve Karbon Liflerinin Serbest ve Kompozit Yapı İçindeki Büyütülmüş Görüntüleri

Kullanımda cam veya karbon ipliklerinden oluşma dokunmuş kumaşlar kullanılması işleme bakımından oldukça avantaj getirmiştir. Bununla birlikte dokuma makinelerinin teknolojik ilerlemesi ile ipliklerin tek eksende dokunmasından, çok eksenli dokunulabilmesine geçiş yapılmıştır. Bu da özellikle kanat tasarımcılarının hareket alanlarını genişletmiş ve kanada gelen yük dağılımlarının hesabına göre farklı kumaşların kullanılması doğmuştur.



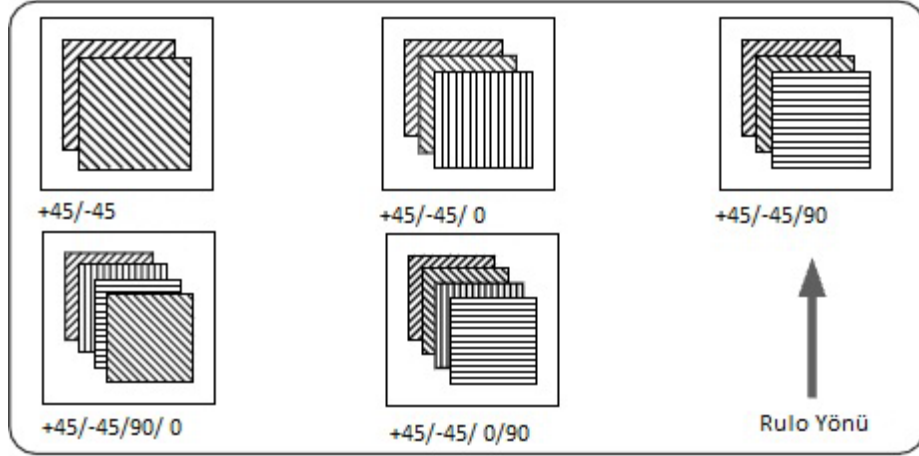
Resim 5.4 Cam ve Karbon Liflerinden Elde Edilmiş İplik Bobinleri

Genel olarak kanatların üretiminde kullanılan cam kumaşları E sınıfı camdan imal edilmiştir. Çok yönlü kumaşların dokunması esnasında genel olarak en fazla dört yön kullanılmaktadır.

Aşağıdaki şekilde en yaygın halde kullanılan bazı dokunmuş kumaşların şematik örnekleri verilmektedir. Kanat tasarımıındaki yüklerin dağılımına göre, hangi

tip dokunmuş kumaşların, hangi bölgelerde kullanılacağı belirtilmektedir. Dört yöne kadar ipliklerin dokunması mümkün olabilmektedir.

Her yön için de birim alana düşen iplik ağırlıkları farklı olacak şekilde dokuma yapılabilmektedir.



Şekil 5.5 Çok Yönlü Dokunmuş Cam Kumaşlarının İplik Açılarından

Örnekler

Ara (core) malzemeler

Ara malzemeler, sandviç yapıdaki kompozit ürünlerde kullanılan dolgu malzemeleridir. Özellikle eğilme dayanımını arttırmaları, kompozit ürünlerin kullanım yerlerinin artmalarına sebep olmuştur. Ara malzeme kullanımı nedeniyle, yaklaşık %3 oranında bir ağırlık artışı ile, eğilme dayanımının 3,5 kat, rijitliğin ise 7 kat dolaylarında artırılması mümkündür.

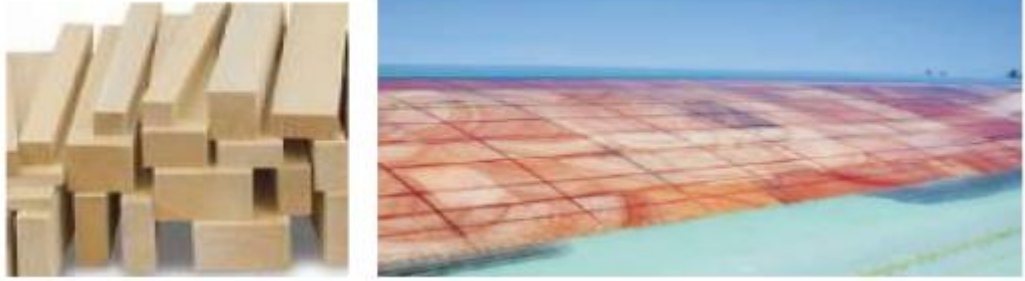
Kompozit malzemelerin üretiminde ara malzeme olarak genel olarak şu ürünler kullanılmaktadır:

Köpükler: Polyvinyl chloride (PVC), Polietilen tereftalat (PET), Polyuretan (PU), Polystyrene (PS), Polyetherimide (PEI), Styreneacrylonitrile (SAN). vb. içeriği olan malzemeler,



Resim 5.6 Köpük Örneği

Ağaç malzeme: Genelde Balsa Ağacı, nadiren sunta ve kontrplak gibi ağaç malzemeler,



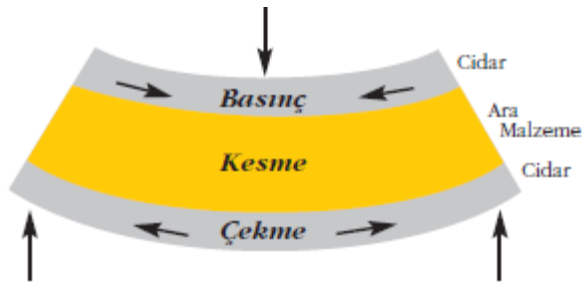
Resim 5.7 Balsa Kütükleri ve Kanat İçinde Balsa Görünümü

Bal peteği görünümlü malzemeler: Kraft kağıdı, alüminyum, çelik, aramid, karbon, poliüretan, polyester, polietilen, polipropilen ve seramik gibi hammaddelerden üretilen malzemeler,



Resim 5.8 Bal Peteği Görünümlü Malzeme Örnekleri

Rüzgâr Türbini Kanatlarında, ara malzeme olarak yaygın şekilde PVC, PET köpük ve balsa ağacından yapılmış çeşitli kalınlıklardaki (5-50 mm arasında) levhalar kullanılmaktadır.

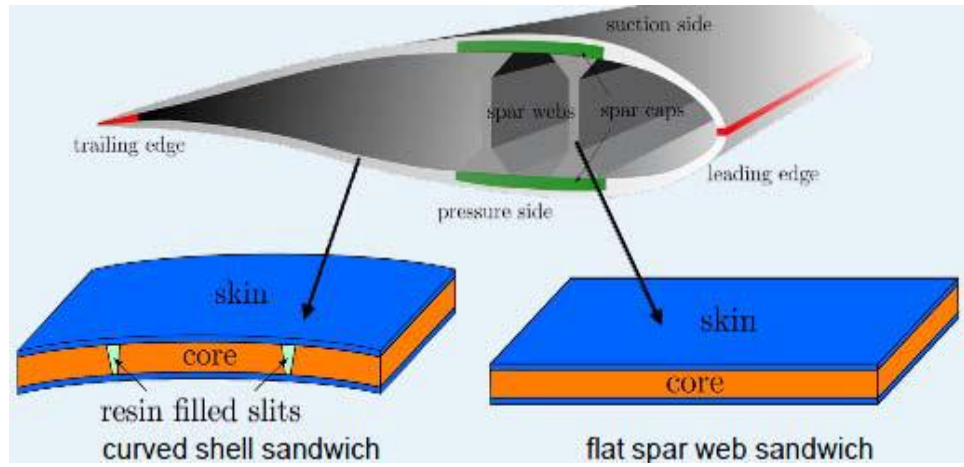


Şekil 5.9 Bir Sandviç Yapı Uygulamasında Eğilmeye Karşı Oluşan Kuvvetler

Yukarıda resimde şematik olarak gösterildiği gibi bir sandviç yapıyı I kirişlere benzetebiliriz. I kirişi yapısındaki sandviç ürünlerde, cidarlardan birine yük uygulandığında, yük I kirişini oluşturan ara malzeme içinden kesme gerilmesi

aracılığıyla geçerek, üst ve alt cidarlar arasında bağlantı oluşturmaktadır. Tasarım esnasında, kesme yükünün ara malzeme ve yapıştırıcının dayanım değerini aşmadığından emin olmak gerekmektedir.

Rüzgâr Türbini Kanatları da sandviç yapıda imal edilen kompozit ürünlerdendir. Hem her iki yüzeyde (Emme ve Basınç Yüzeyleri), hem de perde kesitinde (Omurga) sandviç yapı kullanılmaktadır.



Şekil 5.10 Kanat Kesitinde Sandviç Yapıların Görüntüsü

BÖLÜM 6 ÇEVRESEL ETKİLER

Rüzgâr santrallerinin çevresel etkileri; arazi kullanımı, gürültü, görsel ve estetik etkiler, doğal hayat ve habitata etki, elektromanyetik alan etkisi, gölge ve titreşimler olarak sıralanabilir. [13] Ayrıca kesikli bir enerji kaynağı olması da dezavantaj olarak söylenebilir.

6.1 Yer Seçimi ve Alan İhtiyacı

Rüzgâr enerjisi uygulamaları ve gelişimlerin çevresel etkileri konuları temel olarak “arazi kullanım ilişkileri/uygunluğu” bağlamında fiziksel planlamanın bir problemi olarak ele alınabilir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin bir kara parçası üzerinde gerçekleşmesi, yer seçtiği alanı yeni arazi kullanım biçimine dönüştürmektedir. Deniz üzerindeki kurulumlar ise deniz hayatını etkilemektedir.

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretilmesi için kullanılacak türbin çiftlikleri büyük alanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Noktasal olmayan yayılmış bir formda olan rüzgâr enerjisi gibi bir enerjinin, engelsiz ortamda toplanmasıyla elektriğin üretilmesi, geleneksel sistemlerde kullanılan birim elektrik üretimi başına alandan çok daha fazla alanlar gerektirir. 1 MW elektrik üretimi için 700–1000 m² arazi gerekmektedir. Ayrıca bu araziye insanın girmesi de tehlikelidir.

Yer kullanımı rüzgâr türbinlerinin yerleşiminden etkilenen bugünkü ve gelecekteki kullanımların değişimi olarak anlatılabilir.

Büyük alanlar gerektiren büyük ve orta ölçekli rüzgâr tarlaları yaygın olarak yerleşmeler dışındaki, uzak, açık alanlarda, kırsal alanlarda yer seçmektedir. Kırsal alanlarda yer seçtiği durumlarda, rüzgâr türbinlerinin kurulduğu alanın toplam proje alanının yaklaşık %1-3’ünü kaplarlar. Kalan %97-99’luk boş kısım ise diğer kullanımlara açık olması itibari ile tarımsal faaliyet yapılarak arazinin ikili kullanımı sağlanabilmektedir.

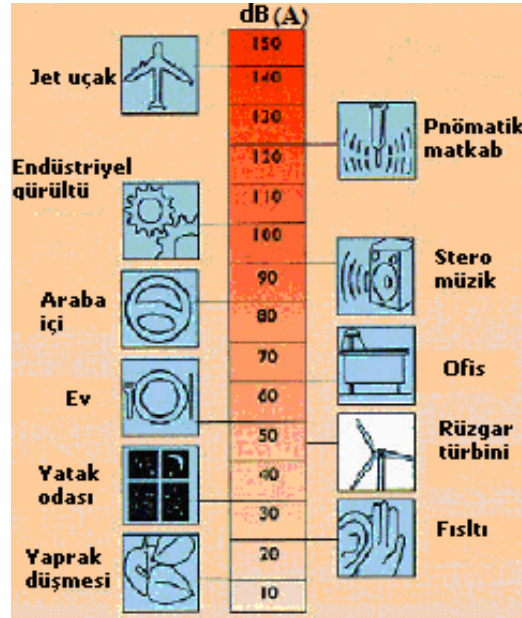
Rüzgâr santralleri tarımsal arazi kullanımı ile uygunluk gösterirken, diğer açık ve doğal alanlarda yer seçimi durumunda arazinin mevcut kullanımı ile çelişki gösterebilmektedir. Rüzgârın bol, hızının yeterli olduğu alanlar çoğu zaman doğal niteliği korunacak alanlar, milli parklar, özel nitelikli alanlar, arkeolojik ve tarihi alanlarla çakışabilmektedir.

Türbin kurulumu ve buna bağlı elektrik bağlantı yapıları, kablolama ve yollardan dolayı habitatta bir değişiklik olacaktır. Ancak bu değişim arazinin tamamını etkileyecek düzeyde büyük değil, küçük çaplıdır.

Türbinler çalışma hayatlarının sonuna geldiklerinde sökülebilmekte ve bulundukları alan farklı amaçlar için kullanılabilmektedir.

6.2 Gürültü Etkisi

Rüzgar türbinleri gibi her hareket eden parça, bazı gürültüler çıkartır. İyi tasarlanmış bir rüzgar türbini, karayolu trafiği, tren, uçak ve iş makinelerinin gürültü yayınımları ile karşılaştırıldığında oldukça sessiz çalışırlar. Enterkonnekte şebekeye elektrik enerjisi üreten tüm rüzgar türbinleri, 25-50 m arasında yüksekliktedirler. Türbin, kulenin üzerine monte edilmiş dişli kutusu ve jeneratör içeren gövde ve gövdeden çıkıntılı yatay bir eksenle dönebilen 3 kanattan meydana gelir. Kanatlardaki gürültü, kanatların üretim ve tasarımına dikkat edilmesi ile azaltılabilir. Dişli kutusu ve jeneratördeki gürültüyü azaltmak için, gövde içersinde ses izolasyonu ve yalıtım malzemeleri kullanılır. Kanatlar, dişli kutusu ve jeneratördeki işitilebilir sesler türbinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Gürültü, desibel (dB) olarak ölçülür. Desibel havadaki basınç değişimleri gibi, ses basınç seviyesini ölçer. Çevresel gürültü ölçümleri, insan kulağının hassasiyeti referans alınarak yapılır. Rüzgar türbinlerinde meydana gelen gürültü, ses güç seviyesi olarak ifade edilir ve dB (A) olarak ölçülür. Tek bir rüzgar türbinindeki ses güç seviyesi, 90-100 dB (A) arasındadır. Türbinden 40 m mesafede sohbet seviyesi ile aynı 50-60 dB (A) ses güç seviyesi yaratır. 500 m mesafede 10 tane rüzgar türbini 35-45 dB (A) ses seviyesi yaratır. Rüzgar çiftliği kurulmadan bölgede var olan gürültü ile karşılaştırılmalı ve yerleşim bölgesinin işitebileceği gürültü dikkatlice göz önüne alınmalıdır. Ayrıca rüzgar türbin çeşitlerinin farklı tasarımlarından dolayı gürültü yayınımları farklılık gösterebilir. Aerodinamik biçimli gövde ve kule, ses geçirmez gövde gibi diğer birçok özgün tasarımların gelişmesi ile gürültü seviyesi azaltılmaktadır.



Şekil 6.1 250 m mesafede diğer yaygın gürültü aktiviteleri ile rüzgar türbinlerindeki gürültü seviyesinin karşılaştırılması.

6.3 Elektromanyetik Alana Etki

Rüzgâr türbini veya üretim donanımı elektromanyetik alana tesir edip Radyo-TV alıcılarında parazit yapabilirler. Bunun en temel sebebi türbin kanatlarıdır. Bu kanatlar dönerken radyo ve TV alıcıları ile radyo dalgalarını geri yansıtır, parazit yapar, kuleler de sinyalleri yansıtabilir. Fakat engellenmesi basit ve ucuzdur .

6.4 Habitata Etki

Türbinler doğal hayata ve habitata da çeşitli etkilerde bulunur. Etkiler canlı türlerine, mevsime ve yer özelliğine bağlı olarak değişir.

Kanatlar üzerinde önemli derecede böcek birikmesi türbin verimini düşürmektedir. Ayrıca türbinler kuş ölümlerine de sebep olmaktadır. Kuşlar bu rüzgâr türbinlerine doğru sürüklenmekte, çok hızlı dönen pervanelerden kaçamamakta ve ölmektedirler. Bu nedenle rüzgâr tarlaları doğal koruma alanlarının en az 300 m ilerisine kurulmalıdır.

ABD California’da, Blyth Harbour rüzgâr tarlası yakınlarında, içlerinde nadir kuş türlerinin de bulunduğu yaklaşık 1.000 hayvan ölü bulunmuştur . Aynı şekilde 2001 yılında Atlanta Rosstaki’de yapılan bir çalışmada, işletmedeki 15.000 türbinin 33.000 kuşun ölümüne sebep olduğu görülmüştür. Buradaki türbinler eski ve küçük makinelerdir. Kapasite aralıkları 100–250 kW arasında değişmektedir.

Ayrıca rüzgâr enerjisiyle büyük ölçülerde elektrik üretimi, rüzgâr hızının azalmasına neden olur. Yakın bölgelerdeki göllerin yüzeyindeki buharlaşmanın bu sebepten dolayı azalması neticesinde göller daha sıcak hale gelirler. Ayrıca toprak nemi de yükselir. Bütün bu olumsuzluklar ekosistemin etkilenmesine neden olur.

Habitatların kaybı veya zarar görmesi türbin temelleri, güç istasyonları giriş kanalları ve iletim hatları koridorlarından dolayı olur.

Etkilenen	Etki
Kuşlar	Türbinlere çarpma sonucunda ölüm
	İşletmede olan türbinlerden ve inşa, bakım ve söküm esnasında çıkan gürültüden dolayı yavrulama ve beslenme alanlarına zarar vermesi
Memeliler	Gürültü, pervane hareketleri, besin zincirine olan müdahaleler, kazalar, elektromanyetik alanlar ve titreşimden dolayı habitatın bozulması
Balıklar	Suda bulanıklık, gürültü, titreşim ve elektromanyetik alan oluşturması ile kazalar ve yapay kayalıkların inşası balık ve balık larvalarına üzerinde olumsuz etki
Su altı flora ve faunası	Tesis kurulumu ve kablolar ile kazalar sonucu oluşan kayıplar
Kıyı şeridi	Kablolar ve kazalardan dolayı akış ve tabanda olan değişiklikler
Tüm canlılar	Görsel etki neticesinde manzaranın bozulması ve muhtemel psikolojik etkiler
	Gürültü, elektromanyetik alan etkisi

Tablo 6.1 Olumsuz Çevresel Etkiler [14]

6.5 Görsel Etkiler

Enerji üretmek amacıyla kurulan rüzgâr çiftliklerinin görsel etkilerinden söz etmek mümkündür. [13] Görsellik, estetik sübjektif bir olgudur. Ancak temel kıstas, doğaya uyumlu bütünleşmiş bir görsel etkinin oluşturulmasıdır.

Rüzgâr türbinlerinin yerleşimi çevrenin görsel ve estetik özelliklerini etkilemektedir. Görsel etkinin insan faktörü üzerinde direkt etkisi vardır. Doğal ve bölgesel korunan alanlar rüzgâr enerjisinin görsel etkisine karşı daha hassastır. Modern türbinler boyut olarak ve kapasite olarak daha büyük olmakta ve görünümde daha baskın olmaktadır. Bu durumlarda türbinler arası mesafe artmakta ve bölgedeki yoğunluk düşmektedir. Gelişen teknoloji yüksek dönme hızlarına sahip yoğun gruplanmayı düşürmekte daha düşük dönme hızına sahip daha büyük makineler getirmektedir. Işıklandırma da türbinlerin görsel etkilerinden sayılır.

BÖLÜM 7 RÜZGAR TÜRBİN ÖMRÜ, BAKIMI VE GÜVENLİĞİ

7.1 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. Rüzgar 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 rüzgar 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 üreticiler tarafından belirlenmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbin kapasitesine hem de lokal klimatolojiye bağlıdır. Örneğin, sitedeki türbülans miktarı gerçek ömrü önemli oranda belirleyen değişkendir.

7.2 Bakım

Modern rüzgar 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 rüzgar parkındaki türbinlerin ortalama bakım maliyetinden daha pahalı olmaktadır. Bazı rüzgar 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.



7.3 Güvenlik

Büyük modern rüzgar türbinlerinde normal olarak konik çelik boru şeklinde kuleler kullanılır. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlüğü, daha güvenli olması ve rüzgar türbininin bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamasıdır. Kusuru ise, maliyetinin yüksek olmasıdır. Kafes tipi kulelerin en büyük kusurları, rüzgar çiftliğine daha az uygun olması ve bakım onarım sırasında yanına ulaşılabilirliğin 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 rüzgar 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.

BÖLÜM 8 RÜZGAR ENERJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

8.1 Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çevreye Yararları

Rüzgar enerji sistemleri havaya veya suya emisyon yaymaz ve tehlikeli atıklar üretmez. Kömür, petrol, gaz gibi doğal kaynakları tüketmediğinden, kaynak çıkartılması, nakliye işlemleri ve çalışma sırasında su ihtiyacı yoktur. Rüzgardan elektrik enerjisi üretimi, fosil yakıtlı enerji üretiminin neden olduğu çevresel zararların azaltılmasına yardımcı olur. 1997 yılında, Amerika'daki güç santralleri %70 SO₂, %34 CO₂, %33 NO_x, %28 partikül madde ve %23 zehirli ağır metalleri çevreye yaymışlardır. SO₂ ve NO_x asit yağmurlarına neden olur. Asit yağmurları ormanlara doğal çevreye zarar verir. Asit yağmurları köprü, bina gibi yapıları aşındırarak ekonomik alt yapıya zarar verir. NO_x kirli, sisli havanın temel unsurudur. CO₂ sera gazı, sera içindeki dünyamızın yüzeyinden çıkan güneş ışınımını tutarak atmosferdeki küresel ısınmayı artırır. Sera gazlarının artışı sadece ortalama sıcaklığın yavaşça artmasına değil, aynı zamanda hava modellerinde artan değişimlere neden olur, daha sık ve şiddetli kuraklık ve seller oluşur. Dünya Meteoroloji Organizasyonu iklim değişiklikleri yüzünden aşırı hava olaylarının oluşabileceğini ikaz etmiştir. Partikül maddeler sağlığa etkilerinden dolayı gelişen bir kaygıdır. Endüstriyel ve gelişmekte olan ülkelerde özellikle astım gibi çocuk hastalıklarının hızlı bir şekilde artmasının nedeni hava kirliliğidir ve aynı zamanda kan kanseriyle bağlantılıdır. Benzer olarak, düşük, erken doğum ve bebek ölümleri kentteki kirli hava kütlesiyle bağlantılıdır. Zehirli ağır metaller çevrede birikirler ve biyolojik yiyecek zincirine katılırlar. Örneğin cıva maddesini göldeki balığın yemesi, daha sonra bu balığı insanların yemesi beslenme zincirine cıva maddesini ekler.

1 milyon(kWh) alternatif enerji üretimi ile emisyondaki azalma oranları
750-1000 ton CO ₂
7,5-10 ton SO ₂
3-5 ton NO _x

Tablo 8.1 Yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ile emisyon azalma oranları

Bölge	Enerji Tüketimi (katrilyon BTU)				Karbon dioksit emisyonları (milyon ton Karbon)			
	1990	1999	2010	2020	1990	1999	2010	2020
Endüstriyel Ülkeler	182,7	209,7	246,6	277,8	2 849	3 129	3 692	4 169
Doğu Avrupa/eski SSCB	76,3	50,4	61,8	73,4	1 337	810	978	1 139
Gelişen Ülkeler	87,2	121,8	184,1	260,3	1 641	2 158	3 241	4 542
Asya	51,0	70,9	113,9	162,2	1 053	1 361	2 139	3 017
Orta Doğu	13,1	19,3	26,3	34,8	231	330	439	566
Afrika	9,3	11,8	15,7	20,3	179	218	287	365
Orta ve Güney Amerika	13,7	19,8	28,3	43,1	179	249	377	595
Toplam Dünya	346,2	381,9	492,6	611,5	5827	6097	7910	9850

Tablo 8.2. Farklı bölgelerin geçmiş ve gelecekteki dünya enerji tüketimi ve karbondioksit emisyon miktarları.

Çizelge 9.2’de her on yılda enerji tüketiminin %17 arttığını ve karbondioksit emisyonundaki artışında %16 olduğunu göstermektedir. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ile karbondioksit emisyonu azalarak sera etkisi ve küresel ısınmanın azaltılmasında önemli bir adım olmaktadır.[33]

8.2 Rüzgar Türbinleriyle Elektrik Enerjisi Üretiminin Avantajları

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl %4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık, bu ihtiyacı karşılayan fosil-yakıt rezervleri ise, çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtlarının kullanımı sonucunda oluşan sera gazlarıyla, dünya ortalama sıcaklığının son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştığı bilinmektedir. Bu durum ise, yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyonlarca dolar zarara yol açan sel, toprak kayması, fırtına, yangın gibi doğal afetlerin gözle görülür bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Artan dünya ısıyla eriyen buzullar nedeniyle, deniz seviyesi yükselmiştir. Bunun sonucu daha şimdiden dünyanın birçok yerindeki yerleşim alanları boşaltılmıştır. En kısa zamanda önlem alınmazsa yakın gelecekte birçok yerleşim alanı daha sular altında kalacaktır. Sadece bu neden bile insanoğlunun artık fosil yakıtlar yerine temiz enerji kaynaklarına yönelmesini gerekli kılar. Bugün sadece egzoz gazlarındaki kurşun yüzünden doğan zihinsel özürlü çocuk sayısı on binler ile ifade edilecek rakamlara ulaşmıştır. Yoğun hava kirliliği tehdidi altında büyük şehirlerde yüzlerce insan ölmektedir. Hava kirliliğinin ve dünyanın artan ısının sadece insanlar üstünde etki yaptığı düşünülemez.

Hayvanlar ve bitkiler üzerinde de büyük miktarlarda etki bırakır. Kirlenme ve asit yağmurlarıyla birçok ekosistem tamamen yok olmuş veya yok olma derecesinde azalmıştır. Doğadaki bozulan gıda ve madde zinciri ile ağır metaller ilk önce bitkileri sonra hayvanları en sonunda ise bunları tüketen insanları etkiler hale gelmiştir. İşte bütün bu nedenlerden dolayı, alternatif ve temiz enerji kaynakları günümüzde ve yakın gelecekte günlük yaşamımıza hakim olacaktır. Sınırsız ve sorumsuzca enerji tüketiminin yerini, bilinçli, çevreye saygılı ve ihtiyacını karşılamaya yönelik enerji kullanımı alacaktır. Böyle bir ortamda da refah düzeyini, en fazla enerjiyi tüketen yerine, enerji en verimli kullanan belirleyecektir. Türkiye’de de benzeri bir anlayışın hakim olması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır. Rüzgar enerjisi, temiz, çevreyi kirlletmeyen, yakıt parası olamayan bir enerjidir.

İngiltere’de 2002 senesinde 1007 adet türbin kullanılarak elde edilen 557,5 MW’lık güç ile üretilen elektrik enerjisi ile 365.000 adet hanenin enerji ihtiyacı karşılanmış olup bu sayede 1.260.000 ton CO₂, 14.600 ton SO₂, 4.400 ton NO_x tasarrufu yapılmıştır. Tüm dünyada 2005 yılında sadece CO₂ tasarrufunun 69 milyon ton olacağı hesaplanmaktadır. Enerji hatlarının ulaşmadığı uzak noktalarda kurularak bu tip yerlerin enerji ihtiyacı karşılanabilir. Rüzgar enerjisinde ham madde ulaştırma masrafı yoktur. Doğadaki rüzgar direkt olarak kullanılabilir. Rüzgar türbinleri karmaşık makineler değildir. Gayet basit bir şekilde operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilmektedirler. Tamamen otomatik olarak çalışabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ayrıca bu şekilde sadece periyodik bakımlarının yapılması ile 20-30 yıla yakın çalışabilirler. Örnek olarak, Vestas firmasının ilk ürettiği türbin, 2000 yılının Mart ayında 20. işletim yılını doldurmasına rağmen hiçbir parçasını kaybetmemiştir. Rüzgar türbinleri, patlama yapmazlar, radyasyon yaymazlar. Ayrıca her hangi bir radyoaktif ışınım tahribatı yapmazlar. Dolayısıyla tehlikeli değildirler. Montaj aşaması hariç bugüne kadar hiçbir rüzgar santralinde ölümlü kaza olmamıştır. Bakım sürelerinde alınabilecek tedbirler ile herhangi bir ufak kaza oluşması da engellenebilir. Yinede rüzgar türbini kazası sonucu ölüm riski %0,0006 gibi bir rakamdır. Artan petrol fiyatları veya aniden ortaya çıkan başka maliyetleri olmadığından vergi artırımını olarak vatandaşa yük olmazlar. Atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısıl emisyonları yoktur. Buna ilaveten başka bir atık üretimi de söz konusu değildir. Rüzgar yerli bir enerji kaynağıdır. Yerel kaynaklar kullanılarak üretilen türbin grupları ile dünya genelinde on binlerce insana iş olanakları sunmuştur.

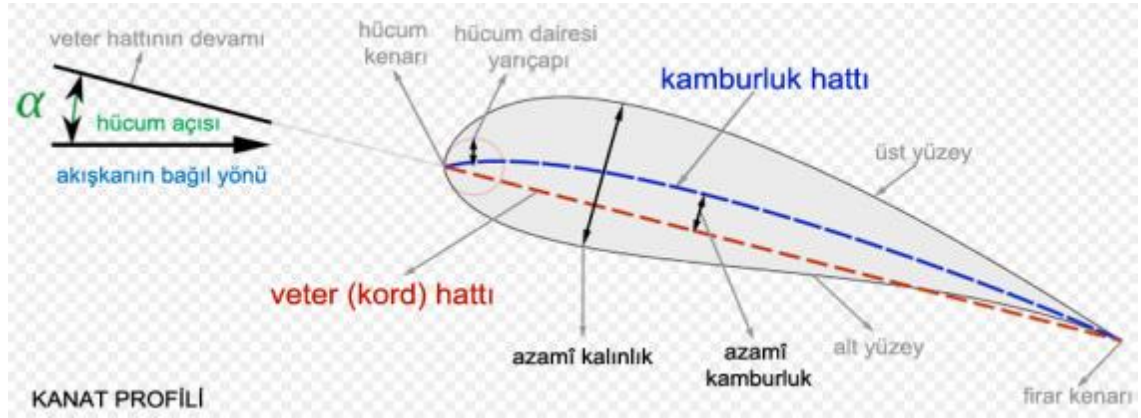
Amerika’da yapılan bir çalışmaya göre, rüzgar enerjisinden üretilen 10 milyon kWh elektrik enerjisinin, yine aynı elektrik miktarını üreten kömür santraline göre %27, doğalgaz santraline göre %66 daha fazla iş imkanı sağlamaktadır. Rüzgar türbinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir. Rüzgar türbinleri modüler olup herhangi bir büyüklükte imal edilebilmektedir. İstenildiğinde kısa bir süre içinde sökülüp başka bir yere sorunsuz olarak parçalar halinde taşınabilir. Ayrıca tek olarak ya da gruplar halinde kullanılabilirler.

Ömrünü tamamlamış rüzgar türbinlerinin söküm maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini kolayca karşılamaktadır. Bu santrallerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilebilmektedir. Genelde kırsal alanlara kurulan bu santraller, arazi için ödenen satın alma veya kira bedelleri ile yöredeki insanlara ciddi bir ekonomik girdi sağlamaktadır. Ayrıca yapım aşamasında da, inşaat faaliyetleri yöredeki insanlara istihdam olanakları yaratır. Genellikle Rüzgar Enerjisi santralleri, rüzgarın çokluğu sebebiyle çıplak ve yüksek tepe ve tepeciklere kurulmaktadır. Bu tepeler ancak küçük ekonomik faaliyetler, hayvancılık veya tarımsal faaliyetler için kullanılabilen yerlerdir. Genel olarak rüzgar enerjisi santralleri için dikilen türbinlerin her biri en fazla 100 m²'lik bir alan kaplamaktadırlar. Her bir türbinin birbirlerinden uzaklıkları ise kanat çapına ve rüzgar rejimine bağlı olarak 50-200 metre arasında değişmektedir. Rüzgar türbinleri arasında kalan arazinin ise başka faaliyetler için kullanılmasında hiçbir sakınca yoktur. Nitekim yurt dışında bu alanların tarımsal ve hayvancılık faaliyetleri için sıkça kullanıldığı görülmektedir.

Ayrıca dünya genelinde rüzgar santrallerinin off-shore tabir edilen deniz üstünde kurulan tipleri oldukça yaygınlaşmaktadır. Bu durumda santral inşaatı için alan kaybı söz konusu bile olmamaktadır. Rüzgar santralleri, termik, hidrolik vb. santrallerle, ekonomik açıdan rekabet edebilecek düzeye gelmiştir. kWh başına maliyeti 3-6 cent civarındadır. Bununda yakın zamanda düşeceği tahmin edilmektedir.

BÖLÜM 9 TÜRBİN KANAT PROFİL KESİTLERİ ve ANALİZİ

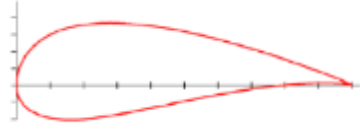
Cismin referans hattı ile hava akışı arasında yaptığı açı hücum açısı (α) olarak adlandırılır. Kanat profilinin referans hattına veter hattı da denir. Kanadın kambur olan üst kısmında akışkanın kat etmesi gereken yol, alt kısmından daha fazladır. Bu sebeple üstteki akışkan daha hızlı hareket eder. Bernoulli prensibine göre hızı artan havanın statik basıncı düşer. Bir cismin birbirine zıt iki yüzeyinde farklı hızlarda hareket eden hava basınç farkı oluşturarak aerodinamik bir kuvvet oluşturur. Bernoulli prensibinden kaynaklanan bu aerodinamik kuvvet (taşıma) sayesinde kanat havada kalabilir. Detaylı anlatım ve denklemlere önceki bölümlerde yer verilmiştir.



Şekil 9.1 Kanat Profili

Bir rüzgar türbinin verimi, kanatların üzerine doğru esen rüzgarın yönü ve hızı ile doğrudan etkilenir. Doğada rüzgarın çok farklı yönlerden farklı hızlarda estiği gerçeği göz önüne alındığında, rüzgar türbinleri için optimize edilmiş, yüksek performans sağlayacak kanat profili tasarımları çeşitlilik gösterir.

Bu kısımda seçilen 2 farklı kanat profilini incelenecektir. Analizimizde reynolds sayısı 1.37×10^5 , akışkan olan havanın viskozitesi 1.7894×10^{-5} kg/ms ve hızı 15 m/s alınmıştır.

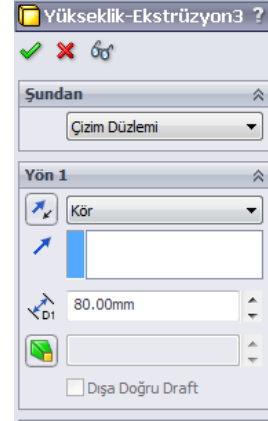
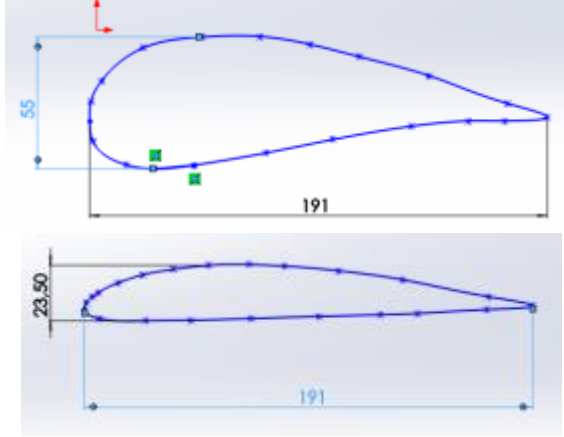


FX 69-PR-281



CLARK Y

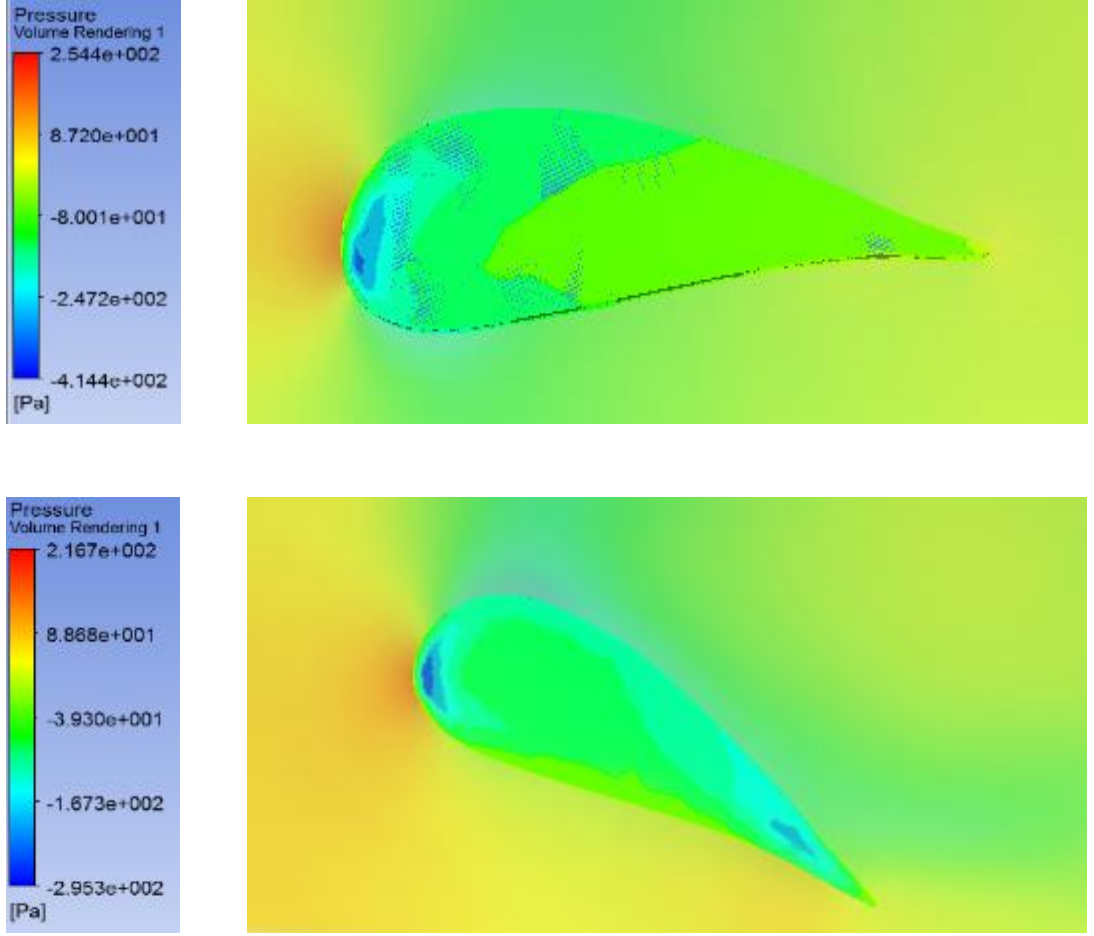
Şekil 9.2 Seçilen Kanat Profilleri



Şekil 9.3 Profil Boyutları

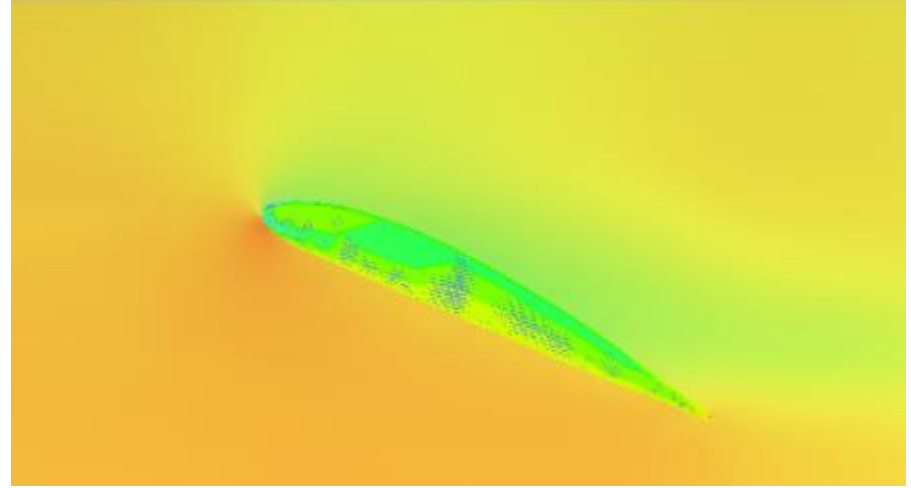
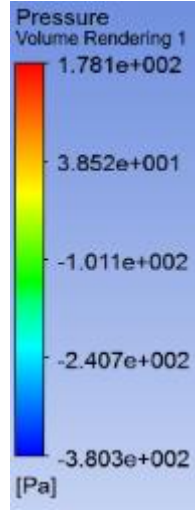
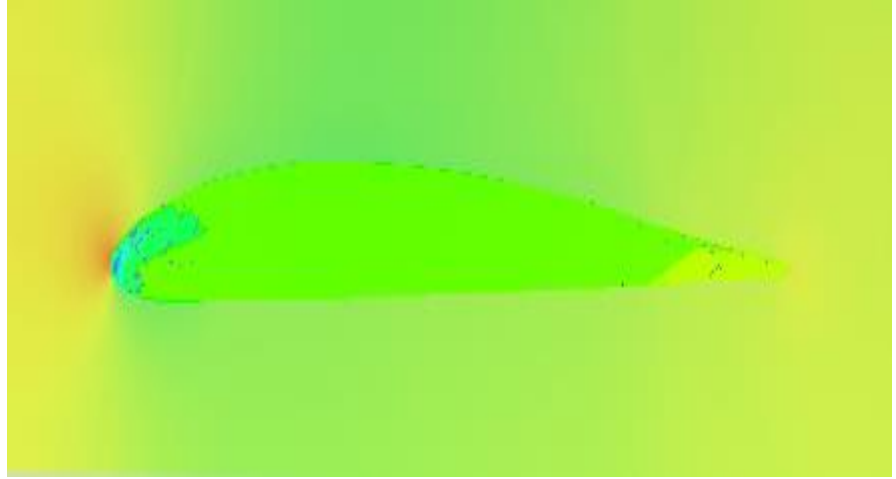
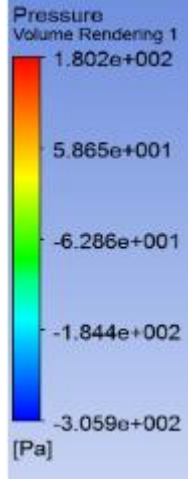
9.1 Statik Basınç Konturları

Kanat profilleri 0^0 hücum açılarında, gelen rüzgarı ilk önce hücum kenarı karşılar ve yüksek basınç bölgesi oluşur. 0^0 hücum açısında, durma noktası bölgesinde, kanadın uç kısmında yüksek basınca maruz kaldığı görülmektedir. Bu noktada hız sıfır olduğundan burada yüksek basınç beklenen bir durumdur. Kanatların üst kısımlarında akışkanın hız kazanmasıyla düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Aynı şekilde, alt kısımlarda da düşük hızdan dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmaktadır. Hücum açısı arttırıldığında kanadın üstünde basınç düşüşünün arttığı ve alt kısımda basınç artışının olduğu görülmektedir.



FX 69-PR-281 Profili Statik Basınç Konturları

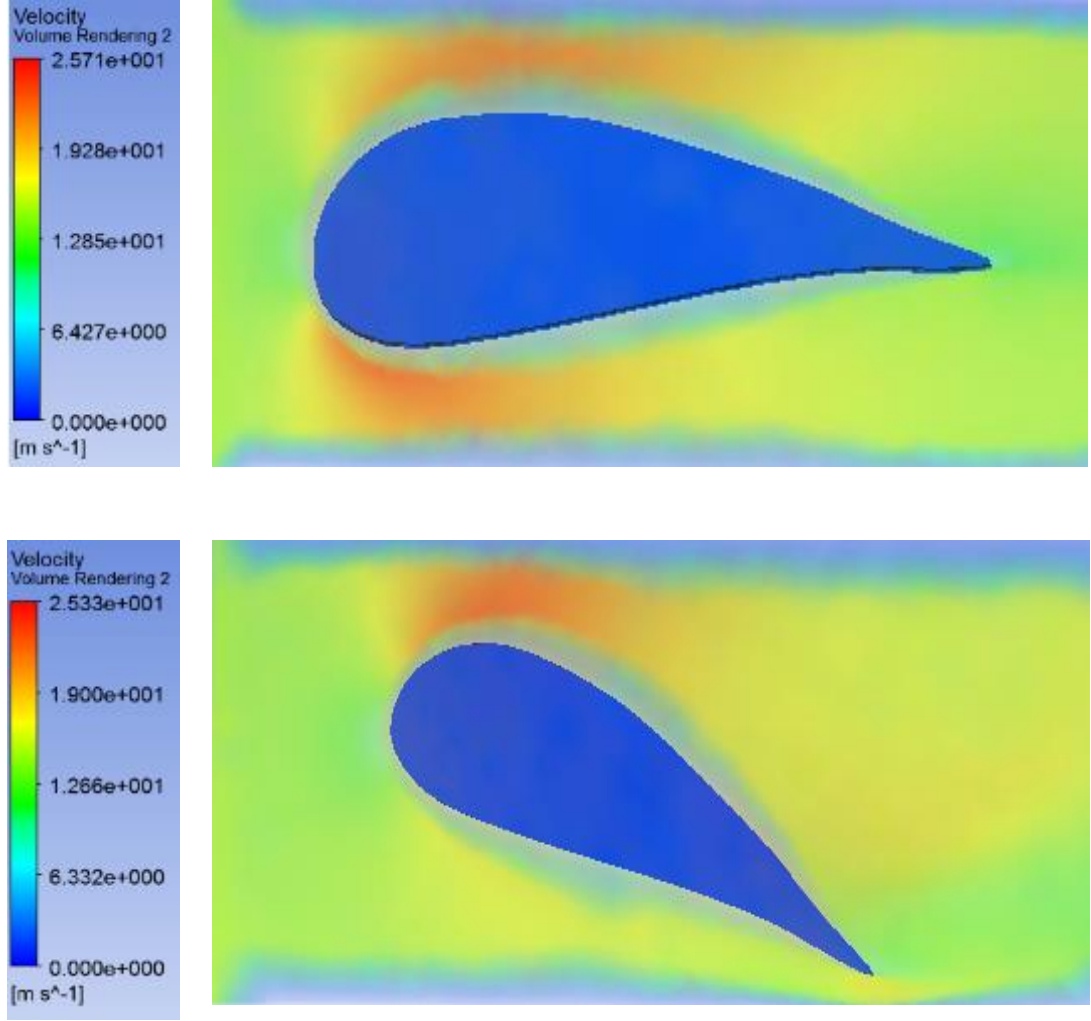
Hücum açısı hava ortamında 25^0 'ye arttırıldığında, kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı maksimum seviyeye ulaşp maksimum kaldırma kuvveti elde edilir. Daha sonra tutunma kaybına uğrayacak kanat profili, üst kısımda hala düşük basınç alanı görülse de, kanadın alt ve üst bölgesi arası basınç farkı daha az olacaktır ve bu hücum açısından sonra giderek azalacaktır.



CLARK Y Profili Statik Basınç Konturları

9.2 Hız Konturları

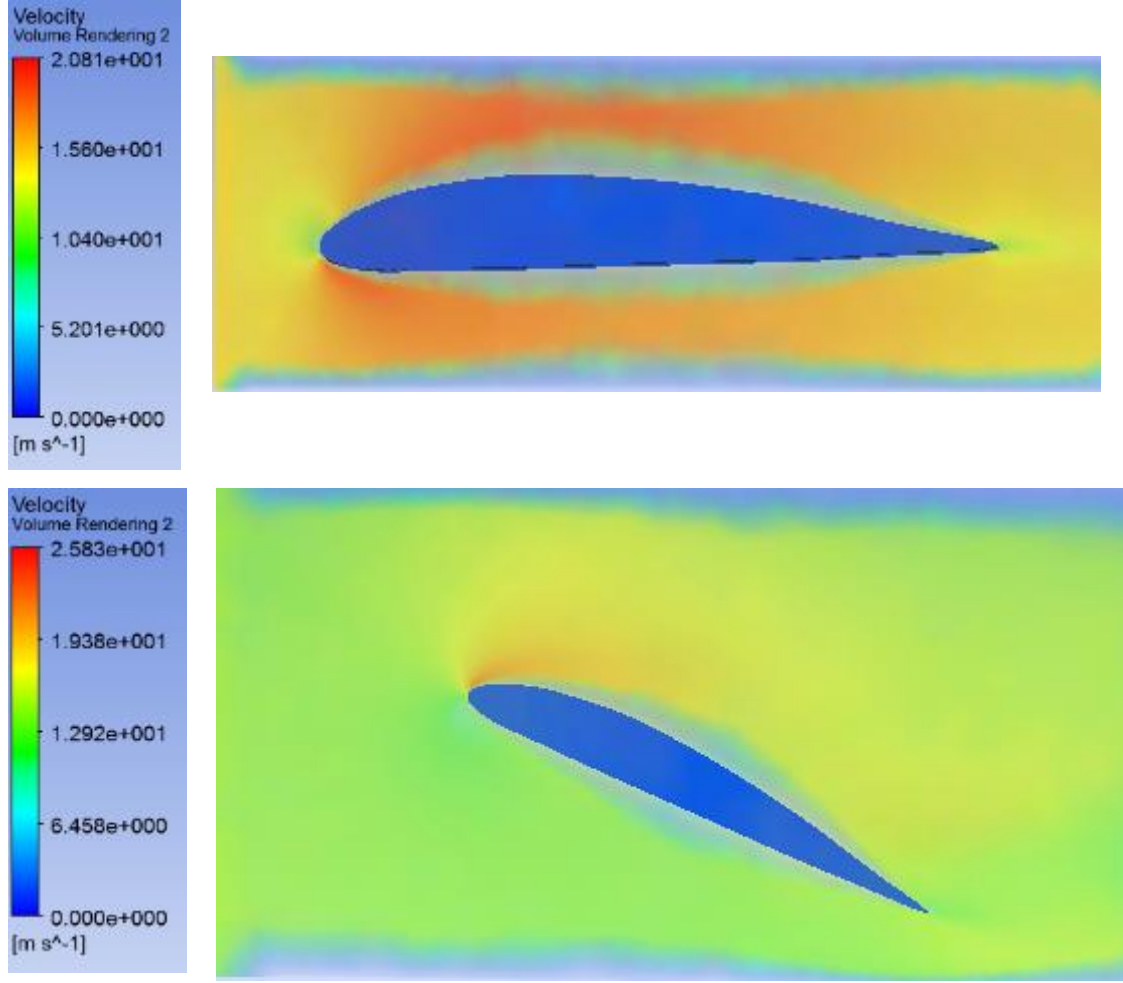
Durma noktası bölgeleri yüksek basınca maruz kaldığından buradaki hız bölgeleri de azdır ve tam ortasında hız sıfırdır. Kanatlarda kamburluk oluşturularak üst yüzeydeki alanın artırılması sağlanır ve böylece kanat profili üzerinden geçen havanın hızı artırılır. Hava hızının artmasıyla Bernoulli denkleminde basınç daha fazla düşmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak kaldırma kuvveti de artmaktadır. Fakat belirli hücum açısından sonra akışta, kanat profilinden ayrılmalar başlar. Üst kanattaki basınç değeri artar ve kanat profilinin alt ve üst kısımları arasında basınç farkı azalır ve böylece kaldırma kuvveti de azalır.



FX 69-PR-281 Profili Hız Konturları

FX 69-PR-281 Profilinin hava ortamında 0^0 hücum açısında, serbest akım bölgesine 15 m/s hızla giren hava, kanat profilinin hücum kenarı ucunda sıfırdır. Hız değeri, profil üzerinde 21-23 m/s hızlara kadar ulaşmaktadır. Hücum açısının artmasıyla kanat üzerinde hız alanı artarken kaldırma kuvveti de artmaktadır.

Hava ortamında 25^0 hücum açısında, kanat üzerinde hız 23 m/s değerine kadar ulaşmaktadır fakat kanadın firar kenarının üst kısmında hız azalmasından dolayı basınçta artış, alt bölgesinde hız artısından dolayı basınçta düşüş görülür bundan dolayı kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı azaldığından firar kenarında akışta ayrılmalar görülür ve bu da sürüklenme kuvvetinde artışa neden olacaktır.



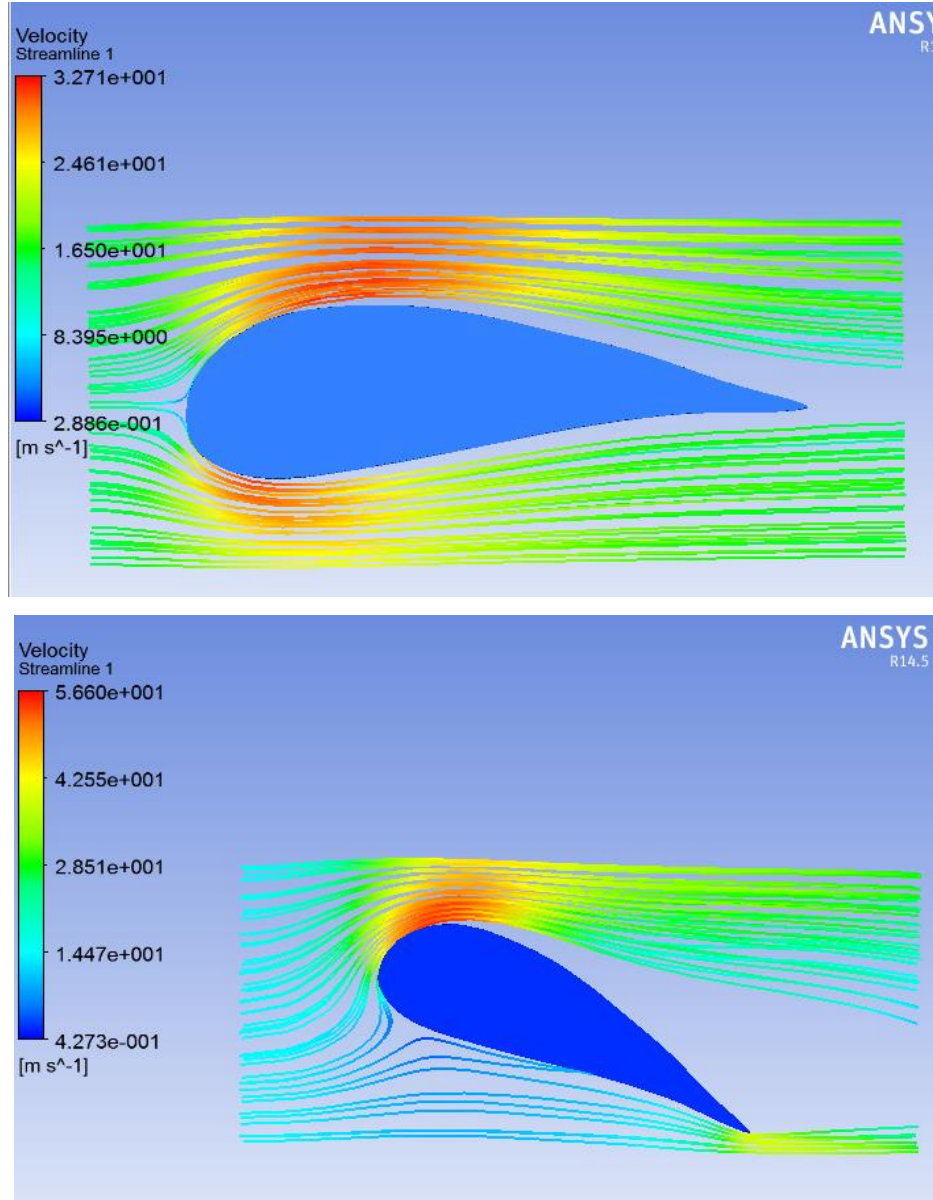
CLARK Y Profili Hız Konturları

Hava ortamındaki 0° hücum açısında, CLARK Y kanat profilinin üst kısmındaki hava hızı 18 m/s değerine kadar ulaşmaktadır. Profilin alt kısmında serbest akım hızına yakın değerler oluşmuş fakat firar kenarına doğru gidildikçe azalmaktadır.

25° hücum açısında kanat üzerinde maksimum 20 m/s hava hızına kadar ulaşılabilirken, yüksek hız alanı kanadın sadece hücum kenarı üzerinde oluşmaktadır ve kanat yüksek tutunma kaybına uğrayarak kanadın hücum kenarına yakın bölgesinden akış ayrılmaları görülmektedir. Kanat bu durumda yüksek sürüklenme kuvvetine maruz kalacaktır.

9.3 Hız Akım Çizgileri

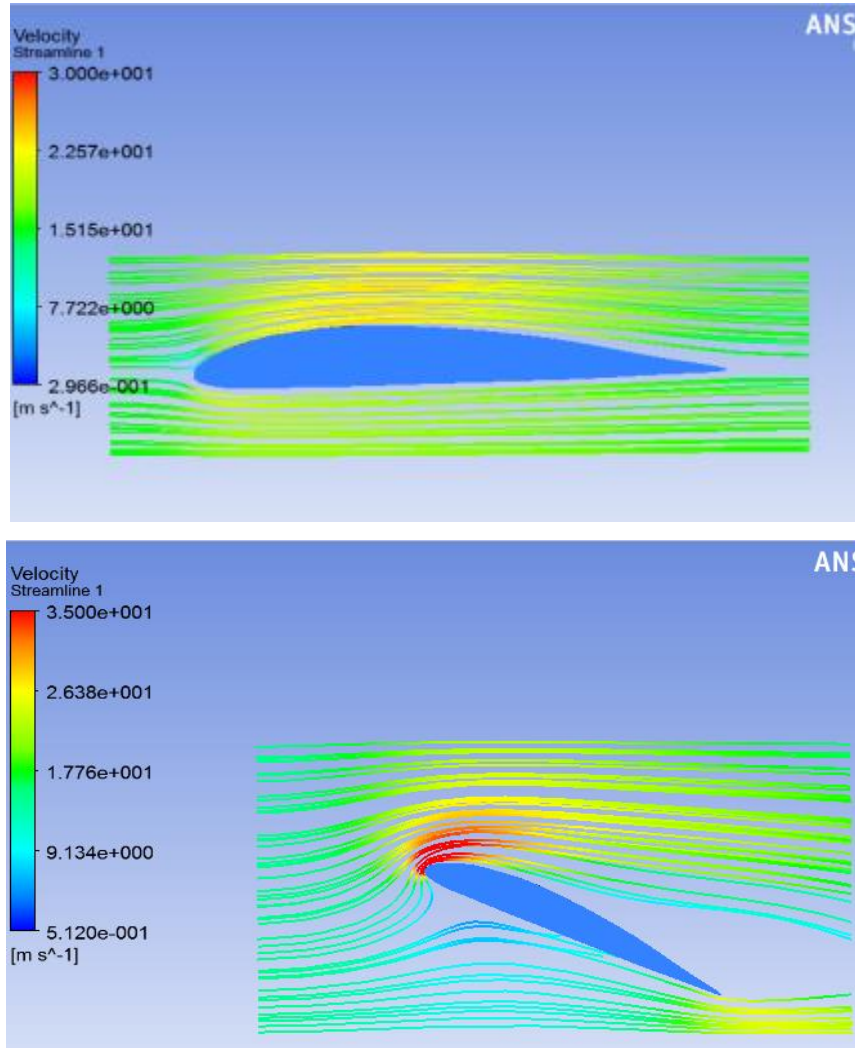
Kanat profili üzerinde, laminar ayrılma kabarcığının nerede oluştuğunu ve kanadın hangi hücum açısından sonra akım ayrılmasına uğradığını görebilmek için kanat üzerine akım çizgileri gönderilmiştir.



FX 69-PR-281 Profili Hız Akım Çizgileri

Hava ortamındaki 0° hücum açısında; FX 69-PR-281 Profilinin alt kısmında kamburluktan dolayı bir laminar ayrılma kabarcığının oluştuğunu görmekteyiz. Bu ayrılma kabarcığına sebep olarak; düşük Re sayılı akışlarda laminar akım viskoz kuvvetlerin etkisi ile çok çabuk sınır tabakadan ayrılmaya baslar. Bu bölgede akım, viskoz etkilerin ve ters basınç gradyanlarının üstesinden gelemmez. Şekilde görüldüğü gibi laminar sınır tabaka ayrılması ve ayrılma kabarcığı meydana gelir. Bu kabarcıkta geri akış ve ters hız profilleri oluşur. Ayrılma kabarcığından sonra basınç toparlanmaya çalışır. Yeniden tutunma ile birlikte akış yüzeye yapışır.

25° hücum açısında yani tutunma kaybı açısından laminar ayrılma kabarcığının daha da yok olduğu görülmekte fakat bu sefer kanadın firar kenarında akım ayrılması oluşmuş ve bu açıdan sonra sürüklenme kuvvetinin daha fazla arttığı görülmüştür.



CLARK Y Profili Hız Akım Çizgileri

Kanat üzerindeki akış ayrılmaları ne kadar geç olursa kanat aerodinamiği açısından o kadar iyidir. Kanat profili üzerinde ayrılmaya geçen bölgede çok düşük hız alanları oluşur ve kanadın üst kısmında basınç kuvvetleri artar. Böylece, kanat profilinin alt ve üst kısımları arasındaki basınç farkı azalarak kaldırma kuvvetinde düşüş, sürüklenme kuvvetinde artış meydana gelir.

CLARK Y Profili kanat profili, hava ortamlarında 0^0 hücum açısında laminar ayrılma kabarcığının ve firar kenarında sınır tabaka ayrılmasının olmadığı görülmüştür.

25^0 hücum açısında NACA4412 kanat profilinin akım çizgileri görülmektedir. Kanat profilinde, hücum kenarına yakın bir yerden akış ayrılması meydana gelmektedir. Kanat üzerinde akım ayrılmasıyla birlikte sürüklenme kuvveti hızla artıp, kaldırma kuvveti azalacaktır.

KAYNAKLAR

- 1-)[U.S. Department of Energy Wind Energy Program Produced for the U.S. Department of Energy by the National Renewable Energy Laboratory, A DOE National Laboratory, DOE/GO-102002-1567 May 2002.]
- 2-)[Uçar, S.(2007). Rüzgar Enerjisiyle Elektrik Üretimi Ve Kayseri İli İçin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]
- 3-)[Şimşek, V.,(2007) Rüzgar Enerjisi Ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı].
- 4-)[Demirtaş, M. (2008). Güneş Ve Rüzgâr Enerjisi Kullanılarak Şebeke ile Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı Ve Uygulaması, yayınlanmış doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]
- 5-)[Yerebakan,M.“Rüzgar Enerjisi”,İstanbul Ticaret Odası,İstanbul, 33: 7-8, 70-90 (2001)]
- 6-)[Güney, İ., Noğay, S.,Taşkın, S.,“Rüzgar Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri”, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 137-144 (2001)].
- 7-)[Walker, J.F., Jenkins, N., “ Wind Energy Technology”, Jhon Wiley & Sons, New York, 11-15, 20-23 (1997)].
- 8-)[Heier S., “Grid Integration Wind Energy Conversion Systems”, Waddington R., John Wiley & Sons Ltd., England, 31-117 (2006)].
- 9-)[Matsui M., Dehong X., Longyun K., Yang Z., “Limit cycle based simple MPPT control scheme for a small sized wind turbine generator systemprinciple and experimental verification”, Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2004, 3: 1746 - 1750 (2004)].
- 10-)[Güven, H.R., Özarslan, M. İ., “Rüzgar Türbinleri ile Enerji Elde Edilmesi”, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8 (1): 118-122 (2004)].
- 11-) [International Wind Energy Development World Market Update 2006 Forecast 2007-2011, BTM Consult ApS, www.btm.dk, 26 March 2007].

- 12-) [Çakır, A.K. (2007). İskenderun-Belen Bölgesi Rüzgar Enerjisi ve Elektrik Üretim Potansiyeli, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı]
- 13-) [Özdamar, A., 2000b.” Alman Yenilenebilir Enerjiler Yasası ve Ülkemiz Rüzgar Enerjisi Açısından Değerlendirilmesi”, Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, Sayı: B.30.2.EGE.0.96.00.00/SD00034, İzmir].
- 14-)[Etemoğlu, A.B., İşman, M.K., 2004. Enerji Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi, Mühendis ve Makine, sayı 529, 1-7].
- 15-[EİE, [www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/Ruzgar Enerjisi Gozlem Istasyonu.doc](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/Ruzgar_Enerjisi_Gozlem_Istasyonu.doc)]
- 16-)[Ceylan, M.(2006), Muğla Bölgesi’nde Mermer Endüstrisinin Elektrik Enerjisi Talebini Karşılama için, Matlab Paket Programı ile Rüzgar Çiftliği Tasarım Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Anabilim Dalı]
- 17-)[Guided Tour on Wind Energy, Danish Wind Industry Association, www.windpower.org, 2002]
- 18-)[İnternet: Elektrik mühendisleri odası http://www.emo.org.tr/eski/merkez/sempozyumlar/enerji_sempozyumu.htm#DUNDAR (2005)].
- 19-)[Öger, Ö. , (2006), Pelton Tipi Rüzgar Türbini Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretme, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- 20-)[Şen, Ç., 2003. Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 128 s, İzmir].
- 21-)[www.eie.gov.tr/YEKrepaREPA]
- 22-)[AKKAYA Ali Volkan, AKKAYA KOCA Ebru, DAĞDAŞ Ahmet, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Açidan Değerlendirilmesi”, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı Cilt I, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 16–18 Ekim 2002]
- 23-)[PEKER Zeynep, “Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Etkileri ve Bu Etkilerin Azaltılmasında Planlamanın Rolü”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, II. Çevre ve Enerji Kongresi, İstanbul, 15–16–17 Kasım 2001.]
- 24-) [bilmekvar.com]
- 25-)[<http://www.dikeycozumler.com/portfolio/ruzgar-enerjisi/ruzgar-alt-1/>]
- 26-)[<http://www.vipmuhendislik.com/haber/ruzgar-turbinleri.html>]

- 27-) [CAM ELYAF San.A.Ş., Cam Elyaf Sanayii Yayınları, CTP Teknolojisi, www.camelyaf.com]
- 28-) [POLİYA Poliester San. Ve Tic. A.Ş., Reçine İnfüzyon Uygulaması, www.poliya.com.tr]
- 29-)Şentürk U., Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik olarak İncelenmesi, İzmir, 2007
- 30-) [Uysal, Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul, 2008]
- 31-) [Karabağ S., „İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi“, Rüzgar Türbini Kanadı İmalatı, İzmir, 2011]
- 32-)[GURIT, Blade Manufacturing Process, <http://www.gurit.com/>]
- 33-)[ÖZDAMAR, A.: “Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı Üzerine Bir Araştırma”, Güneş Günü Sempozyumu, S. 151-160, TÜBİTAK ve MMO Kayseri Şubesi Yayını, Kayseri, 1999]
- 34-)[Tağmaç Derya, H.(2010). İkili Kanat Profili Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava ve Su Akışkanlarının İncelenmesi ve Aerodinamik Performans Analizleri Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı]

ÖZGEÇMİŞ



Berkcan ÇAKIR 1993'de İzmir'de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; İ.T.O. VAKFI SÜLEYMAN TAŞTEKİN Anadolu Teknik Lisesi, Bilgisaya Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2011 yılında Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Halen bu bölümde eğitimini sürdürmektedir.

İletişim Bilgileri

Adres: Efeler Mah., No. 26, D: 6

Buca / İZMİR

E-posta: berkcancair@hotmail.com

ÖZGEÇMİŞ



Efe HELVACI 1993'de Amasya'nın Merzifon ilçesinde doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Merzifon Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2011 yılında Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Halen bu bölümde eğitimini sürdürmektedir.

İletişim Bilgileri

Adres: Sofular Mah. Zeren Sok.

Gamze Sitesi A Blok

Merzifon / AMASYA

E-posta: efehelvacı0@gmail.com