

T.C.

177098

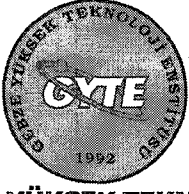
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİKEY EKSENLİ BİR DARRIEUS TÜRBİN
DİZAYN EDİLMESİ VE KANAT ÜRETİMİ

Bahtiyar DURSUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

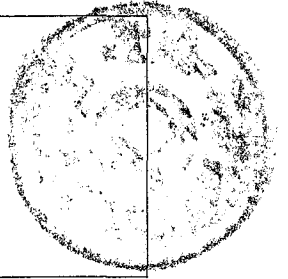
TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr.Ercan ERTÜRK

GEBZE
2006



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



Bahtiyar DURSUN' un tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03.01.2006 Tarih ve 2006/01 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Enerji Sistemleri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Yrd. Doç. Dr. Ercan ERTÜRK

ÜYE

:Doç. Dr. Selim SİVRİOĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.17.01.2006..... Tarih ve 2006/12..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET



Dünya üzerinde fosil yakıtların giderek azalması, ülkeleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışı içine girmesini sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar, doğada bol bulunması, temiz enerji kaynağı olması, bedava olması ve en önemlisi CO₂ emisyonu olmayan enerji olması ile tercih unsuru olmuştur. Rüzgar enerjisi rüzgar türbinleri vasıtasıyla kullanılacak enerji türlerine çevrilmektedir. Rüzgar türbinleri mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren mekanizmalardır. Rüzgar türbinleri ise kendi aralarında dikey ve yatay eksenli olmalarına göre sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışmada, dikey eksenli bir darrieus rüzgar türbini tasarımı aşama aşama gerçekleştirilecektir. Ayrıca türbin kanadı üretimi yapılacaktır. Dikey eksenli rüzgar türbininde ilk olarak kanat tasarımı, kanat profili seçilerek gerçekleştirilecektir. Kanat tasarımından sonra kanatların monte edileceği rotor mili tasarlanacaktır. Rotor milini çevreleyen türbin direği tasarlanacaktır. Daha sonra rotor mili ve türbin direğinin monte edileceği kule tasarımı gerçekleştirilecektir. Kule tasarlandıktan sonra kulenin içerisinde yer alan alternatör ve dişli kutusu tasarımı yapılacaktır. En son olarak mekanik tasarım yapıldıktan sonra türbini dengede tutmak için destek sistemi tasarımı yapılacaktır. Darrieus rüzgar türbini tasarımı tamamlandıktan sonra türbin kanadı üretilecektir.

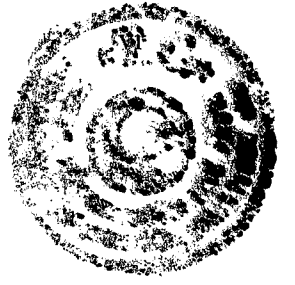
SUMMARY



Decrease of fossil fuels all around the world, made the countries search for new and renewable energy sources. Among the renewable energy sources, wind energy is much preferred because of its existence in the nature, being clean, being cheap and most important, not having CO₂ emission. Wind energy can be converted to any consumable energy by means of wind turbines. Wind turbines are mechanisms which convert mechanical energy to electrical energy. Wind turbines can be classified in two categories: vertical axis and horizontal axis.

In this study, a Darrieus turbine with vertical axis will be designed step by step. Also the airfoil of the wind turbine will be produced. First, the airfoil will be designed by choosing the profile of the airfoil. After the airfoil has been designed, the rotor shaft which the airfoils is assembled, will be designed. Then the turbine pole surrounding the rotor shaft will be designed. Then the tower which the turbine pole and rotor shaft is assembled. After designing the tower, the gearbox and alternator will be designed. At last, after making the mechanical design, support system design for balancing the turbine will be made. After completing the design of the darrieus wind turbine, the airfoils of the turbine will be produced.

TEŞEKKÜR



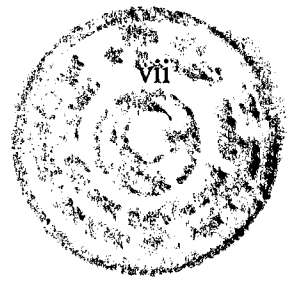
Tez çalışmamda beni destekleyen ve her türlü konuda bana yardımcı olan danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ercan ERTÜRK'e fikirlerini paylaştığımız çalışma arkadaşım Arş. Gör. Cihan GÖKÇÖL, Arş. Gör. M. Baha DİNİBÜTÜN ve Uzman Ferit FIÇICI'ya, teşekkür ediyorum.

Aynı zamanda her daim desteklerini esirgemeyen Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kimya Mühendisliği bölümündeki çalışma arkadaşlarıma da çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca sabırla beni bu günlere yetiştiren ve her zaman yanımda olan annem Ayten DURSUN, babam Orhan DURSUN' a ve her daim yanımda olan bana destek olan kadeşlerim Neslihan DURSUN, Cemal DURSUN ve nişanlım Sibel ÜLKER'e en içten dileklerle teşekkür ediyorum.

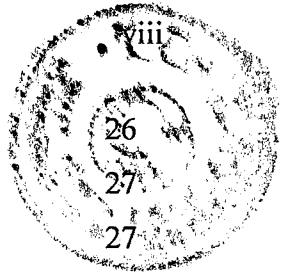
OCAK, 2006

Bahtiyar DURSUN



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	i
2. RÜZGAR ENERJİSİ	4
2.1. Rüzgarın Tarihçesi	4
2.2. Rüzgar Oluşumu	5
2.3. Rüzgar Enerjisinin Üstünlükleri	9
2.4. Rüzgar Enerjisinin Uygulama Alanları	9
2.4.1. Rüzgar Enerjisinin Mekanik Uygulamaları	9
2.4.2. Rüzgar Enerjisinin Elektriksel Uygulamaları	10
2.4.3. Rüzgar Enerjisinin Isıl Enerji Uygulamaları	10
2.5. Rüzgar Hızının Ölçülmesi ve Enerjisi Potansiyeli	10
2.5.1. Rüzgar Hızının Ölçülmesi	10
2.5.2. Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	11
2.5.3. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	14
2.6. Betz Kanunu	17
2.7. Aerodinamik Kuvvetler	19
2.8. Rüzgar Türbinleri	21
2.8.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	23
2.8.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	24
2.9. Rüzgar Türbin Elemanları	25
2.9.1. Temel	26
2.9.2. Kule	26



2.9.3. Kanat	26
2.9.4. Dişli Kutusu	27
2.9.5. Jeneratörler	27
3. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ	29
3.1. Genel Özellikleri	29
3.2. Darrieus Rüzgar Türbin Aerodinamiği	31
3.3. Kanat Tasarımı	34
3.3.1. Kanat Geometrisi	34
3.3.2. Profil Şekilleri ve Aileleri	36
3.4. Darrieus Rüzgar Türbini Kule Tipleri	37
3.5. Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistemleri	37
3.6. Darrieus Rüzgar Türbini Yatak ve Rulman Sistemi	38
4. DİKEY EKSENLİ BİR DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNİNİ DİZAYN EDİLMESİ	41
4.1. Darrieus Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı	42
4.2. Darrieus Rüzgar Türbini Kule Tasarımı	48
4.3. Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistem Tasarımı	51
4.4. Darrieus Rüzgar Türbini Yatak ve Rulman Sistemi Tasarımı	53
5. DİKEY EKSENLİ BİR DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNİNİN KANAT ÜRETİMİ	57
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Atmosferin Genel Sirkülasyonu	7
2.2 Anemometre Çeşitleri a) Ultrasonik Anemometre b) Kup Anemometre	11
2.3 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Kıtasal Dağılımı	12
2.4 Bölgesel Ortalama Rüzgar hızları ve Rüzgar Yoğunlukları	14
2.5 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Dağılımı	16
2.6 Türkiye Rüzgar Hızı Dağılımı(10m yükseklikte)	16
2.7 Betz Kanunu	17
2.8 Kanat Profilindeki Basınç Alanları	19
2.9 Kanat Profiline Etkiyen Kuvvetler	20
2.10 Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tipleri	24
2.11 Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Tipleri	25
3.1 Darrieus Rüzgar Türbini Yapısı	29
3.2 Çeşitli Darrieus Rotor Şekilleri	30
3.3 Rüzgar Türbin Tipleri ve Güç Katsayıları	31
3.4 Kanada Etki Eden Rüzgar Hız Bileşenleri	32
3.5 W hızı ve Kuvvet Bileşenleri	33
3.6 Kanat Profil Tipleri	34
3.7 Kanat Profillerinin Tarihsel Gelişim Süreci	35
3.8 Kanat Profil Geometrisi	35
3.9 Değişik Türde Tasarlanmış Kanat Profilleri	36
3.10 Eole- C Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistemi	38
3.11 Bilyalı ve Konik Rulmanlar	39
3.12 Kardan Şaftı	40
4.1 Kanat Pozisyonu ve Merkeze Uzaklıkları	41
4.2 NACA 0021 Kanat Profili Şekli	45
4.3. Kanat Profili Üretimi	46
4.4 Kanat Profili Son Hali	46
4.5 Kanat Profilinin Değişik Açılardan Görünümü	46
4.6 Tasarlanan Darrieus Rüzgar Türbini Kanadı	47

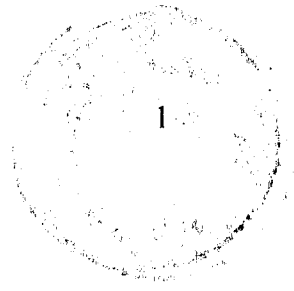


4.7	Üç Adet Kanadın 120° Açılarla Mile Yerleştirilmiş Hali ve Üsten Görünüşü	47
4.8	Kulenin Tasarımı ve Ölçülendirilmesi	48
4.9	Koruma Kutusu ve Önden ve Üsten Görünüşleri	50
4.10	Destek Sistem Kare Profil Boru	50
4.11	Türbin Direğinin Profil Borularla Zemine Sabitlenmesi	51
4.12	Kardan Şaftı ve Rotor Bağlantısı	52
4.13	Rulmanlar ve Rotor Mili Üzerinde Yerleri	53
4.14	Türbin kulesi ve Türbin Direği Montajı	54
4.15	Darrieus Rüzgar Türbininin Mekanik Tasarımı	55
4.16	Destek Sistemli Darrieus Rüzgar Türbini En Son Hali	56
5.1	NACA 0021 Kanat Profili $c=50$	59
5.2	NACA 0021 Kanat Üretimi	60
5.3	Yanyana Dizilmiş NACA 0021 Kanat Profilleri	60
5.4	Çubuk İçerisinden Geçirilerek Tek Bir Kanat Oluşturma	61

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Enlemlere Göre Genel Hakim Rüzgar Yönleri	7
2.2	Genel olarak Rüzgarların Sınıflandırılması	8
2.3	Dünyada Kurulu Rüzgar Gücü	12
2.4	Rüzgar Türbin Tipleri ve Kullanım Yerleri	22
2.5	Uç Hız Oranına Göre Kanat Sayısı	24
4.1	NACA 0021 kanat profili dataları	45
5.1	Üretilecek Kanat Profili Dataları	59





1. GİRİŞ

Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Sanayinin olduğu kadar halkın günlük yaşantısının da en önemli girdilerinden olan enerjiye talep her geçen gün daha da artmaktadır. Bu talep karşılanırken enerji kaynakları da hızlı bir şekilde tükenme göstermektedir. Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarının büyük bir kısmının tükenbilir nitelikte olması, ülkeleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları aramaya zorlamıştır. Fosil kökenli yakıtların hızla tükenme eğilimi içinde olması ve yavaş yavaş sona yaklaşıldığı sinyallerinin alınması üzerine ülkeler enerji politikalarını yeniden yapılandırmaya gitmişlerdir. Enerji politikalarının sonucu olarak ülkeler, enerji taleplerini karşılamada fosil yakıtlara alternatif oluşturmak için yeni enerji türleri arayışı içine girmişlerdir. Sürdürülebilir bir dengenin sağlanabilmesi için enerji kaynak çeşitliliğinin sağlanması ve konvansiyonel enerji kaynaklarının yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıma sunulması büyük önem kazanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi yüzyıllardır insanoğlunun hizmetindedir. Yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerji kaynakları olup, çevreyi kirletmemektedir. Diğer enerji kaynaklarının özellikle fosil kökenli yakıtların çevreye verdiği CO₂ gibi zararlı gazların emisyonuna sebep olmamaktadır. En önemlisi dışa bağımlılığı ortadan kaldıran özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş, biomass, jeotermal ve hidrolik gibi enerji türleridir[Özerdem, 2003].

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından ülkemiz oldukça iyi bir potansiyele sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlisi rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi çevrime uğramış güneş enerjisidir. Rüzgar atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır.

Doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Havanın özgül kütlesi az olduğundan rüzgardan sağlanacak enerjinin miktarı hızına bağlıdır.

Türkiye'nin rüzgar potansiyeli oldukça iyi olmasına rağmen, elektrik üretimi veya farklı bir amaçta insanlığın hizmetine sunulması oldukça yenidir. Avrupa'nın en iyi rüzgar enerji potansiyeline sahip olması, Türkiye'nin enerji talebinin tamamının karşılanabileceği teorik olarak hesaplanmıştır.

Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü, mevcut potansiyelinin yanında ihmal edilecek kadar azdır. Türkiye'nin değişik bölgelerinde rüzgar hızları belirli aralıklarda değişim göstermektedir. Her rüzgar hızına uygun bir rüzgar türbini tasarlamak mümkündür. Rüzgar türbini seçimine; rüzgar türbininin kurulacağı bölgeden alınmış son beş yıl içinde rüzgar hız ölçümleri değerlendirilerek karar verilir. Burada ana kriter rüzgar hızına uygun optimum rüzgar türbini seçmek ve tasarımı gerçekleştirmektir.

Rüzgar türbinleri genel olarak büyük güçlü ve küçük güçlü olmak üzere iki ana başlıkta toplanmaktadır. Rüzgar potansiyeli yüksek olan bölgelerde genellikle büyük güçlü rüzgar türbinleri elektrik üretme amaçlı olarak kurulmaktadır. Rüzgar potansiyeli düşük olan bölgelerde ise küçük güçlü dikey eksenli rüzgar türbinleri sulama, pompalama gibi işlemlerde kullanma amaçlı kurulmaktadır.

Rüzgar türbini tasarımının temelinde, mevcut rüzgar potansiyeline en uygun rüzgar türbin tipinin ve kullanım amacının belirlenmesi gerekir. Gerekli bölgesel rüzgar potansiyel verileri değerlendirilerek, gerekli mekanik hesaplar yapıldıktan sonra tasarıma geçilir.

Bu tezde, dikey eksenli bir rüzgar türbininin dizaynı ve kanatların üretilmesi aşama aşama gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde rüzgar ve enerji hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde rüzgar enerjisi, rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi, rüzgarın oluşumu rüzgarın genel özellikleri üzerinde durulmuştur.

Dünyanın ve Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelinden bahsedilmiştir. Rüzgar türbinleri sınıflandırılarak betz kanunu ve rüzgar türbin elemanları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde ise darrieus rüzgar türbininin genel özellikleri, kanat aerodinamik özellikleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Darrieus rüzgar türbininin kısımlarının tasarımı ayrı ayrı incelenmiştir.

Dördüncü bölümde kule tasarımı, kanat tasarımı, yatak, rulman sistem tasarımı ve destek ve koruyucu sistem tasarımı olarak dört kısımda darrieus rüzgar türbini tasarım parametreleri anlatılmıştır. Bu bölümde türbinin mekanik tasarımı tamamlanarak üretimi yapılacak hale getirilmiştir.

Beşinci bölümde, Darrieus rüzgar türbini kanat üretimi aşama aşama anlatılmıştır.

Son bölüm olarak, darrieus rüzgar türbini bütün bir sistem olarak ve rüzgar potansiyeli ülkemiz açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar enerjisi değişime uğramış güneş enerjisi olarak tanımlanabilir. Rüzgar enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi, insanlığın gelecekte büyük ölçekte kullanmayı tasarladığı, çevre dostu bir enerji kaynağıdır.

Yeni enerji kaynakları arayışı çalışmalarında öncelikli bir yeri vardır. Bunun nedeni tükenmez, temiz ve ekonomik olmasıdır. Özellikle sanayinin devamını sağlamak için; yeni enerji kaynaklarından ucuz ve bol olan rüzgar enerjisine yönelinmektedir. Devamlı mevcudiyeti mümkün olmamakla birlikte, yapılan hesaplar sonucunda rüzgar enerjisi potansiyelinin hidroelektrik kaynaklara göre 15-20 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

2.1 Rüzgar Makinalarının Tarihçesi

Rüzgarın tarihçesiyle ilgili değişik bilgilere rastlanmakla birlikte, en eski rüzgar kuvvet makinesi olan yel değirmeninin, bundan 3000 yıl önce İskenderiye yakınlarında yapıldığı tahmin edilmektedir. Türkler tarafından ilk defa M.S. 640 yılına doğru imal edilen yel değirmeni tipleri, haclı seferleri sırasında Avrupa'ya geçmiştir. Yel değirmenleri, 1105 tarihinde Fransa'da görülmeye başlanmış ve 1143'de İngiltere'de ilk yel değirmeni yapılmıştır. XIX. yüzyıl sonlarına doğru Almanya'da rüzgar ile çalışan kuvvet makineleri görülmeye başlanmıştır. Hollanda'da ise çatısı dönen yel değirmenleri XVIII. yüzyıl başlarında kullanılmıştır.

Yazılı belgeli ilk yel değirmeni, M.S. 644 yılına ait İran-Afganistan sınırındaki Seistan'dadır. Yel değirmenleri, Çin'de M.S. 750-850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır. İlk olarak Doğuda kullanılan düşey eksenli yel değirmenleri, Batılılar tarafından geliştirilmiş ve yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmeni örneği, 1180 yılında Normandiya Krallığı zamanına aittir.

Yatay eksenli ve mekanik enerji amaçlı yel değirmenlerinin gelişimi; ayaklı yel değirmeni (Almanya), kule tipi yel değirmeni (Akdeniz Ülkeleri, Alaçatı), döner çatılı Hollanda tipi yel değirmeni (Hollanda) ve 1850 yılında Daniel Halladay tarafından rüzgar yönü yönlendiricisi takılan çok kanatlı Amerikan tipi yel değirmeni olarak sıralanabilir. 1882 yılında New York'ta elektrik santrali kurulmuş ve daha sonra da elektrik enerjisi kullanımı yaygınlaşmıştır[3].

İlk rüzgar elektriği de, Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etmiş ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamıştır[2].

1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisinin bu bir kenara itilmişliği, enerji sıkıntısı nedeniyle 2. Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Rüzgar enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine; 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgar türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgar türbini örnek verilebilir[3].

2.2 Rüzgar Oluşumu

Rüzgar enerjisinin ana enerji kaynağı güneş enerjisidir. Gerekli enerjisini güneşten alan bir ısı makinesi olarak nitelenebilecek olan atmosferde; ısıl potansiyel farklara sahip olan hava kütleleri, daha soğuk ve yüksek basınç alanı olan bir noktadan, daha sıcak ve alçak basınç alanına hareket ederler. Isı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü bu doğa olayındaki hava kütlesi hareketine, rüzgar adı verilir[3].

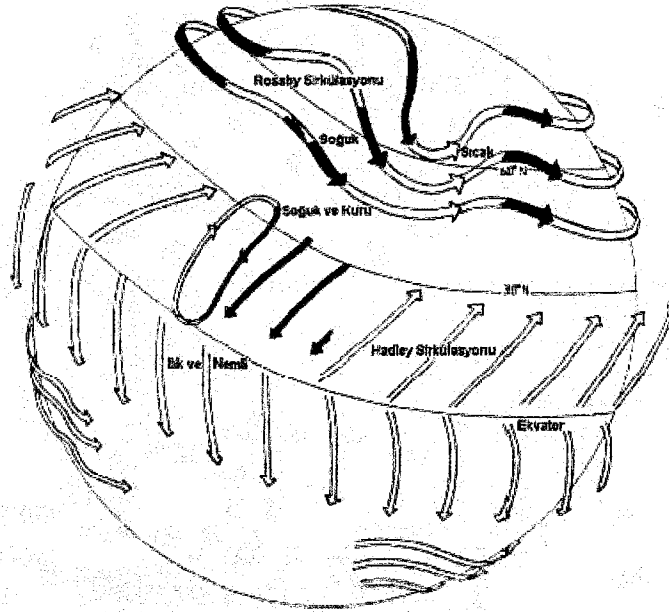
Güneş, dünyanın bir tarafındaki havayı, toprağı ve suyu ısıtırken dünyanın diğer tarafı termal radyasyon ile soğur. Günlük soğuma ve ısınma değişimleri gün boyunca tüm dünyada devam eder. Ekvator bölgesi kutuplara doğru gidildikçe azalmak kaydı ile

daha fazla güneş enerjisi depo eder. Ekvatorda ısınan hava yükselerek kutuplara doğru gider, soğuyan hava ise ağırlaşarak geri döner. Hava 30° kuzey enleminde yığılma eğilimindedir. Bunun sonucu olarak bu bölgede basınç yüksek ve iklim ılımandır. Bazı hava kütleleri bu yüksek basınç bölgesinin dışında güney doğuya doğru eser ve dünyanın dönmesinin oluşturduğu etki ile batıya sapar, bu rüzgarlar alize rüzgarları olarak adlandırılır ve genellikle denizciler tarafından kullanılır[4].

Bir başka ifadeyle, rüzgarlar, yer yüzündeki farklı güneş ısı dağılımının neden olduğu basınç ve sıcaklık farklarının dengelenmesi ile oluşan hava akımlarıdır. Dünyanın bir kısmında hava, kara ve deniz ısınırken, diğer yüzeyinde soğuma görülür. Dünyanın günlük dönüş hareketiyle bu ısınma ve soğuma periyodik şekilde devam eder. Dünyanın güneşe bağlı ekseninin eğiminin mevsimlere göre değişimi, ısı enerjisinin günlük dağılımının mevsimden mevsime farklılık göstermesine neden olmaktadır[5].

Atmosferin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel olmak üzere iki çeşittir ve temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisiyle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur.

Ekvator civarında yerle temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere yükselir ve 30° kuzey enlemlerine yaklaşıncaya kadar tekrar yeryüzüne doğru alçalır. Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Buna 'Hadley Sirkülasyonu' adı verilir[4].



Şekil 2.1. Atmosferin Genel Sirkülasyonu

Dünyanın dönüşüyle meydana gelen 'Coriolis Kuvveti' nedeniyle havanın hareketi, hareket yönünün sağına doğru saptırıldığından 0°-30° enlemleri arasında yer yüzeyinde oluşan rüzgarlar temel olarak Kuzey-Doğu karakterli olurlar. Benzer yapıda ancak bu kez dalgalı şekilde bir karakteristik arz eden ve 'Rossby Sirkülasyonu' diye adlandırdığımız bir sirkülasyonda 30° -90° enlemleri arasında gerçekleşir. Bu sirkülasyon sonucunda, 30°-60° enlemleri arasında Güney- Batılı ve 60°-90° enlemleri arasında ise Kuzey-Doğulu rüzgarlar oluşur. Tablo- 1'de kuzey ve güney yarım küre için atmosferik güney sirkülasyonuna göre rüzgar yönleri sunulmaktadır[4].

Tablo 2.1. Enlemlere Göre Genel Hakim Rüzgar Yönleri[4]

Enlem	90-60°K	60-30°K	30-0°K	0-30°K	30-60°G	60-90°G
Rüzgar Yönü	KD	GB	KD	GD	KB	GD

Rüzgarlar, sürekliliklerine göre bütün bir yıl boyunca esen sürekli rüzgarlar ve belli zamanlarda esen kasırga, tayfun, fırtına ve girdaplar gibi süreksiz rüzgarlar olarak iki grupta Tablo 2.1.'de incelenmektedir.

Tablo 2.2. Genel olarak Rüzgarların Sınıflandırılması[3,4]

Sürekli Rüzgarlar					Süreksiz Rüzgarlar		
Alize R.	Kontre Alize R.	Muson R.	Meltem R.		Föhn R.	Siklon R.	Anti-Siklon R.
			Kara ve Deniz R.	Dağ ve Vadi R.			

Alize rüzgarları; her mevsim kuzey ve güney yarım kürede 30° enlem üzerinde bulunan yüksek basınç kuşağından ekvator üzerindeki alçak basınç kuşağına doğru eserler. Kontralize rüzgarları ise atmosferin yüksekliklerinde alize rüzgarlarının ters yönünde eserler ve oluşmalarının nedeni ekvator da ısınan hava kütlelerinin yükselmesi ve ekvator dan uzaklaşacak şekilde hareket etmeleridir. Meltem rüzgarları; karaların denizlerden ve dağların vadilerden daha çabuk ısınıp soğuması sonucu, üzerlerinde bulunan hava kütlelerini etkilemesi nedeni ile oluşurlar. Gündüzleri; denizlerden, çabuk ısınan karalara doğru deniz meltemleri, geceleri de; çabuk soğuyan karalardan, denizlere doğru kara meltemleri eser. Deniz ve kara meltemleri, sahilden 40 km içlere kadar etkili olurlar. Aynı şekilde, gündüzleri; vadilerden çabuk ısınan dağlara doğru vadi meltemleri, geceleri de; çabuk soğuyan dağlardan vadilere doğru dağ meltemleri eserler. Hareket halindeki bir hava külesinin; yüksekçe bir dağa çarparak her 100m'de 0,5°C soğuyarak yükselmesi, daha sonra da dağın diğer yamacına her 100m'de 1°C ısınarak inmesi hareketine föhn rüzgarları adı verilir. Anadolu; kışın, Sibiryaya yüksek basıncının etkisinde bir yüksek basınç alanı, Karadeniz ve Akdeniz ise bir alçak basınç alanıdır. Bu nedenle; kışın, rüzgarların karalardan denizlere doğru esmesi beklenir. Yazın ise Anadolu, güneyden gelen tropikal hava kütlelerinin etkisindedir ve Kuzeybatı Avrupa üzerinde yerleşen yüksek basınç alanından Basra alçak basınç alanına yönelmiş rüzgarların etkisinde kalır. Yazın; eteziyen adı verilen kuzey batıdan esen rüzgarlar, Marmara ve Ege'yi etkilerler. Türkiye'deki rüzgarların, bu genel beklentiye tam olarak uymadığı görülmektedir. Bunun nedeni; meltem ve föhn rüzgarlarını da oluşturan yerel etmenler ve Sibiryaya yüksek basınç alanının yıllara göre zayıf veya güçlü olmasıdır[3,4]



2.3 Rüzgar Enerjisinin Üstünlükleri

Rüzgar; geçmişte eskilere dayanan, temiz, ve herkesçe bilinen bir enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer almaktadır. Rüzgar enerjisinin sahip olduğu üstünlükler şunlardır:

- ❖ Rüzgar enerjisi eldesi ücretsiz olup, tükenmeyen bir enerjidir. Süreç içinde bitme ve fiyatında artma söz konusu olmamaktadır.
- ❖ Yenilenebilir enerji kaynağı olmakla birlikte aynı zamanda temiz enerjidir.
- ❖ Atmosferi kirletmeyen bir enerji türü olup, çevreyi kirletmemektedir.
- ❖ Yerli kaynaklar kullanıldığından dışa bağımlılığı yoktur.
- ❖ Başka enerjilere dönüştürme teknikleri kolaydır.
- ❖ Rüzgar hava hareketi ile oluştuğu için enerjinin nakledilmesinde sorun yoktur.

2.4 Rüzgar Enerjisinin Uygulama Alanları

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, dönüştürme tekniklerinin yapısının basit, işletiminin ve bakımının kolay olması nedeniyle diğer enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Rüzgar enerjisinden dönüştürücüler vasıtasıyla aşağıdaki şekillerde yararlanmak mümkündür[6].

2.4.1 Rüzgar Enerjisinin Mekanik Uygulamaları

Rüzgar enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek genellikle sulama sistemlerinde tercih edilir. Su pompalama amaçlı kullanılan bu sistemler kırsal kesimlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mekanik uygulamalar sadece su pompalama ile kısıtlı olmayıp, aynı zamanda çiftlik ve benzeri yerlerde hayvanların su ihtiyacının karşılanmasında ve evlerde ihtiyaç duyulan suyu elde etmekte de kullanılmaktadır[6].

2.4.2 Rüzgar Enerjisinin Elektriksel Uygulamaları

Rüzgar enerjisinden, günümüzde modern rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi bölgesel kullanılabilirliği gibi aynı zamanda elektrik şebekesine bağlantısı gerçekleştirilerek birlikte kullanılabilirlikte kullanılabilmektedir. Elektrik şebekesinin olmadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsal bölgelerde, adalarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi kullanılabilirlikte kullanılabilmektedir[6].

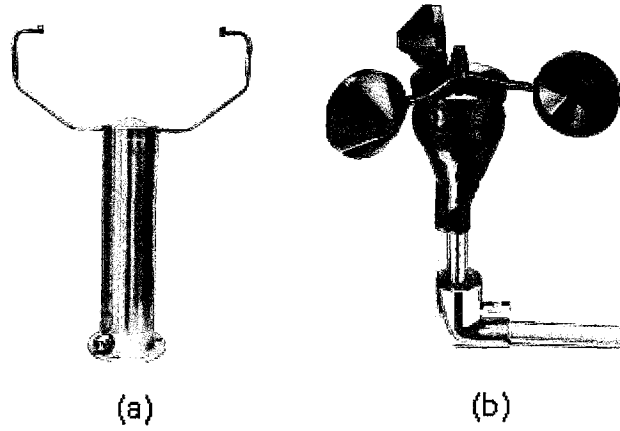
2.4.3 Rüzgar Enerjisinin Isıl Enerji Uygulamaları

Rüzgar enerjisinden elde edilen mekanik enerjinin ısı enerjisiye dönüştüğü sistemlerdir. Tanklarda su ısıtma ile enerji depolayan bu sistemler, yerel ısıtma, kurutma, sıcak su hazırlama amaçlarına uygun olarak kullanılabilirlikte kullanılabilmektedir[6].

2.5 Rüzgar Hızının Ölçülmesi ve Enerjisi Potansiyeli

2.5.1 Rüzgar Hızının Ölçülmesi

Rüzgar ölçümleri anemometre adı verilen cihazlar yardımıyla yapılmaktadır. Rüzgar enerjisinin üretiminde rüzgar datalarının doğru elde edilebilmesi çok önemlidir. Çünkü rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenecek bölgenin rüzgar karakteristiklerinin bu bölge için seçimi gerçekleştirilecek rüzgar türbininin veya türbin elemanlarının seçimini ve yerleşimini önemli ölçüde etkilemektedir.

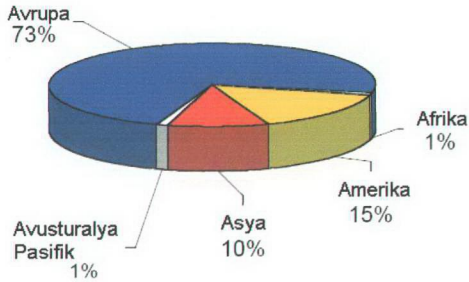


Şekil 2.2. Anemometre Çeşitleri a) Ultrasonik Anemometre b) Kup Anemometre

Rüzgar ölçümlerinde kullanılan anemometreler temelde analog ve sayısal anemometreler olmak üzere iki tipte üretilirler. Bu anemometreler arasında kup anemometre, pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla beraber en yaygın olarak kullanılanı ise kup anemometredir. Kup anemometreler İrlandalı T.R. Robinson tarafından icat edilmiş olup, genellikle rüzgar hızı ölçme amaçlı kullanılmaktadırlar[7].

2.5.2 Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar gücü yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın kullanılanı olup, dünyada hızla büyüme gösteren bir enerji kaynağıdır. 2001 yılı sonunda dünyada kurulu rüzgar gücü kapasitesi 24596MW'tır. Dünyadaki Rüzgar Enerjisi kullanımını 2004 yılı sonu kıtasal dağılımı Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Kıtaların dağılımına bakıldığında %73'lük payla Avrupa rüzgar gücü kullanımında birinci sırada yer almaktadır. Avrupa kıtasını rüzgar gücü kullanımında sırasıyla Amerika, Asya kıtaları takip etmektedir.



Şekil 2.3. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Kıtasal Dağılımı[8]

Rüzgar enerjisinin dünyadaki kurulu üretim kapasitesinin yaklaşık 6500MW'lık kısmı 2001 yılı içinde faaliyete geçmiştir[9]. Dünyanın 1999 yılından 2003 yılına kadar olan süreçte rüzgar gücü değişimi Tablo 2.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Dünyada Kurulu Rüzgar Gücü[10]

Ülke [MW]	2002 Yılı [MW]	2001 yılı [MW]	2000 yılı [MW]	1999 yılı [MW]
Almanya	12001	8754	6095	4443
İspanya	4830	3337	2502	1476
ABD	4685	4275	2581	2551
Danimarka	2880	2383	2306	1700
Hindistan	1702	1507	1267	1035
İtalya	785	682	418	283
Hollanda	686	484	443	411
İngiltere	552	474	409	347
Çin*	468	400	352	262
Japonya	415	275	142	68
İsveç	328	293	241	215
Yunanistan	276	272	247	158
Kanada	221	207	128	124

Portekiz	194	131	83	67
Fransa	148	95	68	25
Avusturya	139	94	77	42
İrlanda	137	125	119	73
Avustralya	104	72	30	9
Norveç*	97	17	13	13
Kostarika*	71	71	51	51
Mısır*	69	69	69	36
Belçika	44	32	13	9
Ukrayna*	44	41	5	5
Finlandiya	41	39	38	38
Yeni Zelanda*	35	35	35	35
Polonya*	27	22	5	5
Arjantin*	27	27	16	15
Brezilya*	25	24	22	19
Litvanya*	24	2	0	0
Türkiye*	19	19	19	9
Lüksemburg	16	15	15	10
İran*	11	11	11	0
Tunus	11	11	0	0
TOPLAM	31,166	24,349	17,885	13,559

*Tahmini Değerler

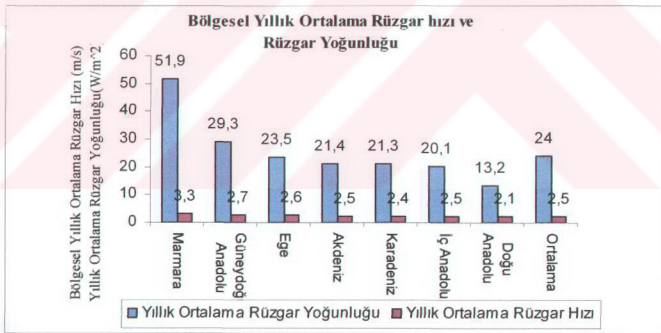
Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek yada tahmin etmek oldukça zordur. Yapılan bilimsel çalışmalar dünyanın teknik potansiyelinin sadece %10'unun kullanılmasıyla, dünya elektrik enerji gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini göstermiştir.

Avrupa'nın kurulu rüzgar gücü kapasitesinde son altı yılda ortalama %40 artış gözlenmiştir. Dünyanın en büyük rüzgar gücü kapasitesine %72'lik payla Avrupa sahiptir. Türkiye Avrupa'nın kurulu rüzgar gücünün sadece %0.11'ine sahiptir.

2.5.3 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli oldukça iyi olmasına rağmen, ticari amaçlı kullanımı yenidir. İlk rüzgar çiftliği 1,5MW olarak Şubat 1998 de faaliyete geçirilmiştir. Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü kapasitesinin 2010 yılına kadar 600MW'ta, 2020 yılına kadar ise 1000W'ta çıkarılması planlanmaktadır. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli yıllık teorik olarak 160TWh olarak hesaplanmıştır.

Türkiye yedi ayrı bölgeden oluşmaktadır. Her bir bölgenin iklimi, bitki örtüsü ve yer şekilleri birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Bu bölgelerin rüzgar potansiyellerinin belirlenmesi için Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü belirli illere ya da merkezlere rüzgar ölçümü yapan istasyonlar kurmuştur. Rüzgar ölçüm istasyonlarından alınan datalar Weibull veya Reighleith rüzgar karakteristiği belirleme yöntemleri ile yıllık aylık ya da günlük olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.4.'de bölgesel ortalama rüzgar hızları ve rüzgar yoğunlukları verilmiştir.



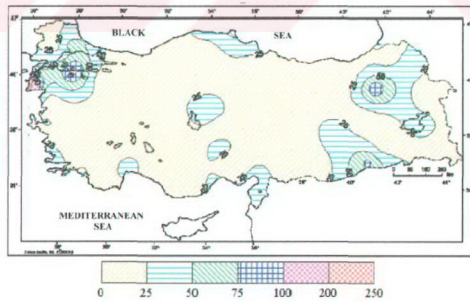
Şekil 2.4. Bölgesel Ortalama Rüzgar hızları ve Rüzgar Yoğunlukları

Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi yıllık ortalama rüzgar hızı 3,3 m/s ve yoğunluğu 51,9 W/m² olarak Marmara bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu bölgenin ardından rüzgar hızı ve potansiyeli bakımından sırasıyla Güneydoğu Anadolu, Ege, Akdeniz, Karadeniz, İç Anadolu, Doğu Anadolu bölgeleri gelmektedir. Türkiye'nin 20,1MW'lık kurulu rüzgar

gücünün 8,7MW'lık kısmı Ege de 11,4MW'lık kısmı ise Marmara bölgesinde yer almaktadır.

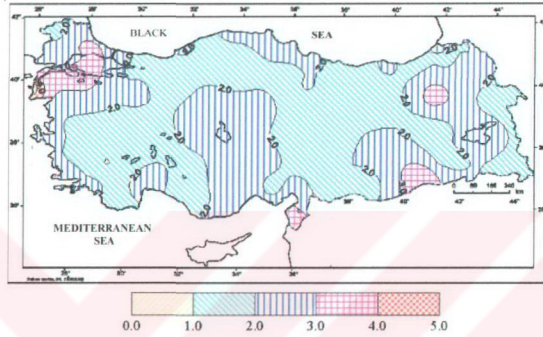
Marmara bölgesinde mevcut kurulu güç, Bozcaada ve İstanbul projelerinden sağlanmaktadır. Bozcaada projesi, Çanakkale-Bozcaada'da gerçekleşmekte olup, kurulu gücü 10.2MW'dır ve bu kurulu güç kapasitesiyle en fazla güç üretebilen proje konumunda yer almaktadır. Ayrıca; projede, her biri 600kW kapasitede, rotor çapı 44m olan Enercon-40 generatörden 17 adet türbin ile üretim gerçekleştirmektedir. İstanbul projesi, İstanbul-Hadımköy'de gerçekleşmekte olup, kurulu gücü 1.2MW'tır. Ayrıca, projede, her biri 600kW kapasitede, rotor çapı 44m olan Enercon-40 generatörden 2 adet türbin üretim gerçekleştirmektedir[11,12]

Ege bölgesindeki mevcut kurulu güç, Çeşme –Germiyan ve Çeşme Alaçatı projelerinden sağlanmaktadır. Çeşme-Germiyan projesi, İzmir Çeşmede gerçekleşmekte olup, kurulu gücü 1,5MW'dır. Ayrıca, projede, her biri 500kW kapasitede, rotor çapı 40,3m olan Enercon-40 generatörden 3 adet türbin ile üretim gerçekleştirmektedir. Çeşme-Alaçatı projesi, İzmir – Çeşme- Alaçatı'da gerçekleşmekte olup, kurulu gücü 7,2MW'tır. Ayrıca, projede, her biri 600kW kapasitede, rotor çapı 44m olan Vestas-V44 generatörden 12 adet türbin üretim gerçekleştirmektedir[11,12].



Şekil 2.5. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Dağılımı

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyel dağılımı haritasına bakıldığında en iyi rüzgar potansiyeline sahip bölgenin Marmara bölgesi olduğu ve potansiyel dağılım aralığı olarak $75-100 \text{ W/m}^2$ şeklinde dağılım gösterdiği görülmektedir. Ülke geneline bakıldığında ise bu değer $0-25 \text{ W/m}^2$ olarak değişim göstermektedir.



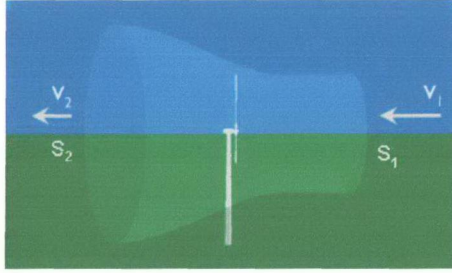
Şekil 2.6. Türkiye Rüzgar Hızı Dağılımı(10m yükseklikte)

Rüzgar hızı dağılımı haritasına bakıldığında ise Marmara bölgesi aynı şekilde en hızlı rüzgarların estiği bölge olarak göze çarpmaktadır. Bu hız $3.0 - 4.0 \text{ m/s}$ arasında bir değerdir. Ülke geneli değerlendirildiğinde ise bu hız değeri $2.0-3.0 \text{ m/s}$ arasında bir değere sahiptir.

Rüzgar hızının en düşük olduğu bölgeler İç Anadolu ve Akdeniz bölgesinin doğusunda kalan bölgelerdir. Bu bölgelerde rüzgar hızı $1.0 - 2.0 \text{ m/s}$ arasında değişim göstermektedir.

2.6 Betz Kanunu

Rüzgar türbinleri ile ilgili ilk genel teori 1927 yılında Betz tarafından tanımlanmıştır. Betz kanunu rüzgar rotorunu ideal kabul eder. Rüzgar pervanesi öncesi ve sonrası rüzgarın doğrultusunun değişmediği kabul edilir.



Şekil 2.7Betz Kanunu [13]

Burada;

V_1 : Türbine girmeden önceki rüzgar hızını,

V_2 : Türbin rotorundan çıktıktan sonraki rüzgar hızını

V : Türbin kanatlarının süpürdüğü S alanından geçen rüzgar hızını ifade etmektedir.

Benzer şekilde;

S_1 : Pervane önündeki alanı,

S_2 : Pervane çıkışındaki süpürülen alanı,

S : Türbin kanatlarının süpürdüğü alanı ifade etmektedir.

Türbinin ürettiği mekanik enerji sadece havanın kinetik enerjisinin dönüşümü sonucunda oluşur. Bundan dolayı V_2 , V_1 hızından küçük ve S_2 , S_1 alanından daha büyük olur. İdeal bir akış için, havanın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilirse, süreklilik denkleminde,

$$m = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot V = \rho \cdot S_2 \cdot V_2 \quad (2.1)$$

yazılabilir. Rüzgar türbini rotorundaki kuvvet, momentumundaki değişimden elde edilmektedir.

$$F = m \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.2)$$

Türbin rotorundaki güç, kinetik enerji değişiminden,

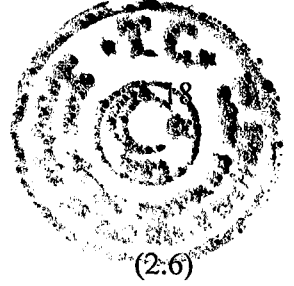
$$P = m \cdot \left(\frac{1}{2} V_1^2 - \frac{1}{2} V_2^2 \right) = \rho \cdot S \cdot V \cdot \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

yazılabilir. Ayrıca rotorda V hızındaki rüzgarın F kuvveti etkisi altında oluşturduğu güç,

$$P = F \cdot V \quad (2.4)$$

eşitliği ile ifade edilir. (2.2) numaralı denklem yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa,

$$P = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.5)$$



elde edilir. Denklem (2.3) ve (2.5) eşitlenirse,

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.6)$$

elde edilir. Buradan,

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.7)$$

denkleminde V ifadesi yerine yazılırsa,

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (2.8)$$

elde edilir. Güçteki değişim miktarı incelendiğinde V_1 ve V_2 hızlarının bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Bu değişim,

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho \cdot S (V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2) \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \quad (2.10)$$

Denkleminin iki çözümü vardır. Bunlar;

$$V_2 = -V_1 \quad (2.11)$$

Fakat bu çözümün fiziksel bir anlamı yoktur.

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (2.12)$$

Bu çözümün anlamı ise maksimum güçtür. Burada belirli ve tek değer olan $V_2 = \frac{V_1}{3}$,

denklem (2.8) de yerine yazıldığında,

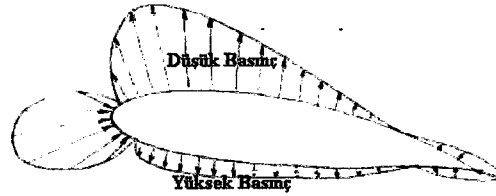
$$P_{\max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 = 0,37 \cdot S \cdot V_1^3 \quad (2.13)$$

Maksimum güç ifadesi yazılmış olur. Burada ρ : havanın özgül yoğunluğu $1,25 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır[14].



2.7 Aerodinamik Kuvvetler

Kanat profilinin şekline ve duruş açısına göre profil çevresinde basınç dağılımı oluşur. Bu dağılım profilin üst tarafında düşük basınç, alt tarafında ise yüksek basınç olarak karşımıza çıkar. Basınç alanını her şeyden önce duruş açısı α ve profilin şekli belirler[15].



Şekil 2.8. Kanat Profilindeki Basınç Alanları[Acar, 2005]

Bu basınç farkları kanat üzerinde kuvvet oluşmasına sebep olur. Rüzgar akışına veya kanadın hareket yönüne dik olarak kanada etkiyen bu kuvvete kaldırma kuvveti denir. Kinetik enerji denkleminde,

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_r \cdot S \cdot V^2 \quad (2.14)$$

yazılır. Burada,

C_r : Toplam aerodinamik katsayı

S : Kanat giriş uzunluğu(l) x Kanat boyu olarak tanımlanmıştır.

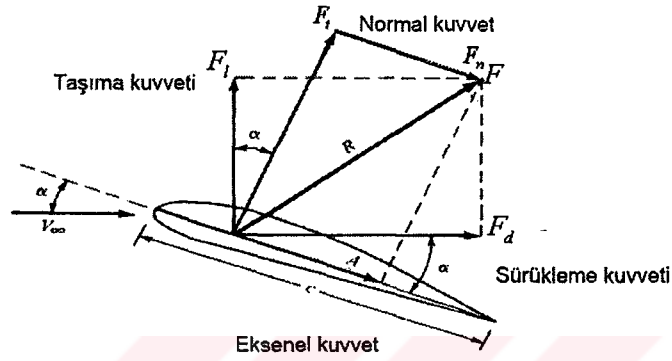
Kanat profili üzerine etki eden iki adet kuvvet vardır. Bunlardan ilki hız vektörüne (\vec{V}) paralel, Sürüklenme kuvveti (\vec{F}_d) diğeri ise (\vec{V}) hız vektörüne dik, kaldırma kuvveti (\vec{F}_l)'dir. Burada \vec{F}_d , \vec{F}_l ifadeleri yazılırsa,

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot S \cdot V^2 \quad (2.15)$$

$$\vec{F}_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_l \cdot S \cdot V^2 \quad (2.16)$$

Burada C_d ve C_l sırasıyla kaldırma ve sürüklenme katsayılarıdır. Bileşke kuvvet,

$$F^2 = F_d^2 + F_l^2 \quad (2.17)$$



Şekil 2.9. Kanat Profiline Etkiyen Kuvvetler

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 (C_d \cdot \cos \alpha - C_l \cdot \sin \alpha) \quad (2.18)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 (C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha) \quad (2.19)$$

yukarıdaki (2.18) ve (2.19) numaralı denklemlerde ifadeler C_n ve C_t değerleri,

$$C_t = (C_d \cdot \cos \alpha - C_l \cdot \sin \alpha) \quad (2.20)$$

$$C_n = (C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha) \quad (2.21)$$

olarak yazılır. Burada C_t teğetsel kuvvet katsayısı C_n ise normal kuvvet katsayısıdır.

Toplam aerodinamik katsayı C_r ile ifade edilecek olursa,

$$C_r^2 = C_d^2 + C_l^2 \quad (2.22)$$

olarak ifade edilir.

2.8 Rüzgar Türbinleri




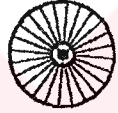


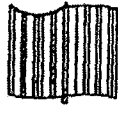

Tahrik edilen kısmı dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi milinde mekanik enerjiye dönüştüren makinalara türbin denir. Türbinler, en genel halde; buhar, gaz, su ve rüzgar türbinleri olarak dört grupta incelenirler. Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlıdır.

Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile de, jeneratör mili denir. Bunların tümü, kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel aracılığıyla sağlanır. Tüm bu elemanlara, en genel halde rüzgar enerjisi tesisi adı verilir. Bu gerçeğe rağmen, yerli ve yabancı literatürde rüzgar enerjisi tesisi yerine, rüzgar türbini denilmesi alışkanlık olmuştur[3].

Rüzgar türbinleri; direnç veya kaldırma kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay ya da düşey olmasına göre veya aynı rüzgar hızındaki devir sayılarına (devirlilik sayılarına) göre sınıflandırılabilirler[16].

Direnç kuvvetinden yararlanan türbinlerde, rüzgara karşı bir yüzey tutulur ve rüzgar basıncından dönme hareketi oluşur. Örnek olarak; kepçe tipi anemometreler, Fars çarkı ve Savonius türbini gösterilebilir. Direnç kuvvetinden yararlanan türbinler, pistonlu pompalar ile su pompalanması gibi yüksek moment gereken yerlerde kullanılırlar. Elektrik üretimi gibi yüksek güç gereken alanlarda kullanılmazlar[3,16].

Tablo 2.4. Rüzgar Türbin Tipleri ve Kullanım Yerleri[16]

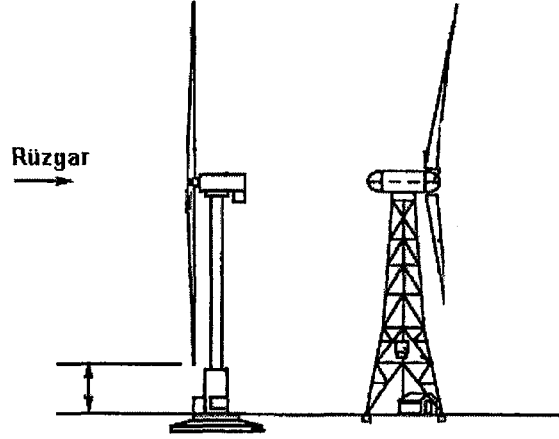
Rotor Tipi		λ	C_p	Rpm	Tork	Kullanım Yeri
Pervane Tipi		6-10	0,42	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
Darrieus Tipi		5-6	0,40	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
Cyclogiro Tipi		3-4	0,45	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su pompalama
Çok Kanatlı		3-4	0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su pompalama
Yelken Kanat Tipi		4	0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su pompalama
Fan Tipi		1	0,30	Orta	Orta	Su pompalama
Savonius Tipi		1	0,15	Alçak	Yüksek	Su pompalama
Hollanda Tipi		2-3	0,17	Alçak	Yüksek	Su pompalama

Kaldırma kuvvetinden yararlanan türbinlerde rüzgar; yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etkiyen hava hızının doğrultusuna dik olarak oluşan kaldırma kuvveti, dönme hareketine dönüşür. Yüzey öncesinde yüksek basınç, yüzey arkasında ise alçak basınç oluşmaktadır. Örnek olarak, düşey eksenli Darrius türbini ve kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri gösterilebilir. Rüzgar türbinleri, nominal güçlerine göre de; 5 kW'a kadar küçük güçlü, 5 kW'ın üstünde ise büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılırlar. Bunların dışında da, yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri gibi hava hareketindeki kinetik enerjiden yararlanan türbinler vardır[3].

Enerji dönüştürücüsü yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri (güneş enerjisi konveksiyon bacası) güneş ışınları enerjisi tarafından ısıtılan havanın yükselmesi ve yükselen havadaki kinetik enerjinin de rüzgar türbinini tahrik etmesi prensibine göre çalışır. Isınarak yükselmesi istenen hava üstten cam veya plastik malzemeden yapılmış geçirgen bir çatı ile örtülüdür ve bu çatının ortasında yer alan betonarme bacadan yükselir. Yükselen hava akımı rüzgar türbinlerinde elde edilen güç; kollektör verimi, kollektör enine kesit alanı, havanın sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, dış ortam sıcaklığı, güneş sabiti ve bacanın yüksekliğine bağlıdır. Buradaki baca yüksekliği arttıkça, elde edilen güç de artmaktadır. Bu baca alttan ankastre mesnet üstten serbest bir çubuk olarak idealleştirilmektedir. Baca boyu, yapım ve montajdaki teknik kısıtlar gibi burkulma problemi ile de sınırlandırılmaktadır[3].

2.8.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel ve kanatlar yönüne diktir. Ticari amaçlı kullanımlarda tercih edilmektedir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri önden(up-wind) ve arkadan (down-wind) almasına göre iki çeşittir. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinleri kullanım alanı yoktur. Şekil 2.10.'da Elektrik üretim amaçlı yaygın kullanılan yatay eksenli rüzgar türbini tipleri görülmektedir.



Şekil 2.10. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tipleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rüzgar hızı ve türbinin kullanım amacı sistemin boyutunu belirler ve bunlara uygun kanat sayısına sahip türbin seçilir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanat sayısı rotorun çevresel hızı ile rotora etkiyen rüzgar hızı arasındaki λ uç hız oranına bağlı olarak değişmektedir. Uç hız oranı ile kanat sayısı arasındaki ilişki Tablo 2.5.'te verilmiştir[1].

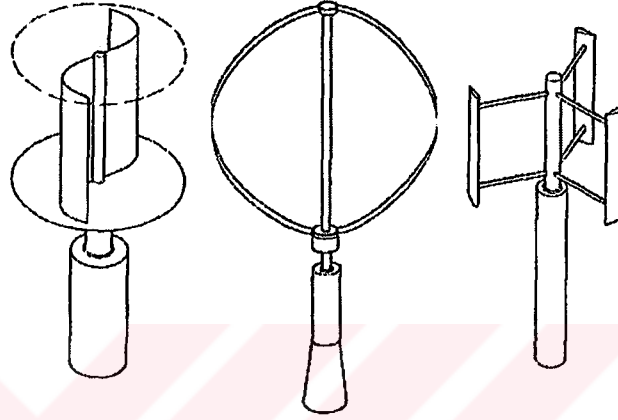
Tablo 2.5. Uç Hız Oranına Göre Kanat Sayısı

Uç Hız Oranı(λ)	Kanat Sayısı
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	2-4
5-8	2-3
8-15	1-2

2.8.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinleri küçük güçlü rüzgar türbinleridir. Herhangi bir yönden esen rüzgarı alabilme özelliklerinden dolayı avantajlı konumdadırlar.

Başlangıç momentleri yüksek, fakat verimleri düşüktür. Daha çok düşük güç gereksinimi olan yerlerde tercih edilir. Başlıca kullanım alanları sulama, tarım ve pompalama sistemleridir. Özellikle Avrupa'da bazı ülkelerde orman gözetleme kulelerinde elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanımı oldukça yaygındır. Şekil-9'da en yaygın kullanım alanına sahip dikey eksenli rüzgar türbin tipleri görülmektedir.

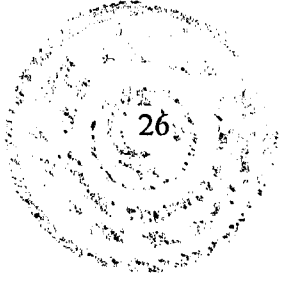


Şekil 2.11. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Tipleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerine örnek olarak Savonius, Darrieus gibi rüzgar türbinleri gösterilebilir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerine nazaran yapıları oldukça basittir. İşletmesi ve bakımı oldukça kolay olup, arıza anında müdahale etmede şebeke bağlantılı yatay eksenli rüzgar türbinlerinde olduğu gibi belirli bir süre şebekeden çıkması için beklemek gibi bir durum söz konusu değildir. Anında müdahale edilebilir.

2.9. Rüzgar Türbini Elemanları

Rüzgar türbinleri dişli kutusu, alternatör, kanat temel ve destek sistem gibi elemanların bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapıdır.



2.9.1. Temel

Temel boyutları, türbin büyüklüğüne ve yerin özelliklerine bağlıdır. Temelin boyutlandırılmasında, sadece statik hesap yapılır, dinamik hesap yapılmaz. Statik hesapta da, durmakta olan rüzgar türbininin yüzyılda bir karşılaşabileceği rüzgar hızına ve nominal güçteki itmeye dayanması istenir[3]

2.9.2. Kule

Kule malzemesi, genellikle çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, enine halka kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yükseklerdeki daha büyük rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir. Kule boyutlandırmasındaki bir diğer parametre de, kule eğilme katılığıdır.

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde, özellikle Darrieus ve Savonius gibi türbinlerde, kule zeminde olabilmektedir[18]. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde genellikle yerden oldukça yükseklerde bulunur.

Özellikle, kulenin birinci eğilme doğal frekans, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11-20'si, kule imalatına aittir[3].

2.9.3. Kanat

Rüzgar türbinlerinin kanat malzemesi alüminyum, fiber katkılı polyster,titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilebilmektedir[18].

Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafıyla güçlendirilmiş polyster veya epoksi gibi cam elyafıyla güçlendirilmiş plastikten

üretirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımları çok iyidir. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon sorun yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır. Cam elyafının kopma mukavemeti, 420 N/mm^2 , St 52 çeliğinin kopma mukavemeti 520 N/mm^2 'ye yakındır.

Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise, 550 N/mm^2 ile çelikten daha iyidir. Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün 15 kN/mm^2 ile çeliğe nazaran (210 kN/mm^2) çok düşük olmasıdır. Bu nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyafı yerine, elastisite modülü 44 kN/mm^2 olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır. Fakat, bu malzeme de pahalıdır. Rüzgar türbini kanatlarında profil olarak, genellikle NACA, LS ve LM profilleri kullanılmaktadır[3]

2.9.4. Dişli Kutusu

Rüzgar türbininin en önemli bileşenlerinden biridir. Pervane milindeki enerji, jeneratöre bir dişli sistemi ile (örneğin, çevrim oranı 1:15) aktarılır[3,19].

Dişli sistemi rotorun 30-40dev/dak olan dönüş hızını jeneratörün gereksinim duyduğu devir sayısına çıkarır. 450kW üzeri türbinlerde genel olarak kullanılan sistemde de bir kademe planet dişli ve iki kademe helisel dişliden veya alın dişlisinden oluşan bir dişli sistemi bulunmaktadır. Bu tür sistemlerin verimi %95-98 arasında değişim göstermekte olup, kademe başı %1 kayıp olduğu kabul edilir[19].

2.9.5. Jeneratörler

Rüzgar türbini jeneratörlerinin görevi rotor tarafından üretilen mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu jeneratörler sabit stator ve dönen kısım olan



rotordan meydana gelirler. Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, orta-ve büyük ölçekli uygulamalarda kullanımına göre iki tiptedir. Bunlar:

- ❖ Doğru Akım Jeneratörleri
- ❖ Alternatif Akım Jeneratörleri(Asenkron ve Senkron jeneratörler)

Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilmektedir. Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha pahalı olmalarıdır. Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılmaktadır. Direkt şebeke bağlantılı sistemlerde; alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron ve senkron jeneratörlerin millerinin devir sayısı,

$$n = \frac{60.f}{p} \quad (2.23)$$

bağıntısı ile verilir.

Burada f Herz biriminde elektrik şebekesi frekansı, p çift kutup sayısı ve n dakikadaki devir sayısıdır. Dişlilerdeki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır. Şebeke bağlantılı alternatif akım jeneratörlerinde sadece şebeke frekansını sağlayan devir sayısında elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Bu da, rüzgar türbininden örneğin sadece 8 m/s için optimum yararlanmak demektir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin bazılarında, düşük ve yüksek rüzgar hızları için iki ayrı jeneratör kullanılmaktadır. Eğer rüzgar türbini, tüm rüzgar hızlarında optimum güç üretecek şekilde çalıştırılmak isteniyorsa, o zaman değişken devir sayılı alternatif akım jeneratörleri kullanmak gerekir. Bu şekilde elde edilen elektrik enerjisi, daha sonra, güç elektroniği düzenekleri yardımıyla isteğe uygun hale getirilerek, şebekeye verilir[3].

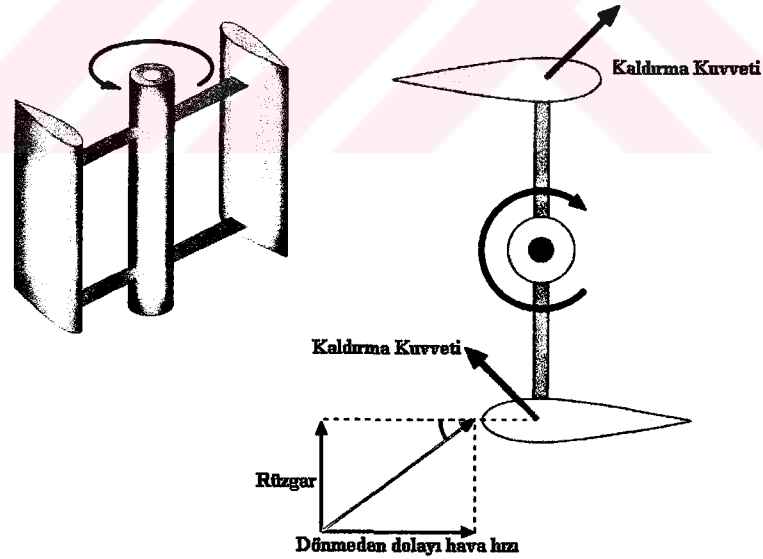


3. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ

3.1. Genel Özellikleri

Dikey eksenli rüzgar türbini olan Darrieus rüzgar türbini ilk olarak 1920 yılında Georges Jean Marie Darrieus tarafından icat edilmiş ve beraberinde patenti de alınmıştır. İki dış bükey profilin birbirine sıkıca bağlanması sonucu oluşturulmuştur. Georges Jean Marie Darrieus havacılık mühendisliği eğitimi almış bir Fransızdır.

Darrieus rüzgar türbini modern rüzgar türbinlerinden farklı olup, eski İran türbinleri ile benzerlik göstermektedir. Darrieus tipi rüzgar türbinleri teorik olarak kanat tipi rüzgar türbinleri ile aynı verime sahiptir. Kanat tipi rüzgar türbinleri geniş hız aralıklarında işletilmeye elverişlidir[20]. Herhangi bir yönden esen rüzgarı alarak dönme avantajına sahiptirler. Bu durumdan ötürü yav mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. Aynı zamanda yav mekanizmasının karmaşıklığından ve masrafından kurtulmuş olunur[21].

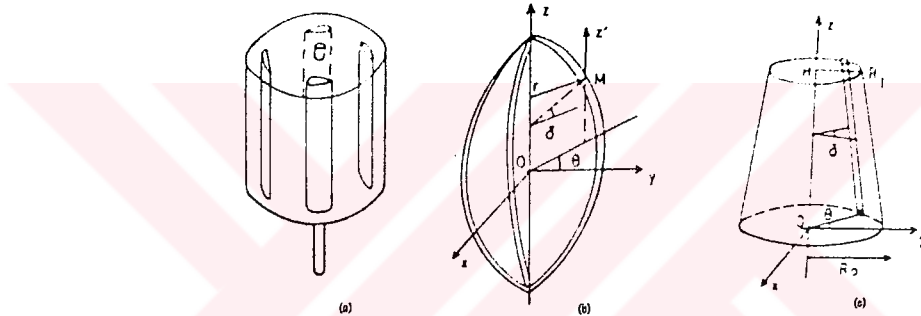


Şekil 3.1. Darrieus Rüzgar Türbini Yapısı

Zemine yerleştirilen mil sayesinde elektrik jeneratörü veya pompa gibi güç dönüşüm cihazlarının bağlantısına olanak sağlar. Ayrıca jeneratör ve diğer aksamaların

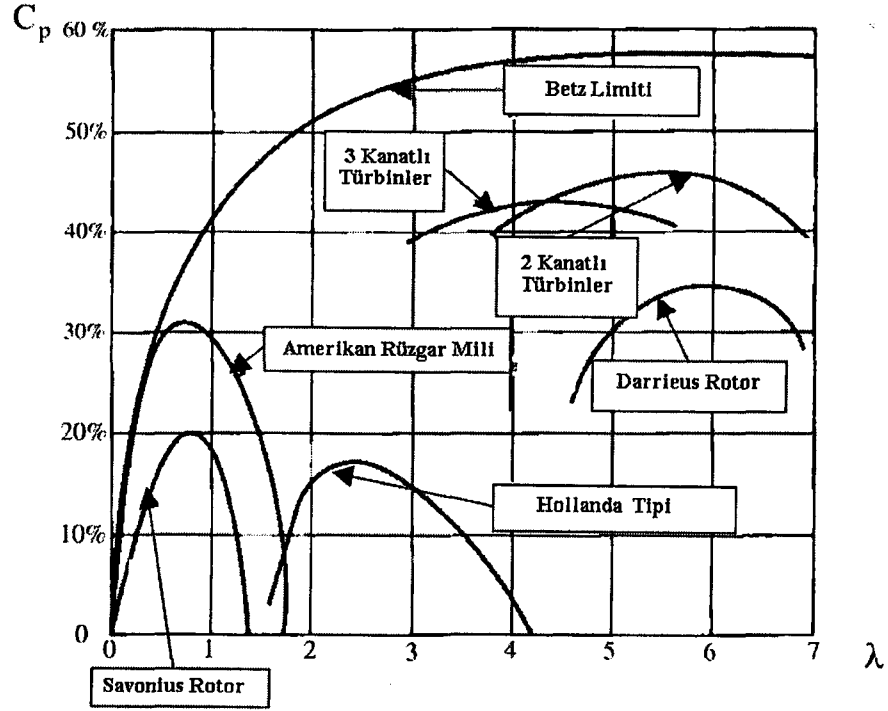
zeminde olması, bu aksamaların istenildiği kadar büyüklükte kullanımına olanak sağlar. Aynı zamanda aksamaların zeminde olması bakım ve kontrollerinin rahatlıkla yapılmasına imkan verir. Her dönüşteki rüzgar moment dalgalanmaları ve yüksek rüzgar hızlarında hız ayarlama işleminin zor olması başlıca dezavantajlarıdır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin üretimi ve geliştirilmesi 1970'lerden 1980'lere kadar sürmüştür. 1980 yılından sonra çok büyük gelişmeler kaydedilmemiştir[22].

Darrieus rüzgar türbin kanatları çeşitli şekillerden oluşmaktadır. Bunlar yüzeyi silindirik, konik, küresel yada parabolik olabilmektedir. Rotor şekli ne olursa olsun teorileri aynıdır. Şekil 3.2.'de Çeşitli Darrieus rotor şekilleri görülmektedir[14,21].



Şekil 3.2. Çeşitli Darrieus Rotor Şekilleri

Darrieus rüzgar türbininin en önemli dezavantajı kendi kendine çalışma özelliğinin olmamasıdır. Başlangıçta ilk hareketi verecek bir tahrik makinasına ihtiyaç duyarlar. Diğer bir dezavantajı da türbinin tepesinden zemine kadar uzanan destek halatlarının kule yüksekliği tarafından kısıtlanmasıdır. Darrieus rüzgar türbinlerinin hız verim karakteristiği, yüksek hızlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hız verim karakteristiklerine benzerlik gösterir[23].

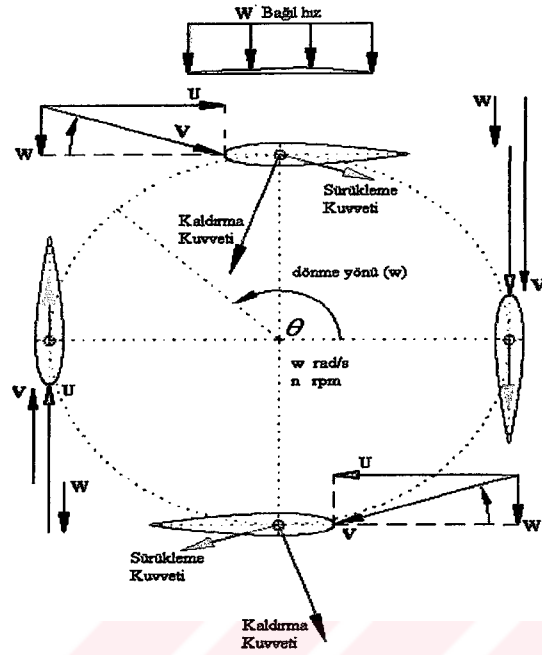


Şekil 3.3. Rüzgar Türbin Tipleri ve Güç Katsayıları

Günümüzde ticari amaçlı olarak da gelişim içinde olan darrieus ile ilgili olarak, dünyada maksimum çalışma güçleri 150kW ile 300kW arasında değişen 500 den fazla sistem kurulmuştur. Bu gelişmenin artarak devam edeceği beklenmektedir.

3.2. Darrieus Rüzgar Türbin Aerodinamiği

Rüzgar akış doğrultusunda kanada etki eden rüzgar hızı V , iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler \vec{W} bağıl hız ve çevresel hız $U = \vec{w}r$ 'dir.



Şekil 3.4. Kanada Etki Eden Rüzgar Hız Bileşenleri[24]

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (3.1)$$

yazılabilir. Vektörel hız \vec{W} , iki yatay vektörel hızın toplamıdır. Bunlar,

$$\vec{W}_r = \vec{V} \cdot \sin \theta \quad (3.2)$$

$$\vec{W}_t = U + V \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\vec{W}_z = 0 \quad (3.4)$$

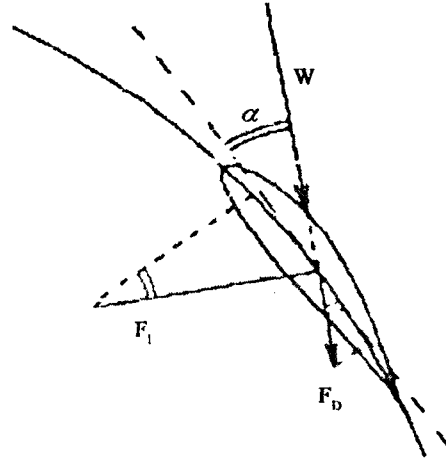
$$\vec{W}_t = U + V \cdot \cos \theta = r \cdot w + V \cdot \cos \theta \quad (3.5)$$

\vec{W} hızı kanat kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılır. Burada,

$$W^2 = W_t^2 + W_r^2 \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da değerler yerine yazılırsa,

$$W^2 = (r \cdot w + V \cdot \cos \theta)^2 + V^2 \cdot \sin^2 \theta \quad (3.7)$$



Şekil 3.5. W hızı ve Kuvvet Bileşenleri

α duruş açısı,

$$\tan \alpha = \frac{W_r}{W_t} = \frac{V \cdot \sin \theta}{r \cdot w + V \cdot \cos \theta} \quad (3.8)$$

Kanat elemanlarına etki eden kuvvet bileşenleri değerlendirilirse,

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot S \cdot W^2 \quad (3.9)$$

$$\vec{F}_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_l \cdot S \cdot W^2 \quad (3.10)$$

elde edilir.

Normal ve teğetsel kuvvetlerdeki değişim için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$dN = C_n \cdot q \cdot l \cdot dz \quad (3.11)$$

$$dT = C_t \cdot q \cdot l \cdot dz \quad (3.12)$$

yukarıdaki denklem (3.11) - (3.12)'de "q" dinamik basınçtır.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \quad (3.13)$$

bileşke kuvvet yazılırsa,

$$dF = dN \cdot \sin \theta - dT \cos \theta = q \cdot l (C_n \cdot \sin \theta - C_t \cdot \cos \theta) dz \quad (3.14)$$

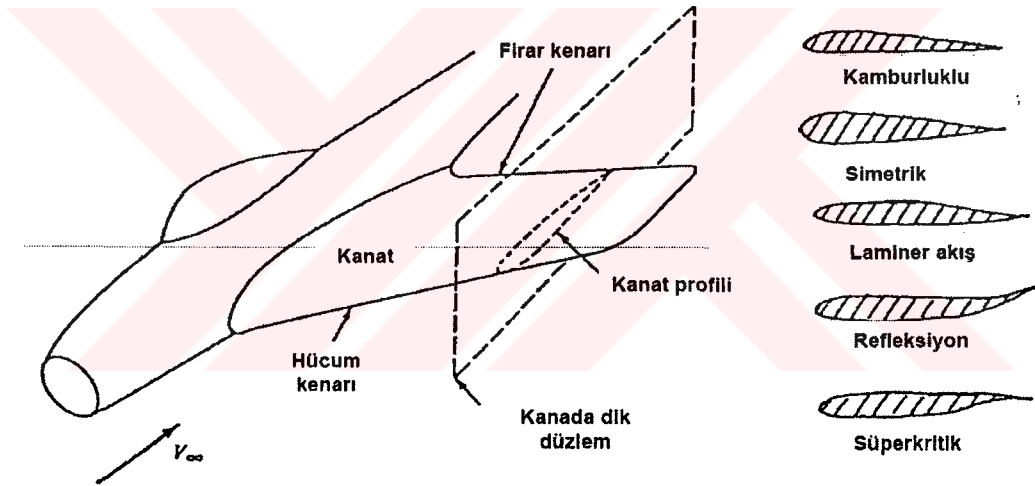
Sürekli dönen kanat için değişken kuvvetlerin hesaplanması gerekir. Bir kanat için her devirde ölçülen kuvvet,

$$F = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} q(C_n \sin \theta - C_t \cos \theta) d\theta dz \quad (3.15)$$

3.3. Kanat Tasarımı

3.3.1. Kanat Geometrisi

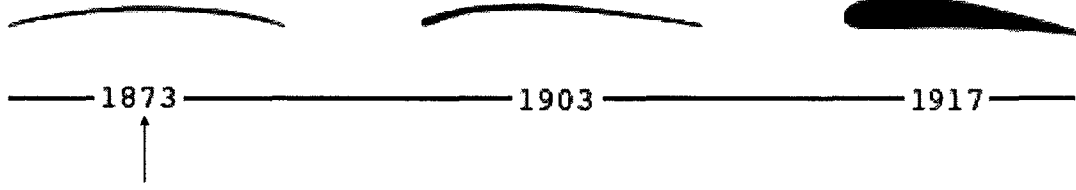
Hava ve benzeri gazların hareketlerini ve bu hareketlerle birlikte ortaya çıkan kütle ve enerji transferi problemlerini inceleyen bilim dalına aerodinamik denir [Acar, 2005]. Yapılan deneyler ve teorik çalışmalar, havadan ağır bir cismin hava içerisinde hareketlenebilmesi için ona çarpan hava akımının, en az cismin ağırlığına eşit bir kuvvette olması gerektiğini göstermiştir. Kanat profili kanadın, uçağa bağlı eksen takımında x-z düzlemine göre, kesitidir.



Şekil 3.6. Kanat Profil Tipleri

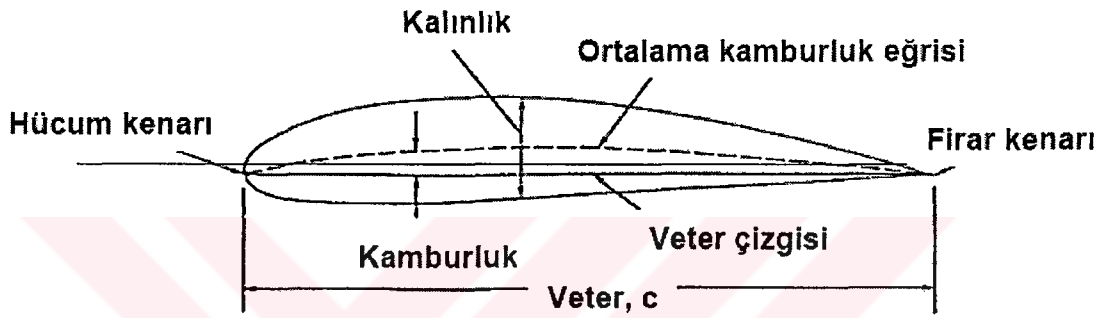
İlk tasarımlarda, keskin kenarlı kanat profillerinin daha düşük sürüklenme kuvvetine sahip olacağı düşünülmektedir. Fakat bu tip profiller stall'a daha çabuk girmekte ve oldukça büyük sürüklenme kuvvetine sahiptir.

Kanat aerodinamik gelişim sürecine baktığımızda 1873'lü yıllardan 1917'li yıllara gelindiğinde kanat profil yapısında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Şekil 3.7.'de kanat profillerinin tarihsel gelişim süreci görülmektedir.



Şekil 3.7. Kanat Profillerinin Tarihsel Gelişim Süreci

Kanat üzerinde yapılan teorileri anlamak için kanat yapısı hakkında temel bilgilerin bilinmesi gerekir. Şekil 3.8.'de kanat profil geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.8. Kanat Profil Geometrisi

Veter çizgisi: Hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren doğrudur.

Kamburluk Eğrisi: Kanat üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki Orta noktaları birleştiren eğridir.

Kamburluk: Kamburluk eğrisi ile veter doğrusu arasındaki maksimum mesafedir.

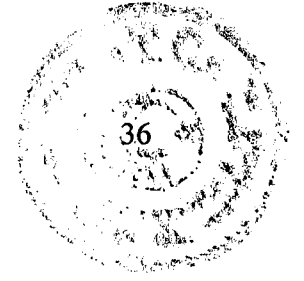
Bağıl Hız: V_{∞} hava hızının doğrultusudur.

Hücum Açısı: Bağıl hız ile veter doğrultusu arasındaki açıdır[15].

Firar Kenarı: Kamburluk eğrisinin profili terk eden akım tarafındaki uç noktası profilin firar kenarıdır.

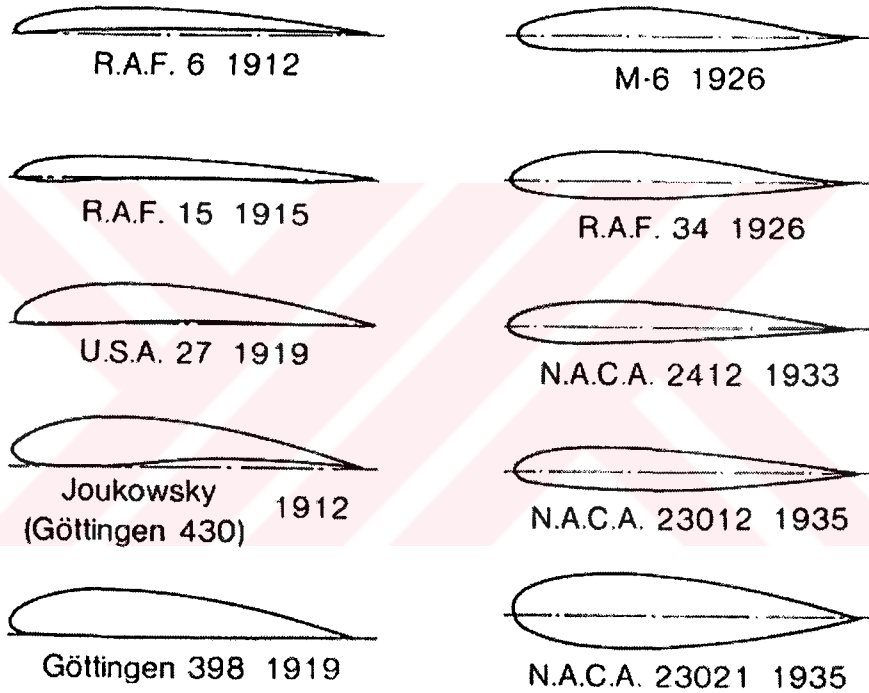
Maksimum Kamburluk: Profil veter hattına dik olarak ölçülen kamburluk hattı ile veter hattı arasındaki maksimum uzunluktur.

Profil Kalınlığı: Profilin alt ve üst yüzeyleri arasında veter hattına dik olarak ölçülen uzunluktur.



3.3.2. Profil Şekilleri ve Aileleri

Kanat profilleri kendilerinden istenilen aerodinamik özelliklere göre çok çeşitli şekillerde yapılabilirler. Çünkü profilin maksimum kamburluğu, kamburluk eğrisinin şekli, kalınlık dağılımı, taşıma ve moment karakteristiklerini etkileyen parametredir. Günümüzde çeşitli kuruluşlar tarafından geliştirilen değişik tipteki kanat profilleri yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.9. Değişik Türde Tasarlanmış Kanat Profilleri [25]

Easman Jacobs tarafından 1930'lu yılların başında NACA kesitleri olarak bilinen bir grup kanat üretilmiştir[26].

NACA ("National Advisory Committee for Aeronautics") kanat profilinde kullanılan bir takım standartlar mevcuttur. Bu standartlarda kullanılan rakamların sırası ve yeri önemlidir. Hepsinin kendine özgü bir anlamı vardır. Rakamların ilki profilin bir koordinat sisteminin merkezinde yer aldığını düşünürsek % olarak y eksenindeki



yüksekliğini, ikincisi % olarak x eksenini üzerindeki konumunu göstermektedir. Son iki rakam ise kanat profilinin % olarak kalınlığını tanımlamaktadır. En yaygın kullanılan kanat profili ailesi NACA'dır[28].

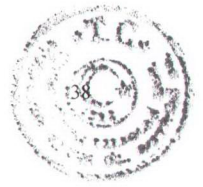
3.4. Darrieus Rüzgar Türbini Kule Tipleri

Darrieus rüzgar türbinlerinde kule genellikle zemine yerleştirilmektedir. Kule, içerisinde dişli kutusu, alternatör ve diğer mekanik aksamların yerleştirildiği yerdir. Optimum kule tasarımı yapılırken; bütün mekanik aksamların yerleştirileceği yerler saptanarak, herhangi bir beklenmedik arıza durumunda veya sistemde meydana gelen aksaklıklarda içerisine bir insanın rahatlıkla sığabileceği ve sisteme müdahale edebileceği düşünülerek tasarlanmalıdır. Ayrıca güçlü rüzgarlarda kulenin devrilmemesi ve zarar görmemesi için sağlam, mukavemeti yüksek malzemeler tercih edilmelidir. Kule malzemesi genellikle fiber katkılı polyster destekli çelik konstrüksiyonlu yapılar en çok tercih edilenlerdendir.

3.5. Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistemleri

Rüzgar türbinleri güçlü rüzgarlara maruz kaldığında devrilmesini önlemek amacıyla yada deprem gibi beklenmedik bir olağanüstü bir durumda rüzgar türbinini korumak için tasarlanmış sistemlerdir. Destek sistemleri çelik gerdirme halatları, çelik konstrüksiyonlu profil borular ve benzeri ekipmanlardan oluşmaktadır.

Darrieus gibi küçük güçlü rüzgar türbinlerinde en yaygın kullanılan destek sistem gerdirme halatları ile gerçekleştirilen sistemlerdir. Şekil 3.10.'da görülen darrieus rüzgar türbini 4,2 kW'lık güce sahip ve Eole C olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.10. Eole- C Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistemi

Destek sistem yapısı Şekil 3.10.'da da görüldüğü gibi çelik gerdirme halatları ile zemine sabitlenmiştir[29]. Bu destek sistemde türbinin tepe noktasından ya da varsa üst çerçevesinden ve türbinin ağırlık merkezine yakın noktalarından zemine çelik halatlarla sabitleyerek gerçekleştirilir. Zemine toprağın belli bir seviyesinin altı kazılarak içerisine çakılan demir çubukların üzerine toprak seviyesi kadar beton dökülerek sağlamlaştırılır. Daha sonra bu mekanizmaya gerdirme halatları bağlanarak türbin teraziye alınır. Ayrıca bir başka yöntem olarak çelik profil boruların belirli bir açı ile türbinin ağırlık merkezinden zemine kadar tek parça şeklinde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilen tipleri de mevcuttur. Destek sistem ne kadar sağlam yapılırsa türbinin ömrü o kadar uzun ve güçlü rüzgarlarda zarar görmesi de minimuma indirgenmiş olur.

3.6. Darrieus Rüzgar Türbini Yatak ve Rulman Sistemi

Türbin rotorunu yataklayabilmek ve rotorun rahat dönmesini sağlamak amacıyla kullanılan mekanizmalardır. Değişik amaçlar için çeşitli tipte ve büyüklükte rulmanlar mevcuttur. Rüzgar türbinlerinde genellikle bilyalı rulmanlar ve konik rulmanlar kullanılır.

Konik makaralı rulmanlar yükler bir hareket yüzeyinden diğerine yatak eksenine göre eğik olarak iletilirler. Bu sebepten, konik makaralı rulmanlar özellikle kombine yüklerin (radyal ve aksel) karşılanması için uygundur.



a) Bilyalı Rulman



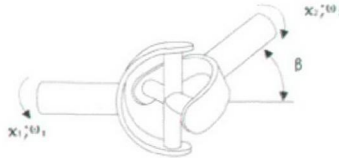
b) Konik Rulman

Şekil 3.11. Bilyalı ve Konik Rulmanlar

Bunlar parçalarına ayrılabilir, bu sebepten dış bilezik makaraları taşıyan iç bilezikten ayrı olarak monte edilebilir. Konik makaralı rulmanlar aksenal yükleri sadece bir yönde taşırlar. Radyal yüklerde ikinci bir yataklama işlemi için ikinci bir rulmana ihtiyaç duyulur[29].

Bilyalı rulmanlar tek sıralı yada çift sıralı olarak imal edilirler. Tek sıralı sabit bilyalı rulmanlar en çok kullanılanıdır. Bu rulmanlar yapı olarak basittirler. Parçaları birbirinden ayrılamaz; en yüksek devir sayıları için uygun olup işletme ve bakım yönlerinden de hassas değildir. Şekil 3.11.a.'da bilyalı rulmanın Şekil 3.11.b.'de konik rulman görülmektedir.

Kardan mili uzun mesafeli yerlerden hareket iletimi sağlanırken, aksenal kaymaları engellemek yani iki mili aynı doğrultuda tutmaya yarayan bir yardımcı elemandır. Bir eksenenden hareketi 30^0 'ye kadar rahatlıkla başka bir eksene iletebilen sistemlerdir[18].



Şekil 3.12. Kardan Şaftı

Tahrik eden milin, mafsal eksenini ile (β) açısı yaptığını kabul edersek, bu milin düzgün bir açısal hızla (ω_1) dönme hareketini, sahip olduğu açı nedeniyle düzgün

olmayan bir açısız hızla (w_2) iletir. Kardan Mili özelliği olarak ikinci milin açısız hızı ve dönme açısı negatif ve pozitif faz farklarına bağlı olarak sinüzoidal biçimde biçimde değişiklik gösterir. Uniform olmayan bu harekette dönme açılarının x_1 ve x_2 olduğunu kabul edersek açısız hızlar arasında aşığıdaki bağlantı ortaya çıkar[30].

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2 x_1} \quad (3.16)$$

Rüzgar türbinlerinde kanatların bağlı olduğu rotor mili dişli kutusuna kadar uzanmaktadır. Bu rotor milinin uzunluğu artıkça aynı ekseninde tutmakta zorlaşmaktadır. Bunu sağlamak için genellikle hareketi istenen ekseninde tutabilen yada hareketi istenen eksene düzgün bir şekilde aktarabilen sistemlere gereksinim duyulur. Bu gibi durumlarda kardan mili kullanımı tercih edilir.

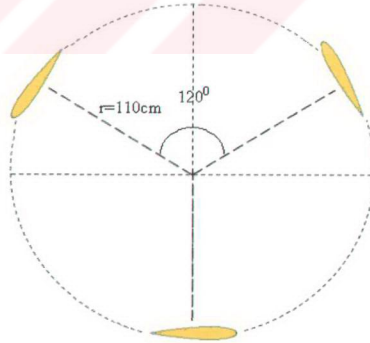
4. DİKEY EKSENLİ BİR DARRIEUS RÜZGAR TÜRİNİ DİZAYN EDİLMESİ

Darrieus rüzgar türbini tasarım aşamasında bazı parametrelerin bilinmesi gerekir. Türbinin dikileceği yere ait fizibilite çalışmaları yapılmış olması ve son beş yılı kapsayan rüzgar datalarının alınması gerekir. Bu datalar ışığında bölgenin ortalama rüzgar hızı tespit edilir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Rüzgar ölçüm istasyonlarından alınan bilgilere göre Gebze'nin ortalama rüzgar hızı 9 m/s olarak belirlenmiştir. Bu ortalama rüzgar hız değeri ve rüzgar yönü belirlenerek türbin için en uygun yer belirlenmiş olur. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mualliköy yerleşkesi'ne dikilmesi planlanan dikey eksenli bir darrieus rüzgar türbin tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlamayı düşündüğümüz darrieus rüzgar türbininin üzerinden geçen havanın gücü,

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (4.1)$$

bulunur.

Burada havanın yoğunluğu için deniz seviyesindeki yoğunluk ($1,25\text{kg/m}^3$) olarak alınır. Rüzgar türbini kanatlarının süpürdüğü alan S, herbir kanadın merkeze olan uzaklığı $r=110\text{cm}$ ve kanat uzunluğu 300cm olarak belirlendi.



Şekil 4.1. Kanat Pozisyonu ve Merkeze Uzaklıkları

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 3 = 20,724 m^2 \quad (4.2)$$

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 20,724 \cdot 9^3 = 9442,37 W = 9,44237 kW \quad (4.3)$$

Darrieus rüzgar türbinlerinin hız verim karakteristiği, yüksek hızlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hız verim karakteristiklerine benzerlik gösterdiği için güç katsayısı genellikle $C_p=0,40$ olarak alınır. Tasarımı gerçekleştirilen darrieus rüzgar türbininin gücü

$$P_e = C_p \cdot P_{\max} = 0,40 \cdot 9,44237 = 3,776 kW \quad (4.4)$$

olarak bulunur. Gerekli parametreler belirlendikten sonra tasarıma geçilecektir. Darrieus rüzgar türbini temelde dört aşamada tasarlanacaktır. Bu tasarım sırasıyla kanat tasarımı, kule tasarımı, yatak, rulman sistemi tasarımı ve destek koruyucu sistem tasarımı olarak gerçekleştirilecektir.

4.1. Darrieus Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı

Tasarımını gerçekleştirilen darrieus rüzgar türbininin kanat sayısı 3 adet ve her bir kanat uzunluğu 3m olarak belirlendi. Kanat tasarımına geçmeden önce kullanılacak olan kanat profilinin belirlenmesi gerekir. Dünyada kullanımı oldukça yaygın olan ve NACA ("National Advisory Committee for Aeronautics") tarafından standartlaştırılmış olan kanat profillerinden NACA 0021 kanat profili kullanıldı.

NACA 0021 kanat profilini tasarladıktan sonra üretiminde kullanılacak olan malzeme tespit edildi. Kanat malzemesi seçilirken, mekanik direnci oldukça yüksek ve düşük rüzgar hızlarında da rahatça dönebilmesi için hafif malzeme olması gerekir. Bu özellikleri sağladığı için polietilen malzemeden üretilmesine karar verildi. Bir kanadın 3m olduğu düşünüldüğünde 25 adet NACA 0021 kanat profili kullanılması gerektiği belirlendi. Kanat profil denklemi elde edilerek datalar ışığında Techplot programında çizdirilmiştir.

Geleneksel NACA kanat profil tasarımında kalınlık/veter oranı, kamburluk, ve kaldırma kuvveti katsayısı değerleri bilinmesi gerekir. NACA-4 dijit serisi kanat profillerinin genel formu NACA pmx olarak gösterilir. p ve m kamburluk özelliğinin yerini ve “ xx ” değeri yüzde olarak kalınlık/veter oranını temsil eder. Örneğin NACA 0021kanat profilinde “00” kısmı simetrik olduğunu kalınlık/veter oranı ise $\frac{t}{c} = 0,21$ olduğunu göstermektedir. NACA 4 dijit kanat profili ordinatları genel bir formu

$$\frac{y}{c} = a_0 \left(\frac{x}{c} \right)^{\frac{1}{2}} + a_1 \left(\frac{x}{c} \right) + a_2 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{c} \right)^3 + a_4 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \quad (4.5)$$

yazılır.

$$y = a_0 x^{\frac{1}{2}} + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \quad (4.6)$$

$$y_x = \frac{1}{2} a_0 x^{-\frac{1}{2}} + a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + 4a_4 x^3 \quad (4.7)$$

$$y_{xx} = -\frac{1}{4} a_0 x^{-\frac{3}{2}} + 2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 \quad (4.8)$$

Yukarıdaki eşitlikteki sabitler $\frac{t}{c} = 0,20$ oranına göre hesaplanmakta ve sınır değerler bu ifadeye göre belirlenmiştir[31].

Maksimum ordinat:

$$\frac{x}{c} = 0,30 \quad \frac{y}{c} = 0,10 \quad \frac{dy}{dx} = 0 \quad (4.9)$$

Firar kenarı ordinatı:

$$\frac{x}{c} = 1,0 \quad \frac{y}{c} = 0,002 \quad (4.10)$$

Firar kenarı açısının büyüklüğü:

$$\frac{x}{c} = 1,0 \quad \left| \frac{dy}{dx} \right| = 0 \quad (4.11)$$

Burun şekli:

$$\frac{x}{c} = 0,10 \qquad \frac{y}{c} = 0,078 \qquad (4.12)$$

Yukarıdaki bilgiler ışığında aşağıdaki katsayılar belirlenmiştir.

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,2969 \\ a_1 &= -0,1260 \\ a_2 &= -0,3516 \\ a_3 &= 0,2843 \\ a_4 &= -0,1015 \end{aligned} \qquad (4.13)$$

Genel denklemin katsayılar yerine koyulduğunda

$$\frac{y}{c} = 0,2969 \left(\frac{x}{c} \right)^2 - 0,1260 \left(\frac{x}{c} \right) - 0,3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \qquad (4.14)$$

NACA 4 dijital kanat profillerinde xx kısmı %20 nin dışındaki kalınlığa sahip kanatların ordinatlarını elde etmek için $\frac{t}{c} = 0,20$ 'lik model için elde edilen ordinatlar,

$$\left(\frac{t}{c} \right) / 0,20 \qquad (4.15)$$

ile çarpılır. NACA 0021 kanat profili denkemi için $\frac{t}{c} = 0,21$ değeri yazılıp, denklem (4.15)'te yerine yazılırsa,

$$\left(\frac{t}{c} \right) / 0,20 = \frac{0,21}{0,20} = 1,05 \qquad (4.16)$$

bulunur. NACA 0021 kanat profili denklemini bulabilmek için denklem (4.14)'deki her bir katsayı (4.16) denkleminde bulunan katsayı ile çarpılarak bulunur.

$$\frac{y}{c} = 1,05 \cdot \left[0,2969 \left(\frac{x}{c} \right)^2 - 0,1260 \left(\frac{x}{c} \right) - 0,3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0,2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right] \qquad (4.17)$$

Denklem (4.17)'de gerekli işlemler yapılarak NACA 0021 kanat profili denklemi

$$\frac{y}{c} = 0,3117 \left(\frac{x}{c} \right)^2 - 0,1323 \left(\frac{x}{c} \right) - 0,3691 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0,2985 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0,1065 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \qquad (4.18)$$

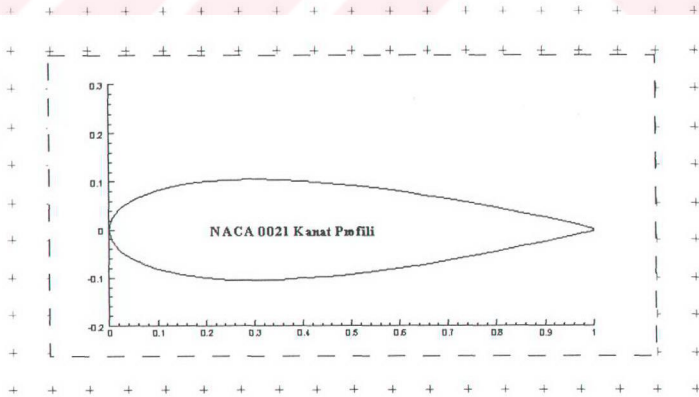
elde edilir[31].

Yukarıdaki denlem (4.18)'de datalar yerine konularak Tablo 4.1.'deki değerler elde edildi. NACA 0021 kanat profiline ait data bilgileri verilmiştir.

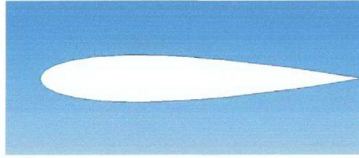
Tablo 4.1. NACA 0021 Kanat Profili Dataları

0	0	0.65	0.072325	0.5	-0.09264
0.005	0.02137	0.7	0.064133	0.45	-0.09765
0.0075	0.025981	0.75	0.055329	0.4	-0.10154
0.0125	0.033138	0.8	0.045939	0.35	-0.10408
0.025	0.045751	0.85	0.035966	0.3	-0.10501
0.05	0.062197	0.9	0.025395	0.25	-0.10395
0.075	0.073486	0.95	0.014191	0.2	-0.10039
0.1	0.081935	1	0.0023	0.15	-0.09352
0.15	0.093525	1	0.0023	0.1	-0.08194
0.2	0.10039	0.95	-0.01419	0.075	-0.07349
0.25	0.103954	0.9	-0.0254	0.05	-0.0622
0.3	0.105013	0.85	-0.03597	0.025	-0.04575
0.35	0.104084	0.8	-0.04594	0.0125	-0.03314
0.4	0.101538	0.75	-0.05533	0.0075	-0.02598
0.45	0.097651	0.7	-0.06413	0.005	-0.02137
0.5	0.092636	0.65	-0.07233	0	0
0.55	0.086663	0.6	-0.07986		
0.6	0.079859	0.55	-0.08666		

NACA 0021 kanat profiline ait datalar ışığında TechPlot programında çizdirilmiş hali Şekil 4.2.'de görülmektedir.

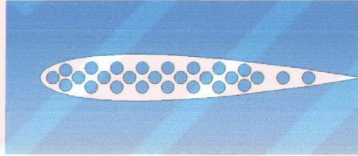


Üretimi gerçekleştirilecek olan NACA 0021 kanat uzunluğu 51cm, yüksekliği 7,5cm ve genişliği 12,5cm'dir.



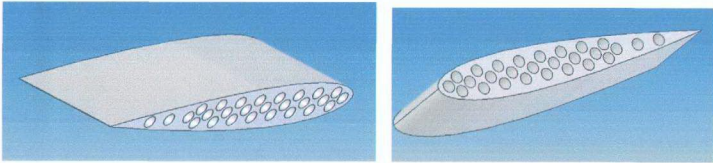
Şekil 4.3. Kanat Profili Üretimi

Bu şekilde üretimi gerçekleştirilecek NACA 0021 kanat profilini daha da hafif olmasını sağlamak amacıyla Şekil 4.4.'deki gibi profil üzerine delikler açılacak.



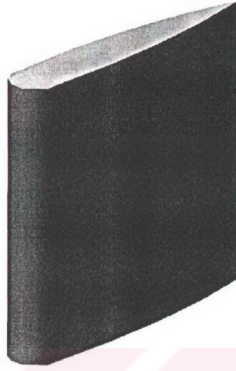
Şekil 4.4 Kanat Profili Son Hali

Kanat profilinin üretimi gerçekleştirildikten sonra değişik açılardan görünümü Şekil 4.4.'de görülmektedir.



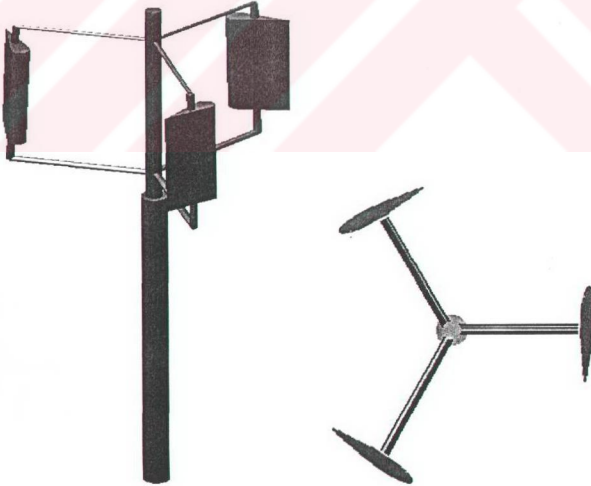
Şekil 4.5 Kanat Profilinin Değişik Açılardan Görünümü

Yanyana dizilmiş olan kanat profillerinden elde edilen kanadın son şekli Şekil 4.6.'te görülmektedir.

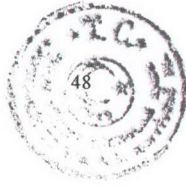


Şekil 4.6. Tasarlanan Darrieus Rüzgar Türbini Kanadı

Darrieus rüzgar türbini üç kanatlı olup birbirine göre 120° açılarla konumlandırıldı. Şekil 4.7.'de üç adet kanadın milin alt ve üst tarafından tutturulmuş halinin üstten görünüşü görülmektedir.

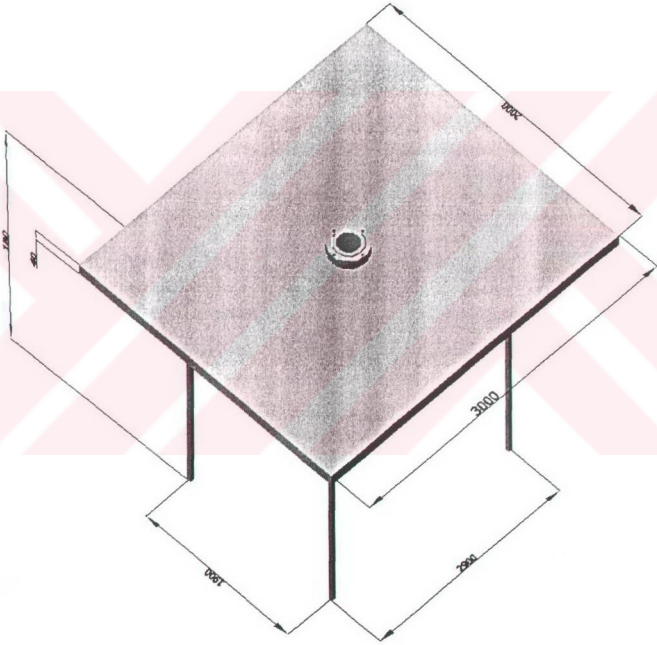


Şekil 4.7. Üç Adet Kanadın 120° Açılarla Mile Yerleştirilmiş Hali ve Üstten Görünüşü



4.2. Darrieus Rüzgar Türbini Kule Tasarımı

Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde kule genellikle zemine veya zemine yakın yerlere yerleştirilir. Kule tasarımı yapılırken zemine yerleştirilmesi düşünülerek tasarım gerçekleştirildi.



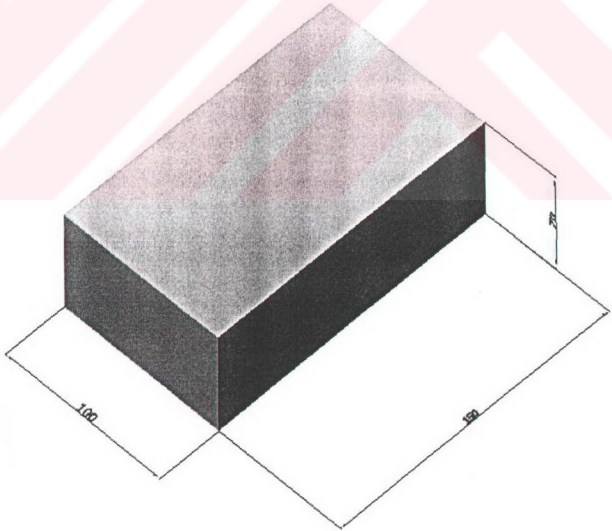
Şekil 4.8. Kulenin Tasarımı ve Ölçülendirilmesi

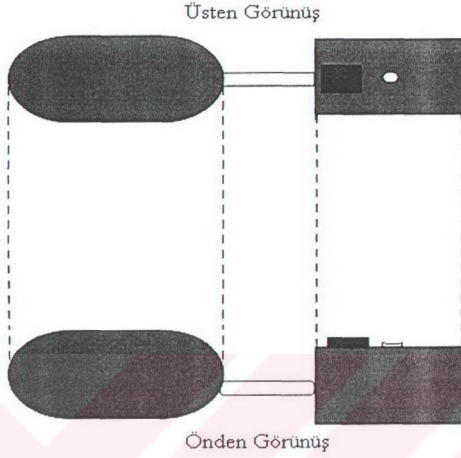
Kule, ortasından direk geçecek şekilde tasarlandı. Direğin kule üzerine yerleştirileceği yer belirlendi.



Bu belirlenen yere eşit aralıklarla dört adet vida yeri bırakıldı. Türbin direğinin çapı ile aynı uzunlukta olan bu direk yuvası içerisinden, kanatlardan gelen rotor mili geçirildi. Rotor milinin rahatlıkla dişli kutusuna erişebilmesi sağlandı. Kule dört bacağı olan ve dört tarafından beton zemine sabitlenmiş bir masayı andıran yapı şeklindedir.

Rüzgar türbin direğinin içerisinden geçen rotor mili kardan shaftı ile bağlantısı sağlanarak dişli kutusuna ulaşmaktadır. Kulenin uzunluğu 3m, genişliği 2m ve yüksekliği 180cm olarak dizayn edildi. Kule yüksekliğinin 100cm'lik kısmı toprağa gömülerek betonlanması düşünüldü. Diğer 80cm'lik kısmının toprak seviyesinden 20cm'lik bölümünden itibaren koruma kutusu olarak adlandırdığımız kutunun montajı gerçekleştirildi. Kulenin alt bölümüne alternatör, dişli kutusu ve gerektiğinde farklı elemanlar eklenebileceği göz önünde bulundurularak optimum şekilde bir koruma kutusu tasarlandı.





Şekil 4.9. Koruma Kutusu ve Önden ve Üsten Görünüşleri

Bu koruma kutusu 150cm uzunluğunda, 100cm genişliğinde ve 70cm yüksekliğinde dizayn edildi. Koruma kutusu alternatör dişli kutusu ve diğer ekipmanları dış çevresel etkilerden korumak amacıyla tasarlandı.

4.3. Darrieus Rüzgar Türbini Destek Sistem Tasarımı

Mekanik tasarımı gerçekleştirilen darrieus rüzgar türbinin açık hava testlerine tabi tutmadan önce destek sistemin tasarlanması gerekir. Bu destek sistem aşırı rüzgarlı havalarda ve istenmeyen olumsuz koşullarda rüzgar türbinini koruması için tasarlanır.



Şekil 4.10. Destek Sistem Kare Profil Boru



Şekil 4.11. Türbin Direğinin Profil Borularla Zemine Sabitlenmesi

Destek sistemi tasarımında gerdirme halatlarından daha güvenilir ve sağlıklı bir yöntem olan profil boru sistemi kullanıldı. Şekil 4.10.'da destek sistem için kare profil boru görülmektedir. Bu kare profil borulardan 4 adet türbini dengede tutacak şekilde türbin direğinin etrafından zemine sabitlenecek şekilde tasarlandı.

Genellikle dikey eksenli rüzgar türbinlerinde çelik halatlı sistemler tercih edilmekte ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat bu sistemin darrieus rüzgar türbinleri açısından birkaç dezavantajı vardır.

Rüzgar türbininin tepe noktasından zemine sabitleme noktasında darrieus rüzgar türbinlerinde problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Bu yüzden kare profilli türden destek sistemler yaygın kullanılmaktadır.

4.4. Darrieus Rüzgar Türbini Yatak ve Rulman Sistemi Tasarımı

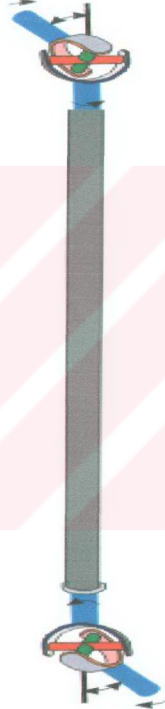
Kulenin hemen üzerinde tam ortasına türbin direği yerleştirildi. Darrieus rüzgar türbin direğinin içerisinden kanatlara bağlı olan rotor mili kulenin içerisinden koruma kutusu içerisine kadar uzanmaktadır. Türbin direği içerisindeki rotor milinin direk ile birleştiği üst noktada ve kuleye girdikten sonra da direğin aynı eksende kalmasını sağlamak amacıyla iki tane kardan mili kullanıldı. Bilyeli rulman kullanmanın amacı burkulma momentini karşılamasıdır



Şekil 4.12. Kardan Şaftı ve Rotor Bağlantısı

Güçlü rüzgarlarda türbin milinin üst tarafı ile kuleye giren tarafının aynı eksende ve doğrultuda tutmak için kardan mili kullanıldı.

Eğer aynı eksende tutulmadığı takdirde türbinin yataklarında zamanla bozulma olmaktadır. Bu olumsuz duruma karşı karşıya kalmamak için kardan mili kullanıldı.



Şekil 4.13. Rulmanlar ve Rotor Mili Üzerinde Yerleri

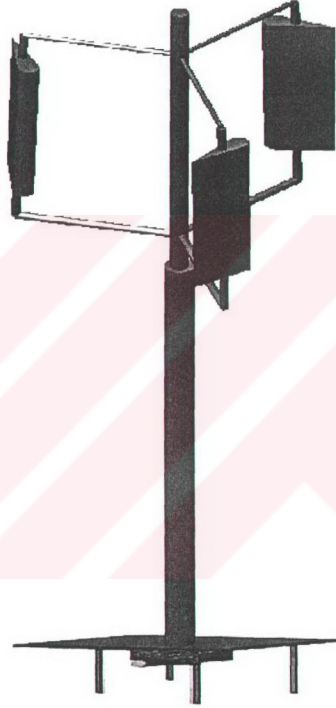
Türbin kanatlarının bağlı olduğu mil türbin direğinin içerisinden geçirilerek rahatça dönmesi sağlanmalıdır. Kulenin altında yer alan kardan mili doğrudan dişli kutusuna bağlanmaktadır.



Şekil 4.14. Türbin kulesi ve Türbin Direği Montajı

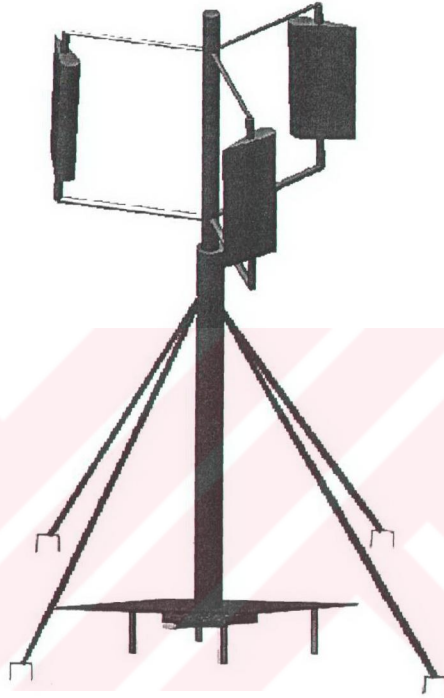
Türbin direği ve kulenin birbirine montajı Şekil 4.14'deki gibi olur. Türbin direği ile rotor mili bağlantısı gerçekleştirildikten sonra kulenin ortasında yer alan kısımla türbin direği bağlantısı gerçekleştirildi. Türbin direği bağlantısının hemen akabinde rotor milinin dişli kutusu ile olan bağlantısı sağlandı. Böylelikle dikey eksenli Darrieus

türbinin mekanik tasarımı tamamlandı. Darrieus türbinin mekanik tasarımı tamamlandıktan sonraki son hali Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15. Darrieus Rüzgar Türbininin Mekanik Tasarımı

Türbinin en son tamamlandıktan sonra kare profil borulardan oluşan destek sistem sayesinde dikilerek tasarımı tamamlanmış bulunuyor. Darrieus rüzgar türbininin mekanik tasarımı ve destek sistemi Şekil 4.16'te görülmektedir.



Şekil 4.16. Destek Sistemli Darrieus Rüzgar Türbini En Son Hali

Tasarımı tamamlanan darrieus rüzgar türbininin üretimi yapılarak Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde oluşturulmaya çalışılan Muallimköy rüzgar çiftliğine eklenecektir. Rüzgar türbininin üretimi sonrasında açık hava testlerine tabi tutmak üzere rüzgar çiftliğinde test edilecektir.



5. DİKEY EKSENLİ BİR DARRIEUS RÜZGAR TÜRİNİNİN KANAT ÜRETİMİ

Darrieus rüzgar türbininin kanat sayısı 3 adet ve her bir kanat uzunluğu 3m olarak tasarım aşamasında belirtilmiştir. NACA 0021 kanat profili gösteriminde “00” ifadesi simetrik bir kanat profili olduğunu, “21” ifadesi ise yüzde olarak kalınlık/ veter oranını belirtmektedir. Darrieus rüzgar türbininin üretiminde NACA 0021 kanat profili kullanılacağına ve malzeme olarak polietilen malzemeden üretimi gerçekleştirileceği belirtilmiştir. NACA 0021 kanat profilinin veter uzunluğu (c) 50cm, yüksekliği 7,5cm ve genişliği 12,5cm’dir. Üretilen kanat profilinde $\frac{t}{c} = 0,21$ ’dir. Buradan kanat kalınlığı,

$$t = c \cdot 0,21 = 50 \cdot 0,21 = 10,5 \text{ cm} \quad (5.1)$$

olarak hesaplanır.

Maksimum ordinatlar:

$$\frac{x}{c} = 0,30 \quad \frac{y}{c} = 0,10 \quad (5.2)$$

ve

$$x = c \cdot 0,30 = 50 \cdot 0,30 = 15 \text{ cm} \quad (5.3)$$

$$y = c \cdot 0,10 = 50 \cdot 0,10 = 5 \text{ cm} \quad (5.4)$$

Firar kenarı ordinatı:

$$\frac{x}{c} = 1,0 \quad \frac{y}{c} = 0,002 \quad (5.5)$$

$$x = c \cdot 1,0 = 50 \cdot 1,0 = 50 \text{ cm} \quad (5.6)$$

$$y = c \cdot 0,002 = 50 \cdot 0,002 = 0,1 \text{ cm} \quad (5.7)$$

Yukarıdaki hesaplamalar yapılarak gerçek üretimi gerçekleştirilecek olan kanadın temel değerleri elde edilmiştir. NACA 0021 kanat profili denkleminde datalar birim değerlerdir. Denklem (4.18) den elde edilen ve Tablo 4.1’de verilen datalar veter uzunluğu 50cm ile çarpılarak gerçek değerler elde edildi. Tablo 5.1’de üretimi yapılacak olan NACA 0021 kanat profilinin gerçek değerleri görülmektedir.



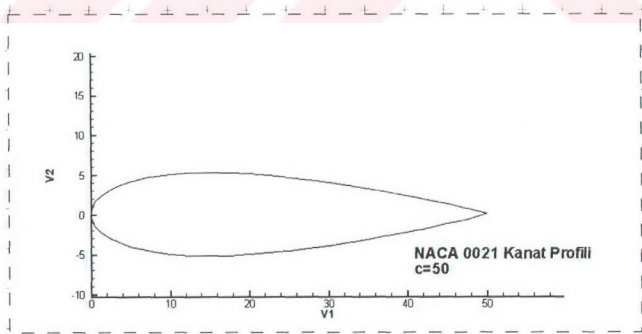
Tablo 5.1 Üretilecek Kanat Profili Değerleri

x	y
0	0
0.25	1.068491
0.375	1.299056
0.625	1.656914
1.25	2.287527
2.5	3.109857
3.75	3.674322
5	4.096752
7.5	4.676233
10	5.019504
12.5	5.197715
15	5.250649
17.5	5.204224
20	5.076899
22.5	4.882531
25	4.631822
27.5	4.333134
30	3.992969

x	y
32.5	3.616274
35	3.206639
37.5	2.76644
40	2.296928
42.5	1.798305
45	1.269772
47.5	0.709568
50	0.100
50	0.100
47.5	-0.70957
45	-1.26977
42.5	-1.7983
40	-2.29693
37.5	-2.76644
35	-3.20664
32.5	-3.61627
30	-3.99297
27.5	-4.33313

x	y
25	-4.63182
22.5	-4.88253
20	-5.0769
17.5	-5.20422
15	-5.25065
12.5	-5.19771
10	-5.0195
7.5	-4.67623
5	-4.09675
3.75	-3.67432
2.5	-3.10986
1.25	-2.28753
0.625	-1.65691
0.375	-1.29906
0.25	-1.06849
0	0

Yukarıda belirtilen datalar ışığında NACA 0021 kanat profilinin CAD (Computer Aided Design) bilgisayar destekli çizimleri gerçekleştirildi. Aşağıda NACA 0021 kanat profilinin veter değeri $c=50$ alınarak çizilmiş şekli görülmektedir.



Şekil 5.1 NACA 0021 Kanat Profili



Polietilen malzeme ile üretimini gerçekleştirmek için çizilen NACA 0021 kanat profili şekli CAM (Computer Aided Manufacturing) bilgisayar destekli üretimi yapılacak hale getirildi. Üretimi polietilen malzemeden Bilgisayar destekli üretildi. Üretilen NACA 0021 kanat profilinin şekli Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 NACA 0021 Kanat Üretim

Üretimi aşamasında kanat profili üzerinde görülen delikler mevcut değildi. Bu delikler kanat malzemesinin daha hafif olmasını sağlamak için açıldı. Her bir kanat için 25 adet üretilen NACA 0021 kanat profillerinden yanyana bir demir çubuk içerisinden geçirilerek dizildi. Şekil 5.3.'de birkaç NACA 0021 kanat profillerinin yanyana dizilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5.3. Yanyana Dizilmiş NACA 0021 Kanat Profilleri

NACA 0021 kanat profillerinden her bir kanat için 25 adet olmak üzere toplam 75 adet kanat profili üretildi. Bu üretilen kanat profilleri çubuk içerisinden geçirilerek tek bir kanat oluşturuldu. Şekil 5.4.'de çubuk içerisinden birkaç kanat profilinin geçirilerek tek bir kanat hali görülmektedir.



Şekil 5.4. Çubuk İçerisinden Geçirilerek Tek Bir Kanat Oluşturma

Bu şekilde yanyana 25 adet NACA 0021 kanat profili yanyana dizilerek kanat oluşturulmaktadır. Darrieus rüzgar türbini kanat üretimi bu şekilde tamamlanmış oldu.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Fosil kökenli yakıtların tükenmeye başlaması yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Alternatif enerji kaynaklarından rüzgar, Türkiye’de bulunma potansiyeli çok yüksek olmasından dolayı diğer alternatif enerji kaynaklarına nazaran daha fazla üzerinde durulmalıdır.

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmede rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri dikey ve yatay eksenli olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır. Tasarlanan darrieus rüzgar türbini dikey eksenli bir rüzgar türbinidir. Ülkemizde rüzgar türbini üretiminin yapılabileceği hem teknik açıdan, hemde ülkemiz mevcut potansiyelinin kullanımı açısından mümkündür.

Darrieus rüzgar türbini üç kanatlı tasarlanmış olup NACA 0021 kanat profili kullanılmıştır. Hafif olmasını sağlamak amacıyla üretim aşamasında kanat profili üzerinde delikler açılmıştır. Kanatlar aralarında 120° açı olacak şekilde konumlandırılmıştır.

Bu tasarladığımız darrieus rüzgar türbini küçük ölçekli güçlü bir rüzgar türbini olup, belirtilen ortalama rüzgar hızına sahip bir bölgede bir evin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek kapasitededir. Türbinlerin ürettikleri elektrik doğrudan türbinin dikilmesi planlanan yerdeki ortalama rüzgar hızıyla ve çevresel etkiler ile doğrudan orantılıdır.

Tasarladığımız darrieus rüzgar türbininde literatürde yer almayan kardan mili kullanımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu kardan mili üst pervane mili ile türbinin alt kısmında yer alan dişli kutusu milinin aynı ekseninde dönmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] Özerdem B., Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Uygulamalarının Gelişimi ve Geleceği. 9. Enerji Kongresi, İzmir, 2003
- [2] İnternet :Wind Energy Poul La Cour <http://www.windpower.org/en/pictures/lacour.htm>.
- [3] Özdamar A., Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbinlerine Genel Bakış. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, İzmir, 2000
- [4] Türksoy F. Rüzgar verisi ölçümü ve analizi, Rüzgar Enerjisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s 87-103., 2001
- [5] Özgener Ö. Türkiye’de ve Dünyada Rüzgar Enerjisi Kullanımı” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 4, Sayı: 3, s 159-173, 2002
- [6] Deda B. “Rüzgar Enerjisi ve Savonius Rüzgar Çarklarının Performanslarının Artırılması” Pamukkale Üniversitesi Y.L. Tezi, Denizli, 2000
- [7] Kristensen L., The Perennial Cup Anemometer. Wind Energy Volume 2, Issue 1, 59±75 1999
- [8] İnternet :Worldwide Wind Energy Capacity www.wwindea.org
- [9] Oğulata R.T. “Energy sector and wind energy potential in Turkey” Renewable and Sustainable Energy Reviews 7 469–484, 2003
- [10] İnternet :Global Wind Power Statistics. Mart 2005 www.wwindea.org.



[11]Kenisarın M., Karlı Vedat M., Çağlar M., Wind Power Engineering in The World and Perspectives of Its Development in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, In Press, Corrected Proof, 2004

[12]Aras H., Wind energy status and its assessment in Turkey. Renewable Energy 28 2213–2220, 2003

[13] İnternet :<http://www.windpower.org/en/tour/wres/betz.htm>

[14]Gourieres D. Le., Wind Power Plants: Theory and Design by Wind Power Plants: Theory and Design. Pergamon Press, 1982

[15] İnternet : Acar H., Aerodinamik Ders Notu <http://atlas.cc.itu.edu.tr/~acarh>

[16] Walker J.F., Jenkins N., Wind Energy Technology. John Wiley and Sons Publishing, England, 1997

[17] Çelik B., Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tasarım ve Prototip İmalatı. Gazi Üniversitesi Y.L.Tezi, Ankara, 2001

[18] Dursun B., Gökçöl C., Ertürk E., “GYTE Üç Katlı Savonius Rüzgar Türbini Mekanik Tasarımı” III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin, Ekim 2005

[19] Stiesdal H. “The Wind Turbine Components and Operation, Bonus Energy A/S, 1999

[20] İnternet :Darrieus Wind Turbine” http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

[21]Çam E., Yeni Tip Kanat Modeli ile Rüzgardan Elektrik Eldesi. Ege Üniversitesi Y.L. Tezi, İzmir, 1999

[22]Ackermann T., Söder L., Wind Energy Technology and Current Status: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 4 315±374, 2000



[23] Menet J.-L., A Double-Step Savonius Rotor for Local Production Of Electricity: A Design Study. Renewable Energy 29 1843–1862, 2004

[24] Koksal M., Fung A., Hughes L., Self –Starting Darrieus Wind Turbine. Dalhousie University Department Of Mechanical Engineering Design Project – Mech 4020, 2004

[25] İnternet :Kanat Profile Types <http://history.nasa.gov/SP-4305/p115a.jpg>

[26] İnternet :Jacobs Campaigns for Low-Turbulence VDT” <http://history.nasa.gov/SP-305/ch4.htm>

[27] İnternet :Types of Vertical Axis Machine <http://www.eurowind-uk.net/default.htm?page=2>

[28] Vardar A., Bazı Naca Profilli Rüzgar Türbin Rotorlarının Harekete Başlama Hızları Üzerine. 3e Electrotech, , 86-90, Haziran 2004

[29] İnternet :Principles of bearing selection and application, Selection of bearing type <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=en&maincatalogue=1&newlink=1>

[30] İnternet :Kardan Mili Teorisi <http://www.tiryakiler.com.tr/urunler/kardanmil/teori.html>

[31] Ladson Charles L., Brooks W. Cuyler, and Hill Acquilla S., “Computer Program To Obtain for NACA Airfoils, NASA Technical Memorandum 4741, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hapton, Virginia 23681-0001



ÖZGEÇMİŞ

17.09.1981 yılında İstanbul' da doğdu. İlk ve orta öğrenimini bu ilde sırasıyla Siyavuşpaşa İlkokulu, Org. Eşref Bitlis İlköğretim Okulu ve Bahçelievler Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünde eğitimine devam etti. 2002 yılında bu bölümü bitirdi. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen aynı programa devam etmektedir.