



RÜZGAR ENERJİSİ VE DARRIEUS RÜZGAR ÇARKLARININ İNCELENMESİ

Ali Barlas ATLIHAN

**Temmuz 2006
DENİZLİ**

**RÜZGAR ENERJİSİ VE DARRIEUS RÜZGAR ÇARKLARININ
İNCELENMESİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Ali Barlas ATLIHAN

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ATILGAN

**Temmuz 2006
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Ali Barlas ATLIHAN tarafından Prof. Dr. Mehmet ATILGAN yönetiminde hazırlanan “Rüzgar Enerjisi ve Darrieus Rüzgar Çarklarının İncelenmesi” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Mehmet ATILGAN
Jüri Başkanı (Danışman)



Prof. Dr. Raşim KARABACAK
Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr. Özcan MUTLU
Jüri Üyesi


Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../....tarih vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmanın baőlangıcından bitimine kadar her aőamada çalıőmayı yōnlendiren, ōzverili yardımlarını esirgemeyen tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet ATILGAN hocama sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmaların doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza : 

Öğrenci Adı Soyadı : Ali Barlas ATLIHAN

ÖZET

RÜZGAR ENERJİSİ VE DARRIEUS RÜZGAR ÇARKLARININ İNCELENMESİ

ATLIHAN, Ali Barlas
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Mehmet ATILGAN
Haziran 2006, 81 Sayfa

Dünyada nüfus artışına ve gelişen teknolojiye paralel olarak artan hayat standardı beraberinde enerji tüketimini arttırmıştır. Halen enerji talebimizin büyük bir kısmını fosil yakıtlardan karşılamaktayız. Bu enerji kaynakları belli bir zaman sürecinde azalacak ve sonuçta tükenecektir. Öte yandan fosil yakıt enerjisi kullanımıyla yüksek gaz emisyonu sonucu global ısınma ve aşırı çevresel kirlilik oluşmaktadır. 1973 petrol krizinden sonra özellikle gelişmiş ülkeler enerji talebindeki bu artışı yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamayı planlamışlar ve uygulamaya koymuşlardır. Rüzgar enerjisi; güneş, hidrolik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynağı olup bazı teknik önlemlerle çevreyi kirletmez ve bir atık sorunu meydana getirmez. Bu nedenle günümüzde rüzgar enerjisi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmış ve uygulama alanları artmıştır.

Bu çalışmada; öncelikle rüzgar enerjisi tanıtılmış ve çeşitleri anlatılmıştır. Çok yaygın olmayan fakat uygulamaları çok eski olan Darrieus tipi rüzgar türbinleri ayrıntılı olarak anlatılmış ve çeşitli tipteki rüzgar türbinlerinin geometrik yapıları karşılaştırılmıştır. Yapımı ve geometrisi daha kolay olduğu için Sandia tipi rüzgar türbini incelenmiştir. Daha sonra, yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri karşılaştırılmış ve örnek bir hesaplama uygulaması yapılmıştır.

Anahtar sözcükler : Rüzgar enerjisi, Darrieus rüzgar türbini, performans

Prof. Dr. Mehmet ATILGAN
Prof. Dr. Rasim KARABACAK
Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU

ABSTRACT**INVESTIGATION OF WIND ENERGY AND
DARRIEUS WIND ROTORS**

ATLIHAN, Ali Barlas
M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ATILGAN

June 2006, 81 Pages

The increasing life standard parallel to the world population growth and developing technology has brought together the energy consumption. At the moment, we are providing most of our energy demands from the fossil fuel resources. These energy sources will be diminished with the time and at the end will be exhausted. On the other hand; due to using the fossil fuel as a result of high gas emission the global warming and more excessive environmental pollution will occur. After the 1973 petrol crisis, especially the developed countries planned to overcome their increasing energy demand from the new and renewable energy resources and also put in action their plans in this ground. The wind energy; is being a renewable energy resources like solar, hydraulic and geothermal energy does not pollute the environment with taking some measurements and there is no inert problem. Therefore, nowadays a lot of studies have been focused on the wind energy and the areas of application also have been increased.

In this study, firstly wind energy was presented and their types were explained. It was described in detailed that the Darrieus type wind turbines which are not very widespread but their application is very old, and it was compared with their geometric construction of different types of wind turbines. Because of their manufacturing and geometry is more easy, Sandia type wind turbines were examined. Thereafter, horizontal and vertical axes wind turbines were compared and it was presented an example solution.

Keywords : Wind energy, Darrieus wind turbine, performance

Prof. Dr. Mehmet ATILGAN
Prof. Dr. Rasim KARABACAK
Yrd. Doç. Dr. Özcan MUTLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Yüksek Lisans Tezi Onay Formu	i
Teşekkür	ii
Bilimsel Etik Sayfası	iii
Özet	iv
Abstract	v
İçindekiler	vi
Şekiller Dizini	viii
Tablolar Dizini	ix
Simgeler ve Kısaltmalar Dizini	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	1
2. RÜZGAR ENERJİSİ	3
2.1. Rüzgar Enerjisinin Tanımı ve Oluşumu	3
2.2. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi	4
2.3. Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	5
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	10
3.1. Güç Esasına Göre Sınıflandırma	10
3.1.1. Mikro türbinler	10
3.1.2. Küçük rüzgar türbinleri	10
3.1.3. Büyük rüzgar türbinleri	10
3.1.4. Megawatt türbinler	11
3.2. Dönme Eksenine Göre Sınıflandırma	12
3.2.1. Yatay eksenli rüzgar çarkları	12
3.2.1.1. Klasik yatay eksenli rüzgar çarkları	14
3.2.1.1.1. Döner çatılı rüzgar çarkları	14
3.2.1.1.2. Döner kafesli rüzgar çarkları	15
3.2.1.2. Dönme hızına göre sınıflandırma	15
3.2.1.2.1. Yüksek hızlı rüzgar çarkları	15
3.2.1.2.2. Düşük hızlı rüzgar çarkları	17
3.2.2. Düşey eksenli rüzgar çarkları	18
3.2.2.1. Sürüklenme kuvveti ile çalışan rüzgar çarkları	18
3.2.2.2. Kaldırma kuvveti ile çalışan rüzgar çarkları	18
3.2.2.3. Sürüklenme-kaldırma tipi rüzgar çarkları	18
3.2.2.4. Diğer düşey eksenli rüzgar çarkları	19
4. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ	23
4.1. Kanat Profili Geometrisi ve Aerodinamik Karakteristikler	26
4.1.1. Darrieus çarkı aerodinamik hesaplamaları	30
4.2. Darrieus Çarkının Tasarım Yöntemleri ve Geometrileri	38
4.2.1. Zincir eğrisi (catenary) kanat geometrisi	39
4.2.2. Parabolik kanat geometrisi	43
4.2.3. Troposkien kanat geometrisi ($G=0$)	44
4.2.4. Değiştirilmiş troposkien kanadı	47
4.2.5. Sandia tipi kanat geometrisi	48

5. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ TASARIMINDAKİ GELECEKTEKİ EĞİLİMLER	55
5.1. Rüzgar Türbini Tasarım Parametreleri	55
5.2. Gelecekteki Tasarım Seçenekleri	60
5.3. Yatay Eksenli ve Düşey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırılması	63
5.4. Düşey Eksenli Çarkların Uygulanabilirliği	66
6.DARRIEUS RÜZGAR ÇARKLARININ ÖRNEK HESABI VE BOYUTLANDIRILMASI	67
6.1. Darrieus Rüzgar Çarkının Basit Hesap ve Tasarımı	67
6.2. Ayrıntılı Hesaplama	69
7. SONUÇ VE İRDELEME	76
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Dünya çevresinde rüzgar akımları.....	3
Şekil 2.2 2005 yılı sonu Avrupa rüzgar enerjisi kurulu gücü.....	7
Şekil 2.3 Deniz üstü rüzgar tarlası, Horns-Rev, Danimarka.....	8
Şekil 3.1 Rüzgar çarklarının sınıflandırılması.....	13
Şekil 3.2 Döner çatılı rüzgar çarkı.....	14
Şekil 3.3 Döner kafesli rüzgar çarkı.....	15
Şekil 3.4 Üç kanatlı yüksek hızlı rüzgar çarkı.....	16
Şekil 3.5 Çok kanatlı düşük hızlı rüzgar çarkı.....	17
Şekil 3.6 Savonius rüzgar çarkı.....	19
Şekil 3.7 Lafond rüzgar çarkı.....	20
Şekil 3.8 Bir pompayı çalıştıran Panemone rüzgar çarkı.....	21
Şekil 3.9 Konik kanatlı Panemone rüzgar çarkı.....	21
Şekil 3.10 Parabolik ve konik Darrieus rüzgar çarkları.....	22
Şekil 3.11 Birleşik Savonius- Darrieus rüzgar çarkı.....	22
Şekil 4.1 Darrieus rüzgar çarkı (DOE/SANDIA 34-m).....	24
Şekil 4.2 Kanat geometrisi.....	27
Şekil 4.3 Kanat profilindeki basınç alanları.....	28
Şekil 4.4 Kaldırma kuvveti ve bileşenleri.....	29
Şekil 4.5 Değişik Darrieus çarkları.....	31
Şekil 4.6 Kanada etki eden rüzgar hızının bileşenleri.....	32
Şekil 4.7 W hızı ve kuvvet bileşenleri.....	33
Şekil 4.8 Dönen kanatlar için değişik pozisyonlardaki rüzgar ve kuvvet bileşenleri.....	35
Şekil 4.9 Zincir geometrisi (Catenary) kanat şekli.....	40
Şekil 4.10 Troposkien şekli.....	45
Şekil 4.11 Sandia kanat şekli.....	48
Şekil 4.12 Darrieus çark geometrileri.....	54
Şekil 5.1 Darrieus türbini.....	56
Şekil 5.2 Flowind Darrieus türbinleri.....	59
Şekil 5.3 Eşdeğer DERT/YERT çark boyutları.....	65
Şekil 6.1 Farklı tipteki kanat geometrileri.....	72
Şekil 6.2 NACA 65-018 kanat profili.....	74
Şekil 6.3 NACA 0012 kanat profili.....	75

TABLOLAR DİZİNİ

		Sayfa
Tablo 2.1	Bazı ülkelerdeki rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi.....	6
Tablo 2.2	Rüzgar potansiyeli zengin olan yöreler	9
Tablo 4.1	Farklı kanat biçimlerindeki iki kanatlı Darrieus çarkları için geometrik parametreler	51
Tablo 4.2	Boyutsuz koordinatlar ve meridyen açısı (radyan olarak)	52
Tablo 4.3	Magdalen Islands Darrieus çarkının boyutsuz koordinatları	53
Tablo 5.1	Çark kütlesi ve çark boyutları.....	57
Tablo 5.2	İki ve üç kanatlıların üstünlükleri	58
Tablo 5.3	Darrieus rüzgar türbini tasarım seçenekleri.....	61
Tablo 5.4	Darrieus rüzgar türbini gelişmeleri.....	62
Tablo 5.5	DERT yükseklik / çap oranları	63
Tablo 5.6	YERT ile DERT lerinin Üstünlükleri ve Sakıncaları	64
Tablo 6.1	Farklı kanat tipleri için kanat boylarının karşılaştırılması.....	70
Tablo 6.2	Farklı kanat tipleri için koordinat değerleri	71
Tablo 6.3	NACA 65-018 kanat profili için eksen değerleri	73
Tablo 6.4	NACA 0012 kanat profili için eksen değerleri.....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V	Rüzgar hızı (m/s)
P	Güç (W)
M	Moment (N.m)
C _p	Güç katsayısı
C _m	Moment katsayısı
F	Kuvvet (N)
F _l	Kaldırma kuvveti (N)
F _d	Direnç (Sürüklenme) kuvveti (N)
F _t	Teğetsel kuvvet (N)
F _n	Normal kuvveti (N)
c	Çark kanat profili giriş uzunluğu (m)
ℓ	Çark kanat uzunluğu (m)
C _l	Kaldırma kuvveti katsayısı
C _d	Direnç (Sürüklenme) kuvveti katsayısı
C _n	Normal kuvvet katsayısı
C _t	Teğetsel kuvvet katsayısı
C _r	Toplam aerodinamik katsayı
α	Hücum açısı (°)
ε	Kayma açısı (°)
λ	Uç hız oranı
S	Süpürme alanı (m ²)
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
ω	Açısal hız (rad/s)
W	Bağlı rüzgar hızı (m/s)
V	Rüzgar hızı (m/s)
U	Kanat çevresel hızı (m/s)
q	Dinamik hava basıncı (N/m ²)
η _{kay}	Toplam kayıp katsayısı
R	Çark yarıçapı (m)
H	Çark yarı yüksekliği (m)
b	Çarkın kanat sayısı (adet)
β	Çap yükseklik oranı
η = y / R	Boyutsuz y-eksen koordinatı
ζ = z / H	Boyutsuz z-eksen koordinatı
δ	Meridyen açısı (radyan)
r	Yerel çark yarıçapı (m)
z	Yerel çark yüksekliği (m)
r _E	Ekvatordaki eğrilik yarıçapı (m)
F _c	Merkezkaç kuvveti (N)
T	Gerilme kuvveti (N)
σ	Birim uzunluk başına kablonun kütlesi
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
AYÇO	Arttırılmış yükseklik çap oranı
DETT	Düşey eksenli rüzgar türbini
YERT	Yatay eksenli rüzgar türbini

1. GİRİŞ

Hareketin ve işin kaynağı olan enerji fiziksel bir sistemin iş yapabilme yeteneğidir. Dünyada insanlar ve tüm canlıların en temel ihtiyaçlarından en lüks ihtiyaçlarına varıncaya kadar; örneğin ulaşım, beslenme, ısınma vb. tüm gereksinimlerini karşılamak için enerjiye ihtiyaç duyarlar.

Dünyadaki artan nüfus ve gelişen sanayi ile enerji kaynakları sürekli kullanılmaktadır. Enerji gereksinimimizin büyük bir kısmı petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıt kaynaklarından karşılanmaktadır.

Fosil yakıt kaynakları belirli coğrafi bölgelerde sınırlı olarak bulunmakta ve kullandıkça azalmaktadır. Belirli bir ömrü olduğu bilinen bu kaynaklara seçenek olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları önemini arttırmakta ve kullanımı için de yeni AR-GE ve teknolojileri gündeme getirmektedir. Güneş, rüzgar ve jeotermal gibi yenilenebilir enerjilerin ve hidrojen gibi yeni enerjilerin depolanmasında yeni yöntem ve malzemelerin geliştirilmesi bu enerjilerin kullanılmasını gündeme getiren en önemli faktörlerdir.

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir Enerji Kaynakları kullanıldıkça tükenmeyen ve çevre dostu olan bir enerji kaynağıdır. Bu tip enerjilerin kullanımı gün geçtikçe artmakta ve gelişen cihaz ve teknolojiler ile maliyet azaltılması ve verimlerinin iyileştirilmesi ile daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Başlıca Yenilenebilir Kaynakları:

1. Direkt güneş enerjisi
2. Biyolojik (Fotokimyasal)
 - a. Odun
 - b. Tahıl ve hayvanlar
 - c. Organik artıklar

- d. Biyolojik gaz
 - e. Hayvan ve insan gücü
- 3. Dolaylı güneş enerjisi**
- a. Su veya hidrolik
 - b. Rüzgar
 - c. Dalga
 - d. Termik ısı farkı
 - e. Gel-git
- 4. Jeotermal (ısı akışı)**

Bu çalışmada; yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi incelenecektir. Rüzgar enerjisi uzun yıllardan beri bilinen önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olup farklı alanlarda oluşan sıcaklık değişimleri sonucu meydana gelen hava akımlarıdır. Rüzgar enerjisinden yararlanma rüzgar çarkları ve rüzgar türbinleri ile sağlanır. Geçen yüzyıl içerisinde son altmış yılda kullanılan modern rüzgar türbinleri genellikle iki, üç ve çok kanatlı yatay ekselidir. Çok eski uygulamaları olmasına rağmen düşey eksenli rüzgar türbinlerinin gelişimi son yıllarda olmuştur. Burada yapacağımız çalışmada düşey eksenli rüzgar türbinlerinden olan Darrieus tipi ele alınacak ve bunun çeşitli tipleri tanıtılacak ve aralarındaki farklılıklar incelenecektir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar enerjisi çevresel kirliliğe yol açmayan, yenilenebilir ve kaynağını güneşten alan bir enerji türüdür. Fosil enerji kaynaklarının tükenmesi ve yaratmış olduğu çevre sorunları nedeniyle, uzun yıllardan beri kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde önemini arttırmıştır.

2.1. Rüzgar Enerjisinin Tanımı Ve Oluşumu

Diğer enerjilerde olduğu gibi rüzgar enerjisinin kaynağı da güneştir. Rüzgarlar yeryüzündeki farklı güneş ışınımı dağılımının neden olduğu basınç ve sıcaklık farklarının dengelenmesiyle oluşan hava akımlarıdır. Yeryüzü kabuğu homojen ısınma ve soğuma davranışı göstermez. Bu nedenle büyük hava kütleleri hareket etmek zorundadır. Bu hava kütlelerinin hareketine rüzgar denir.

Dünyanın bir bölümünde hava, kara ve denizler, ısınırken diğer kesiminde soğurlar. Bu ısınma ve soğuma dünyanın günlük dönüş hareketi sebebiyle periyodik olarak sürer. Bu sebepten dolayı dünyanın yapısal özelliği farklı olan coğrafi bölgelerinde rüzgar akımları oluşur.



Şekil 2.1 Dünya çevresinde rüzgar akımları (WEB_3 2006)

2.2. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

Rüzgar enerjisi çok eski çağlardan beri bilinmektedir. İlk rüzgar çarkları tarihte, özellikle kırsal alanlarda ve tarımsal amaçlarla kullanılmıştır. M.Ö 3000 yıllarında Mısır'da İskenderiye'de kurulan rüzgar çarkları Nil vadisinde toprakların sulanmasında kullanıldı. M.Ö 250 yıllarında İran'da ilk düşey eksenli rüzgar çarkları tahıl öğütmede kullanıldı ve daha sonra tüm islam ülkelerine ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkelere yayılmıştır. Ahşap çubuklarla oluşturulan bezden yelkenli rüzgar çarkları Akdeniz ülkelerinde, Girit'te, Anadolu'da, İspanya ve Portekiz'de kurulmuş ve bunların izlerine hala günümüzde rastlanmaktadır (Atılğan 1995).

Ortaçağda Avrupa'da çok yaygın bir şekilde kullanılan rüzgar çarkları Avrupa'ya 13.yüzyılda haçlı seferleri esnasında Anadolu'dan götürülmüştür. Hollanda'da 17.yüzyılda gemi ve yel değirmenlerinde uygulanmasıyla bu ülkenin endüstriyel gelişimine katkıda bulunmuştur. 1800'lerin başlarında buhar makinesinin keşfiyle yelkenli gemi S.S.Savannah 1819 da Atlantik'i aştı. 1890'da Danimarka'da Paul La Cour adındaki bir Fransız tarafından 9 kW'lık iki jeneratörün çalıştırılmasıyla ilk uygulamalar başlamıştır.

Enerji ihtiyacının ve petrol fiyatının hızla artması, fosil yakıtların hızla azalması yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmıştır. Bunun sonucunda rüzgar enerjisi üzerinde yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik üreterek, enerji ihtiyacını karşılamak için çalışma yapan ülkeler arasında Almanya, Kanada, Danimarka, Fransa, İngiltere, Hollanda, Rusya, İsveç, Amerika Birleşik Devletleri bulunmaktadır.

A.B.D' de ilk büyük rüzgar jeneratörü 1941 yılında S.Morgan Smith Co. İle General Electric Co. Firmaları tarafından Vermont'ta kuruldu. Smith-Putnam adıyla bilinen bu rüzgar jeneratörü Palmer C. Putnam isimli bir Amerikalı mühendis tarafından tasarlanmıştır. Herbiri 8 ton ağırlığındaki iki kanada sahip olan makinenin kanatlarının uçtan uca mesafesi 53.5 m, kule yüksekliği 33m ve nominal gücünde 1250 kW dır. Bu makine 1942 yılına kadar 179000 kWh enerji üretmiş ve daha sonra arızalanarak devre dışı kalmıştır. A.B.D'de büyük rüzgar jeneratörleri üzerinde çalışmalar halensürdürülmektedir (Atılğan 1995).

1958 ile 1960 yılları arasında Fransızlar birçok büyük rüzgar jeneratörleri kurup çalıştırdılar. Almanya'da 1950-1960 yılları arasında Prof. Dr. Hutter tarafından rüzgar çarkları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. En büyüğü 100 kW gücündeki bu türbinlerin kanat çapları 34 metredir. Bunlar 1957 ile 1968 yılları arasında 4000 saatten fazla çalışmışlardır. Ekonomik nedenlerle çalışmalarına son verilmiştir.

Danimarka'da II.Dünya savaşıdan sonra yeni tip büyük rüzgar türbinleri çoğalmaya başladı. 1950'den sonra deneysel maksatlar için 12, 45 ve 200 kW güçlerindeki makineler ulusal şebekeye bağlandılar. 200 kW lık Gedser makinesi 1968'e kadar çalıştırılmış fakat sonra ekonomik nedenlerden dolayı durdurulmuştur. 1973 deki enerji krizinden sonra tekrar yenileştirilerek 1977 de servise konulmuştur.

Kanada'daki Hydro-Quebec firması tarafından 1976 yılında Madeleine Adalarında çift kanatlı düşey eksenli Darrieus tipi 200 kW lık rüzgar türbini kurdular. NCR of Canada ile Hydro-Quebec firması tarafından batı Quebec'te Aeolus modeli Darrieus tipi türbini 1985 yılında devreye girmiş ve 64 metre çapında, 4 MW gücündedir.

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. Her iki rüzgar çarkı tipinin mahzur ve üstünlüklerini gidermek için birleşik Savonius-Darrieus rüzgar çarkları geliştirilmiştir.

2.3 Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Rüzgar; hava akımı sonucu oluşan kinetik enerji nedeniyle doğal bir enerji potansiyeline sahiptir. Bunun bilinen fiziksel kanun ve eldeki teknolojik imkanlar dahilinde enerjiye çevrilebilen kısmına rüzgar teknik potansiyeli denir. Diğer enerji kaynaklarına göre ekonomik olarak kullanılabilen kısmı ise, rüzgar enerjisi ekonomik potansiyeli olarak adlandırılabilir (Yerebakan 2001).

1974-1978 yılları arasında meydana gelen petrol bunalımlarından sonra, enerji talebindeki artış diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi rüzgar enerjisinin de önemini arttırmıştır. Geçmişteki rüzgar çarkları ve düşük kapasiteli rüzgar türbinleri

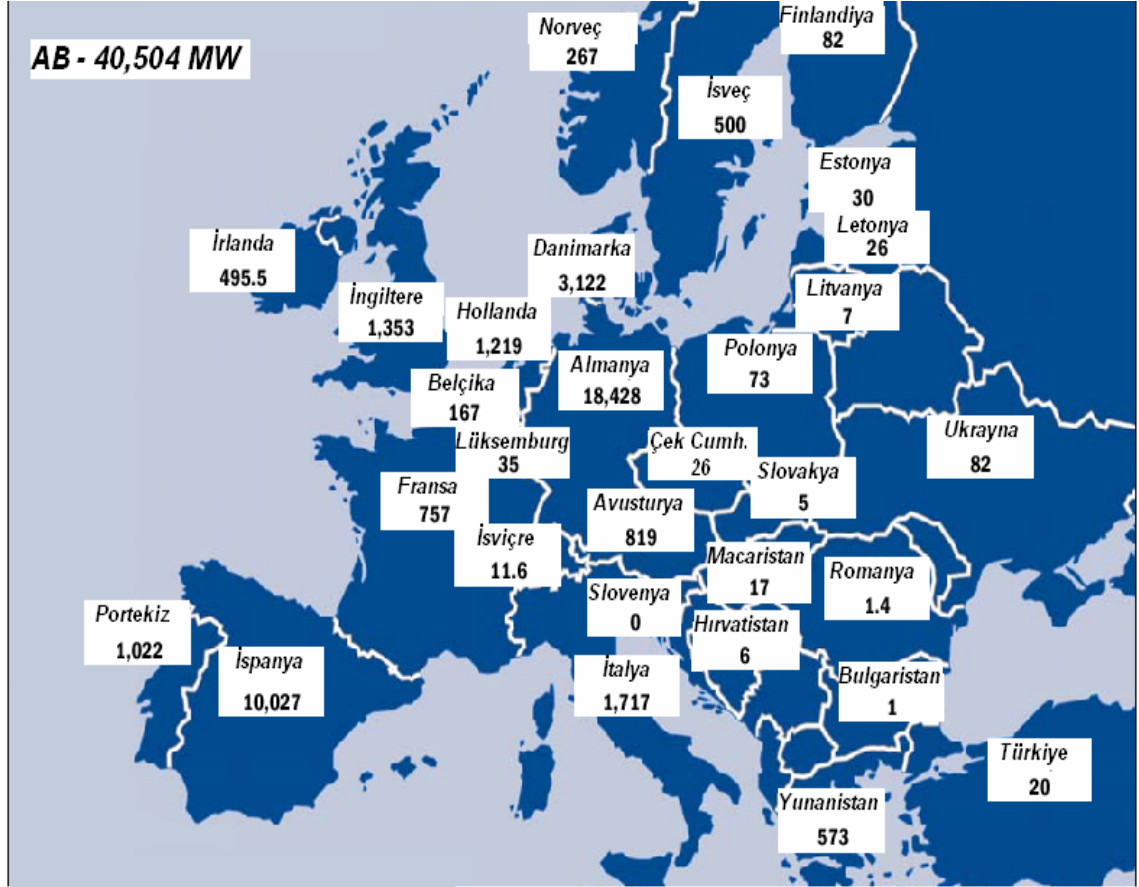
yerine, modern rüzgar türbinleri üzerinde durulmaya başlanmış, tekli makineler yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekelerinin beslenmesi amaçlanmıştır. Tablo 2.1’de bazı ülkelerdeki rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Bazı ülkelerdeki rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi (WEB_1 2006)

Ülke	MW (2001 Sonu)	MW (2002 Sonu)	MW (2003 Sonu)	2002-2003 Büyüme Oranı (%)	3Yıllık Ortalama Büyüme(%)
Almanya	8.734	11.968	14.612	22.1	33.8
ABD	4.245	4.674	6.361	36.1	34.6
İspanya	3.550	5.043	6.420	27.3	31.3
Danimarka	2.456	2.880	3.076	6.8	9.5
Hindistan	1.456	1.702	2.125	24.9	20.3
İtalya	700	806	922	14.4	29.5
Birleşik Krallık	525	570	759	33.1	21.3
Hollanda	523	727	938	29.0	25.6
Çin	406	473	571	20.7	17.5
Japonya	357	486	761	56.6	75.1
İlk On Toplamı	22.952	29.329	36.545	24.6	29.2
Dünya Toplamı	24.927	32.037	40.301	25.6	29.2

Avrupa’da en büyük kurulu güç Almanya’da olup onu Danimarka, İspanya ve diğer ülkeler takip etmektedir. Şekil 2.2’de 2005 yılı sonu itibarıyla Avrupa rüzgar enerjisi kurulu güçleri gösterilmiştir.

Bu ülkelerden Danimarka, elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık % 20 sini rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinden elde etmekte olup 2030 yılında ise bu oranı % 50 seviyelerine çıkarmayı amaçlamaktadır.



Şekil 2.2 2005 yılı sonu Avrupa rüzgar enerjisi kurulu gücü (WEB_1 2006)

Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (EWEA), hızlı bir şekilde artış gösteren büyüme hızını göz önüne alarak, elektrik enerjisi ihtiyacının 2020’de yaklaşık %12’ sini rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinden elde etmeyi hedeflemektedir (WEB_1 2006).

Günümüzde, rüzgar türbinlerinin çoğunluğu karasal alanlara kurulmaktadır. Rüzgar türbinlerinin kurulu güç kapasitelerinin MW düzeylerine ulaşmış olması denizlerin rüzgar potansiyelinin yüksek olması ve kurma teknolojisinin hızla gelişmesi deniz üstü (off-shore) uygulamalarını gündeme taşımıştır. Denizlerdeki türbülans yoğunluğunun karasal alanlardaki türbülans yoğunluğundan daha az olması sonucu deniz üstü santrallerinin ömürlerinin 25-30 yıla çıkacağı umulmaktadır. Deniz üstü rüzgar santralleri henüz yeni bir teknoloji olmasına rağmen Danimarka ve Hollanda gibi ülkelerde kurulmakta ve çalışmalar yapılmaktadır. Bunların ilki olan Kuzey Deniz’inde Horns Rev’de bulunan çiftlik (160 MW) 2002 yılında kurulmuştur.

Şekil 2.3’de deniz üstü rüzgar tarlası gösterilmiştir. İkincisi olan Roedsand Banke’de Nysted açıklarındaki çiftlik (158 MW) ise 2003 yılında tamamlanmıştır. 2007 ve 2008 yıllarında da en az 200 MW ‘lık iki rüzgar çiftliği daha tamamlanması hedeflenmektedir.



Şekil 2.3 Deniz üstü rüzgar tarlası, Horns-Rev, Danimarka (WEB_1 2006)

Türkiye’de son yıllarda gittikçe artan enerji sorunu; özellikle elektrik enerjisi üretiminin doğalgaz gibi büyük ölçüde dışa bağımlılığı arttırmış bu husus da enerji üretim çeşitliliğinde dengesizlikler oluşturmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi, ülkemizde iyi bir potansiyele sahip olup bu potansiyelden yeteri kadar yararlanamamaktayız. Dışa bağımlılığı olmayan bir enerji kaynağı olması nedeniyle rüzgar enerjisi giderek cazibesini arttırmaktadır (Deniz 2002).

E.İ.E.İ tarafından yapılan ve D.M.İ istasyonlarını temel alan rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından zengin olan bazı yöreler, Tablo 2.2’de gösterilmektedir. Ülkemizde Marmara, Ege ve Güney Doğu Anadolu Bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgelerdir (Deda 2000).

Tablo 2.2 Rüzgar potansiyeli zengin olan yöreler (Deda 2000)

İstasyon adı	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Gücü Yoğunluğu(W/m ²)
Bandırma	5.1	152.6
Antakya	4.5	108.9
Kumköy	4.1	82.0
Mardin	4.1	81.4
Sinop	4.1	77.9
Gökçeada	4.0	74.5
Çorlu	4.0	72.3
Çanakkale	3.9	71.2

Ülkemizde, İzmir Çeşme Alaçatı 7.2 MW kurulu gücünde, ve Çanakkale Bozcaada 10.2 MW kurulu gücünde, yine İzmir Çeşme Germiyan'da 1.7 MW kurulu gücünde ve İstanbul Kilyos'ta 1.2 MW kurulu gücünde olmak üzere 4 adet rüzgar enerjisi santrali bulunmaktadır.

Bu santrallerinde kullanılan türbinlerin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir;

İzmir Çeşme Alaçatı Rüzgar Enerjisi Santrali:

Türbin Tipi	Gücü	Kule Yüksekliği	Çapı	Türbin Sayısı
Vestas V44-600	600 kW	45 m	44m	12

Çanakkale Bozcaada Rüzgar Enerjisi Santrali:

Türbin Tipi	Gücü	Kule Yüksekliği	Çapı	Türbin Sayısı
Enercon E40	600 kW	45 m	44m	17

İzmir Çeşme Germiyan Rüzgar Enerjisi Santrali:

Türbin Tipi	Gücü	Kule Yüksekliği	Çapı	Türbin Sayısı
Enercon E40	560 kW	40.3 m	42 m	3

İstanbul Kilyos Rüzgar Enerjisi Santrali:

Türbin Tipi	Gücü	Kule Yüksekliği	Çapı	Türbin Sayısı
Vestas V44-60	600 kW	45 m	44 m	2

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbinleri ürettikleri mekanik enerjiyle genellikle türbine bağlı elektrik jeneratörlerini çalıştırırlar. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanabilecek enerji rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı olarak artar. Günümüzde bazıları ticari amaçlı olmak üzere çeşitli türlerde rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Rüzgar türbinleri güç esasına, dönme eksenine ve dönme hızına göre sınıflandırılabilir.

3.1. Güç Esasına Göre Sınıflandırma

3.1.1. Mikro türbinler

Bu türbinler yaklaşık olarak 0 ile 3 kW arasında olup, batarya şarj etmek üzere kullanılmaktadır. Buna ilişkin pazar olarak uzak iletişim sistemleri, gezi tekneleri, karavanlar, ev içi sistemler, elektrikli çitler düşünülmektedir.

3.1.2. Küçük rüzgar türbinleri

Genellikle 2 ile 10 kW arası rüzgar türbinleri olup Bergey, Westwind, Proven, ve LMW tarafından geliştirilmiştir. Birkaç üreticinin tasarım ve prototip aşamalarında olan 50 kW'a kadar doğrudan tahrikli türbini vardır. Bunların hepsi sabit mıknatıslı jeneratör kullanırken, bir tek Atlantic Orient Corporation (AOC) firmasının 20kW lık bir modelinde anahtarlamalı relüktans motoru kullanılmıştır. AOC jeneratörleri halen laboratuvarlar da test edilmektedir. Anahtarlamalı relüktans motorunun rotorunda yalnız lamine saç bulunur ve jeneratörlerin en basitidir (Yerebakan 2001).

3.1.3. Büyük rüzgar türbinleri

100 kW'dan daha büyük olan sistemlerdir. Doğrudan tahrikli sistemleri kullanan büyük rüzgar türbinlerinin gözlenen yararları şunlardır.

- Dişli sistemden daha düşük maliyetli
- Kule-baş kütlelerinde ve kabin uzunluğunda düşüş

- Verimlilikte belirli bir yüzde artışı

Bu faydaların mevcut tasarımlarda da elde edilip edilmeyeceği henüz belli değildir, ancak yeni teknolojinin konvansiyonel çözümlere şimdiden yetiştiği bir gerçektir. Doğrudan sürücülü makinelerde her zaman için, arkasından AC/DC/AC dönüştürücü yer almakla değişken hızlı işleme imkan vermektedir. Çoğu doğrudan sürücü sistemlerinde, endüksiyon makinelerinin uyumluluğundan yoksun oldukları için sabit hızlı işletim yapmak zordur. Doğrudan sürücülü türbinlerde nominal güç 200 kW dan 1.5 MW'a kadar (üretimdeki ve prototip makineler) değişir. Hem sabit mıknatıslı hem de sargılı rotor tasarımları kullanılmaktadır. Mevcut doğrudan sürücü tasarımlara örnek olarak aşağıdakileri verebiliriz.

- Enercon E30 (200 kW), E40 (500 kW), E66 (1.5 MW) : Senkron jeneratör,sargılı rotor konsepti ayrıntılı işletme deneyleri ile ispatlanmıştır.
- Lagerway LW45/750 (750 kW) : Prototip aşamasında, senkron jeneratör,sargılı rotor.
- Geneys 600, Tacke TW1500 : Tasarım aşamasındaki makineler, sargılı rotordan ziyade sabit mıknatıslı uyarma ve azaltılmış jeneratör çapı
- Aeolus III (3 MW) : Mevcut AEOLUS II rüzgar türbininin geliştirilmiş hali olarak tasarlanmakta, henüz inşa edilmedi, sabit mıknatıslı .
- PMG tasarımları (prototipler 120 kW 'a kadar test edildi) Ferrit mıknatıslar, şık modüler tasarım

Her ne kadar doğrudan sürücü sisteminin geliştirilmesi büyük rüzgar türbinlerinde büyük kütle ve maliyet düşüşlerine imkan verecek gibi gözüküyorsa da, tam entegre bir jeneratör rotoru ve rüzgar türbini tasarımında, tasarımın basitleştirilmesi, geniş menzilli değişken hızın kullanılması ve dişli kutusunun gerektirdiği bakımın ortadan kalkması, doğrudan sürücülü sistemlerin gelişimine destek vermiştir (Yerebakan 2001).

3.1.4. Megawatt rüzgar türbinleri

Rüzgar endüstrisinde her MW güç artışı için çok büyük fonlar harcanmaktadır. Halen birkaç MW lık güç aşılamamıştır. Güç büyüdükçe tasarımda olumsuz etkileri artmaktadır. Büyük ölçekli üretim birimleri bazı karasal ve özellikle off-shore uygulamalarda hala tercih edilmektedir. Tek bir destek yapı üzerinde birkaç çarktan

oluşan çoklu çark sistemleri, iyi ekonomik değerlere sahip 5 ile 10 MW 'lık birimleri en düşük yenilik ve geliştirme maliyetleri ile gerçekleştirme konusunda çözüm olarak görülmektedir. Bu tür sistemler uzun zamandır inceleme altındadır ve bu kapsamda Lagerway'in birkaç eski ve bir yeni tasarımı inşa edilmiştir. Bir kaç yıldır İngiltere'de yapılan son araştırmalar ve Hollanda'da yapılan çalışmalar konuya duyulan ilgiyi göstermektedir (Karadereli 1995, 2001).

3.2. Dönme Eksenine Göre Sınıflandırma

Bir diğer sınıflandırma ana milin dönme eksenine göre konumudur. Yatay eksenli ve dikey eksenli olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Şekil 3.1'de rüzgar çarklarının sınıflandırılması gösterilmiştir.

3.2.1. Yatay eksenli rüzgar çarkları

Rüzgar yönüne paralel dönme eksenlerine ve rüzgar yönüne dik kanatlara sahiptirler. Yatay eksenli çarkların maksimum enerjiyi tutabilmeleri için çarkları daima rüzgar akış yönünde olmalıdır. Bu da çarkın kule üstünde dönmesi ile sağlanır. Rüzgarın yönüne dönme hareketi, iki değişik konstrüksiyon ile sağlanır. Bunlar çarkın kule önüne ve çarkın kule arkasına yerleştirilmesine göre adlandırılır. Eğer kanat rüzgarı ön yüzünden alıyorsa çarkın arkasına bir kılavuz kanat takılır. Diğer şekilde ise kanat rüzgarı kulenin gerisinden alıyorsa kanatlar biraz konik yapılıdır. Böylece sistem rüzgarı takip ederek maksimum faydayı sağlar.

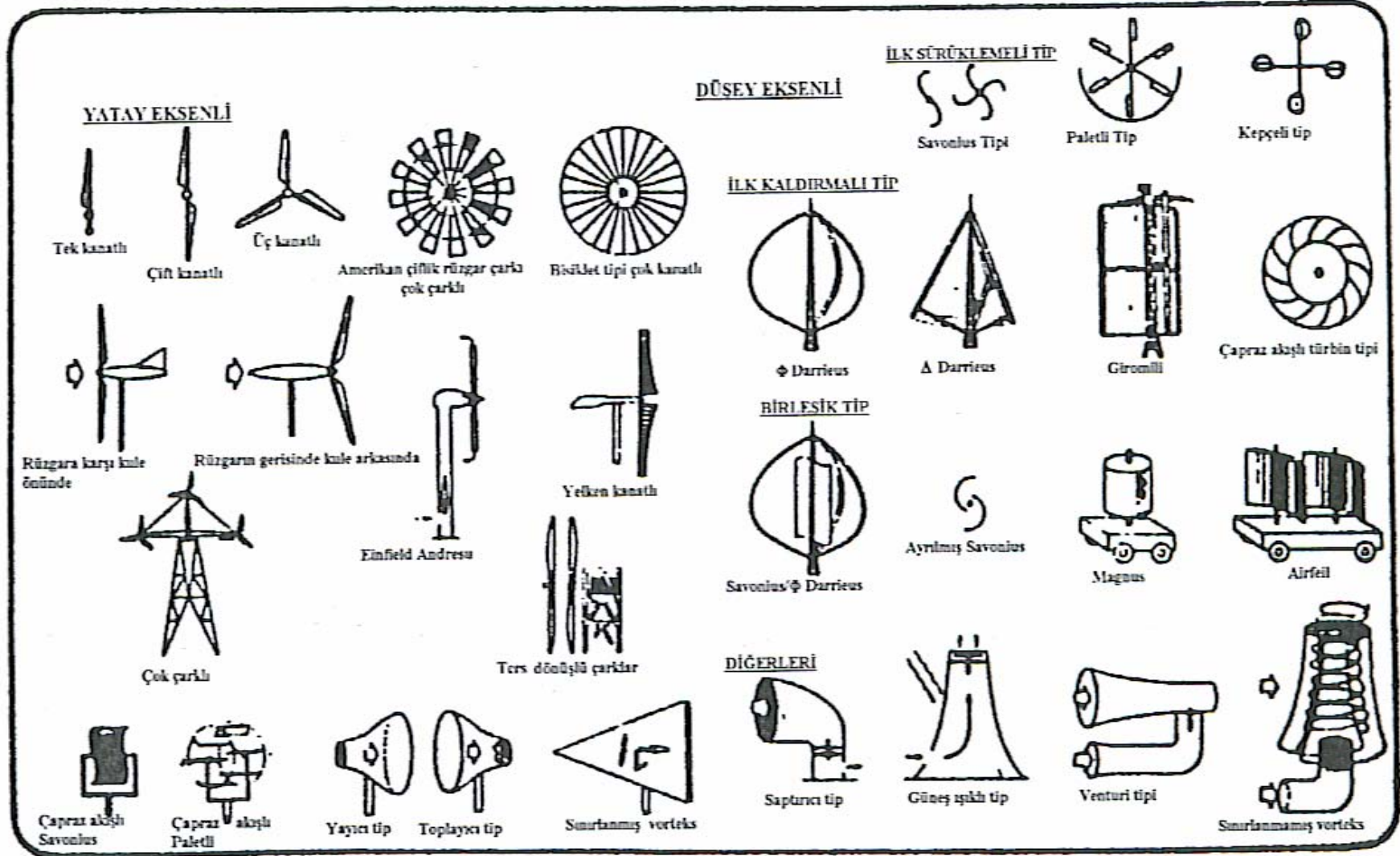
Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çarkları maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgar akışına dik olarak durmalıdır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri bu konuma, çark kule üzerinde döndürülerek getirilir.

Yatay eksenli rüzgar çarklarını şu şekilde sınıflandırabiliriz (Le Gourieres 1982).

1. Klasik yatay eksenli rüzgar çarkları

1.1. Döner çatılı rüzgar çarkları

1.2 Döner kafesli rüzgar çarkları



Şekil 3.1 Rüzgar çarklarının sınıflandırılması (Deda 2000).

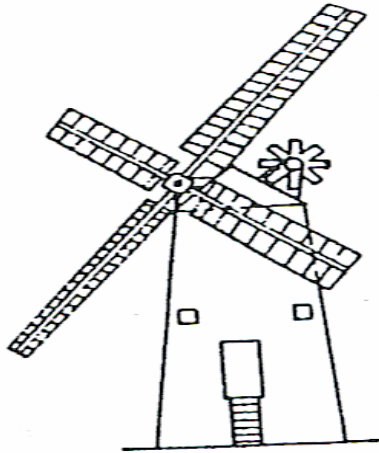
- 2.Yüksek hızlı rüzgar çarkları
- 3.Düşük hızlı rüzgar çarkları
- 4.Diğer yatay eksenli rüzgar çarkları
 - 4.1 Difüzörlü rüzgar çarkları
 - 4.2 Dinamik indüktörlü rüzgar çarkları
 - 4.3 Tornado sistemli rüzgar çarkları
 - 4.4 Kepçeli rüzgar çarkları
 - 4.5 Diskli rüzgar çarkları

3.2.1.1. Klasik yatay eksenli rüzgar çarkları

Bu tipler Avrupa'da, genellikle Atlantik kıyılarında, Baltık denizinde, kuzey denizinde ve Ege denizi civarında görülebilir. Bu tip döner çatılı ve döner kafesli olmak üzere ikiye ayrılır (Le Gourieres 1982, Deda 2000).

3.2.1.1.1. Döner çatılı rüzgar çarkları

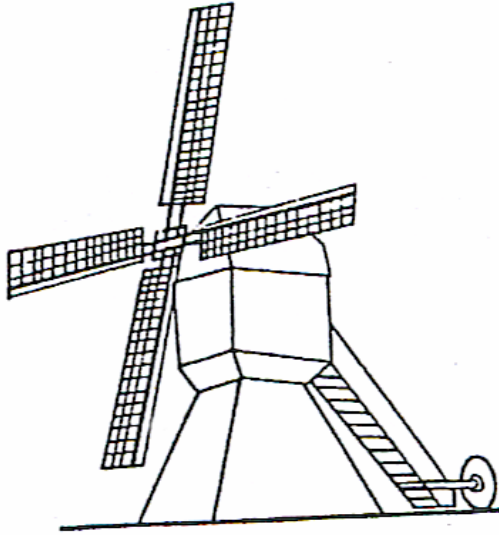
Çatı yarım bir koni şeklindedir ve dönen bir mili taşır. Çatı bina üzerinde dönebilir. Genel olarak bina taştan yapılmıştır. Çatı uzun bir kirişle aşağıya doğru uzatılmıştır, hareket ettiği zaman çarkın kanatlarını rüzgara karşı yönlendirir. İlave bir rüzgar çarkı ile, rüzgara karşı yönlendirilenleri en yeni olan tipleridir. Şekil 3.2'de döner çatılı tip örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Döner çatılı rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982, Deda 2000).

3.2.1.1.2. Döner kafesli rüzgar çarkları

Çarkın mili değirmen taşlarını taşıyan kafese bağlanmıştır. Bütün çark bir mil üzerine yerleştirilmiştir. Önceki tipte olduğu gibi, çarkın rüzgara karşı yönlendirilmesi yön kolu veya rüzgar çarkı ile yapılır. Çark çalıştığında, şiddetli rüzgar meydana gelirse keten bezle kaplı olan ve genellikle ağaçtan yapılmış kanatlar, hızla sarılır veya kanatlarda bulunan hareketli kepenklerin daha fazla veya daha az açılmasıyla, dönme hızı düzenlenir. Şekil 3.3’de döner kafesli tip örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Döner kafesli rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

3.2.1.2. Dönme hızına göre sınıflandırma

Dönme hızına göre yüksek hızlı rüzgar çarkları ve düşük hızlı rüzgar çarkları olmak üzere ikiye ayrılabilir.

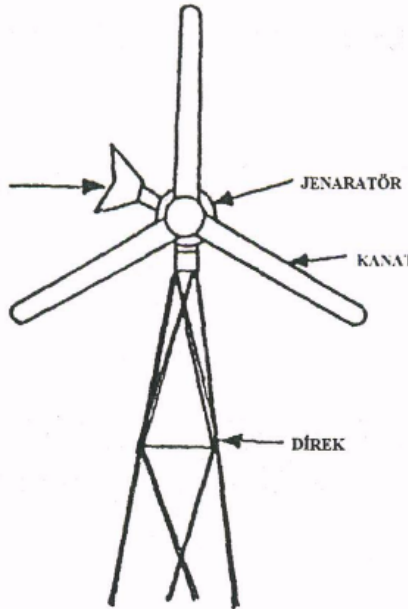
3.2.1.2.1. Yüksek hızlı rüzgar çarkları

Bu tip rüzgar makinelerinde, kanatların sayısı daha az olup 2 ile 4 arasında değişir. Kanat sayısı azaldıkça çarkın hızı artar. Aynı eşdeğer güce sahip hızı yavaş olan rüzgar çarklarına göre daha hafiftirler. Dönme hızları daha yavaş olan aynı çaptaki düşük hızlı rüzgar çarklarına göre daha hızlıdır. Bu nedenle daha fazla kullanılırlar. Fakat ilk

hareket güçlüğü gibi bir dezavantajı vardır. Özel düzenekler olmadığında, 5 m/s bir rüzgar hızı bu çarkları çalıştırmak için yeterlidir. Elektrik üretmek için yüksek hızlı rüzgar çarkları çok uygundur. Rüzgar jeneratörleri genellikle yüksek hızlı rüzgar çarkları ile tahrik edilir. Öte yandan aynı çaptaki ve aynı rüzgar hızındaki bir yüksek hızlı rüzgar çarkı tarafından üretilen moment, yavaş bir rüzgar çarkının momentinden daha küçüktür (Le Gourieres 1982, Deda 2000).

Bu çarkların ağırlıkları ve fiyatları aynı çaptaki düşük rüzgar çarklarına göre daha azdır. Buna ek olarak, yüksek santrifüj kuvvetlere dayanıklı olarak yapıldıkları için fırtınalarda doğan gerilme değişimleri, düşük hızlı rüzgar çarklarına göre daha az önemlidir. Fırtınalı hava şartlarında, kanatları eksen etrafında döndürmede kullanılan, döndürme düzenekleri rüzgarın etkisini azaltıcı yönde görev yapar.

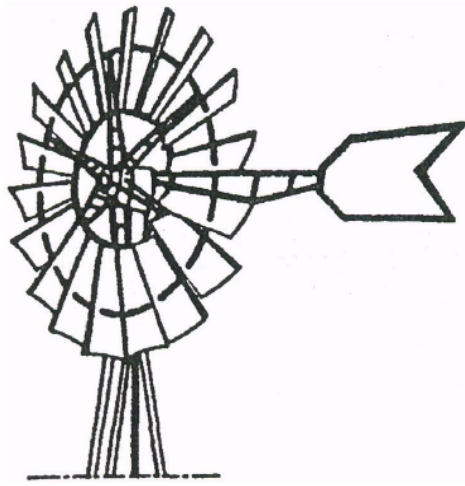
İlk harekete geçiş momentinin düşük olması bu çarklar için bir dezavantajdır. Bu durum eksen yakınındaki kanatlara yeterli bir genişlik ve mümkün olan en iyi adım (hatve) verilerek bir ölçüde kontrol edilebilir. Yüksek hızlı rüzgar çarklarına bir örnek Şekil 3.4 de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Üç kanatlı yüksek hızlı rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

3.2.1.2.2. Düşük hızlı rüzgar çarkları

1870 den beri çok kanatlı düşük hızlı rüzgar türbinleri ilk önce Amerika'da daha sonra Avrupa'da görülmüştür. Bu çeşit rüzgar çarklarında kanatların sayısı 12-24 arasında değişir, çarkın tüm yüzeyini kaplar. Rüzgar çarkı milinin arkasındaki kuyruk kanadı çarkı rüzgara karşı yönlendirir. Bu tür rüzgar çarklarının çapları genellikle 5 ile 8 metre arasında değişir. Amerika'da kurulan en büyük çok kanatlı rüzgar çarkının kanat çapı 15 metredir. Bu çarklar düşük rüzgar hızlarına uyum sağlamış olup 2 ile 3 m/s arasında değişen rüzgar hızlarında kolayca harekete başlayabilirler (Le Gourieres 1982). Düşük hızlı rüzgar çarklarına bir örnek Şekil 3.5 de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Çok kanatlı düşük hızlı rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

Düşük hızlı rüzgar çarkları ince ve hafif iç bükey profilli kanatlara sahiptir. Hareketli kanadın iskeletini meydana getirirken, rüzgar kuvvetine karşı dayanıklılığını arttırmak için kanatların ortasında metalik bir dairesel çerçeveye sağlamlaştırılır.

Düşük hızlı rüzgar çarklarında güç üretimi iki nedenden dolayı düşüktür.

a. Bu makineler 3 ile 7 m/s arasında değişen orta seviyedeki rüzgar hızlarında kullanılırlar. Bununla beraber, 4 ile 5 m/s arasında değişen ortalama rüzgar hızlarına sahip olan bölgelerde su pompalamak için çok kullanışlıdır.

b. Buna ek olarak, çarkın ağır olması sebebiyle 9 ile 10 m çapındaki makineleri kurmak oldukça zordur.

3.2.2. Düşey eksenli rüzgar çarkları

Dönme eksenini rüzgar yönüne dik ve düşey konumda çalışırlar. Düşey eksenli rüzgar çarklarının rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğü vardır. Bu tip rüzgar çarklarında kanatların yüzeylerine gelen itme kuvveti farkı nedeni ile dönme hareketi oluşur. Bu tür türbinlerde, rüzgar hızına bağlı olarak bir direnç kuvveti meydana gelmekte ve bu kuvvetin türbin merkezinde oluşturduğu moment kanatların dönmesini sağlamaktadır. Düşey eksenli rüzgar çarklarının geliştirilmiş ve önemli olan tiplerini aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz.

3.2.2.1. Sürüklenme kuvveti ile çalışan rüzgar çarkları

1. Savonius tipi rüzgar çarkları
 - a. Tek kanatlı
 - b. Çok kanatlı
2. Lafond tipi rüzgar çarkları
3. Panemone tipi rüzgar çarkları

3.2.2.2. Kaldırma kuvveti ile çalışan rüzgar çarkları

- 1 . Darrieus tipi rüzgar çarkları
 - a. Silindirik tip
 - b. Konik tip
 - c. Mikser tipi
 - c1. Zincir Eğrisi (catenary)
 - c2. Parabolik
 - c3. Troposkien
 - c4. Sandia
2. Çapraz Akışlı Rüzgar Çarkları

3.2.2.3. Sürüklenme - kaldırma tipi rüzgar çarkları (Birleşik tip)

- 1 . Savonius-Darrieus çarkları
2. Ayrılmış Savonius çarkları

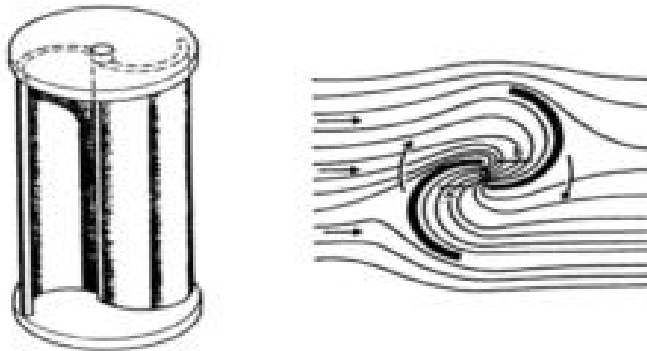
3.2.2.4. Diğer düşey eksenli rüzgar çarkları

- 1 . Döner bantlı çarklar
2. Salımlı çarklar
- 3 . Kafesli çarklar
4. Oynar kanatlı çarklar
5. Döner kanatlı çarklar
6. Koruyuculu çarklar

Düşey eksenli rüzgar çarklarından bazıları ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

- Savonius tipi rüzgar çarkları

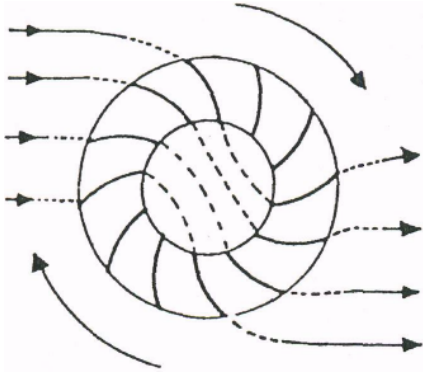
Finlandiya'lı bir mühendis olan Sigurd Savonius tarafından 1925 yılında keşfedilmiştir. Savonius rüzgar çarkları iki yatay disk arasında yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşur. Belirli bir hızla gelen rüzgar, çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve silindirin dış kısmında negatif bir moment yaratır. Silindirin iç kısmında oluşan moment dış kısımda oluşan momentten daha büyük olmasından dolayı bir dönme hareketi sağlanmaktadır (Le Gourieres 1982, Deda 2000). Şekil 3.6'da basit bir Savonius çarkı gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Savonius rüzgar çarkı (Deda 2000)

- Lafond tipi rüzgar çarkları

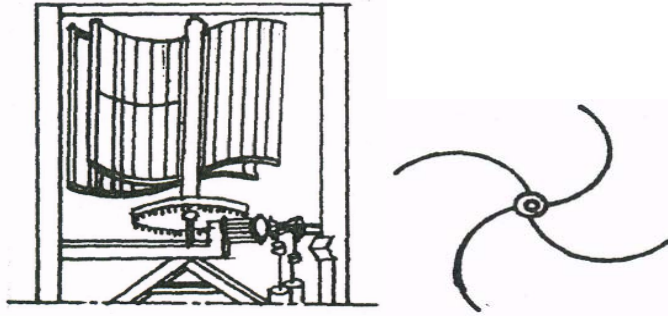
Çapraz akışlı bir makine olup, santrifüj vantilatöre ve hidrolikte kullanılan Banki türbinine benzemektedir. Rüzgarın kanada geldiği iç bükey yüzeydeki aerodinamik kuvvetler, diğer dış bükey yüzeylerden daha büyüktür. Bundan başka, bu makinede akışkan ilk önce rüzgarla beraber hareket eden kanatlar ve daha sonra rüzgara karşı hareket eden kanatlar tarafından saptırılır. Bu durum ek bir döndürme momenti meydana getirir. Lafond rüzgar çarkı 2.5 m/s'lik rüzgar hızında dönmeye başlar. Şekil 3.7'de Lafond rüzgar çarkı kanatları içinden havanın izlediği yol gösterilmiştir. Lafond rüzgar çarkı ile elde edilen enerji, aynı süpürme alanına sahip yatay eksenli diğer herhangi bir rüzgar çarkı tarafından elde edilen enerjinin yarısı dolayındadır. (Le Gourieres 1982, Deda 2000).



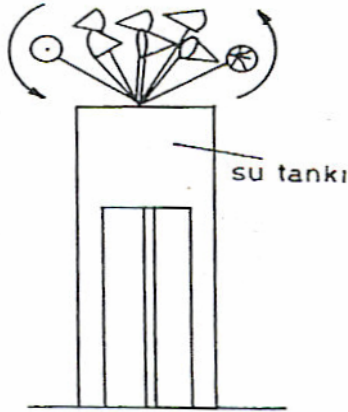
Şekil 3.7 Lafond rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

- Panemone tipi rüzgar çarkları

Panemone tipi rüzgar çarkları, en eski fark tesir makinelerinden birisidir. Kanatlar silindirikdir (Şekil 3.8). Fakat konik kanatlarda kullanılır. Auber de la Rue "L 'Homme et le Vent" adlı yapıtında Kanada'da gördüğü düşey eksenli rüzgar çarklarını tanıtmıştır (Le Gourieres 1982). Bu çark on iki adet konik kanada sahiptir ve su pompalamak için kullanıldığı çiftliğin deposu üzerine kurulmuştur. Çok özel bir tipte olan bu makine, Panemone rüzgar çarkının değişik bir şeklidir ve aynı prensibe göre çalışır. Şekil 3.9'de Panemone rüzgar çarkına bir örnek gösterilmiştir.



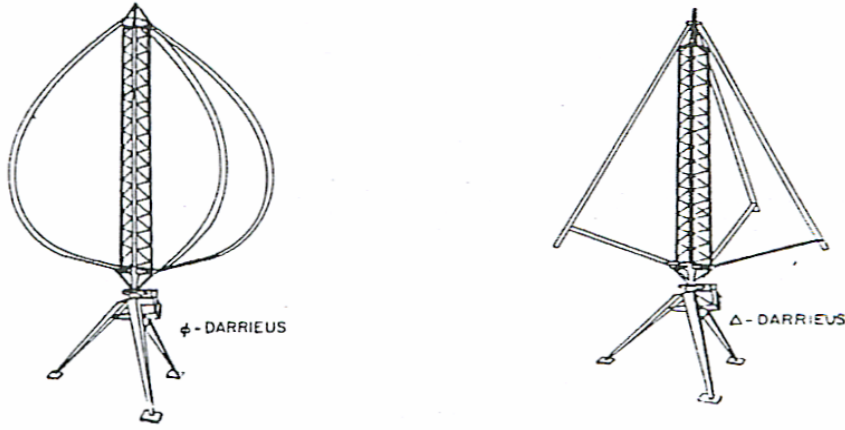
Şekil 3.8 Bir pompayı çalıştıran Panemone rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)



Şekil 3.9 Konik kanatlı Panemone rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

- Darrieus rüzgar çarkları

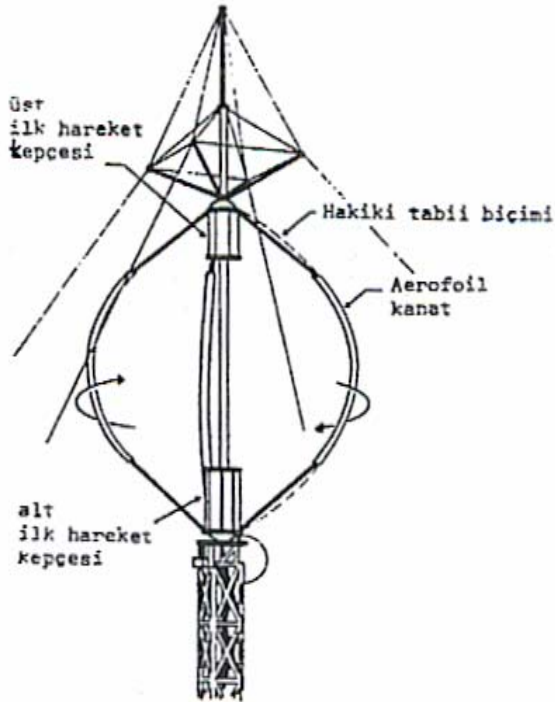
Bu makinelerin tasarımı Fransız bilim adamı Georges Darrieus tarafından yapılarak 1931 yılında patenti alınmıştır. Darrieus rüzgar çarkları düşey eksen etrafında dönen dış bükey kanatlardan meydana gelirler. Kanat biçimleri silindirik, konik, küresel veya paraboliktir. Şekil 3.10'da parabolik ve konik tipi Darrieus rüzgar çarkları görülmektedir. Görünüşleri yumurta çırpma makinesine andırır. Darrieus patentinde bu çarkları şu şekilde tanımlamaktadır. “Burada çark eğri kanatlara sahiptir ve iki sabit noktadan serbestçe asılmış, merkezkaç kuvvetlerin etkisi altında düşey bir eksen etrafında dönen düzgün yoğunluk ve kesit alanındaki mükemmel bir esnek kablo şeklinde düşünülebilir.”



Şekil 3.10 Parabolik ve konik Darrieus rüzgar çarkları (Le Gourieres 1982)

- Birleşik Savonius -Darrieus rüzgar çarkları

Darrieus çarkının ilk harekete geçişi zorluğu nedeniyle; Savonius çarkının ilk harekete geçirme özelliğinden yararlanılarak bu iki çarkın birleştirilmesiyle bir karma rüzgar çarkı meydana getirilir. Şekil 3.11'de birleşik Savonius-Darrieus rüzgar çarkı sistemi görülmektedir. Burada esas itibarıyla, normal işletme koşullarında güç üretimi Darrieus rüzgar çarkı tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 3.11 Birleşik Savonius- Darrieus rüzgar çarkı (Le Gourieres 1982)

4. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Dünyadaki rüzgar türbinlerinin büyük çoğunluğu geleneksel yatay eksenli pervaneli tiplerin aerodinamik olarak gelişmiş uyarlamalarıdır. Geçen 20 yıl esnasında, Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri üzerine büyük araştırmalar ve önemli mühendislik gelişmeleri yapıldı. Bununla beraber bu türbinler pervane tipli makineler kadar yaygınlaşmamıştır.

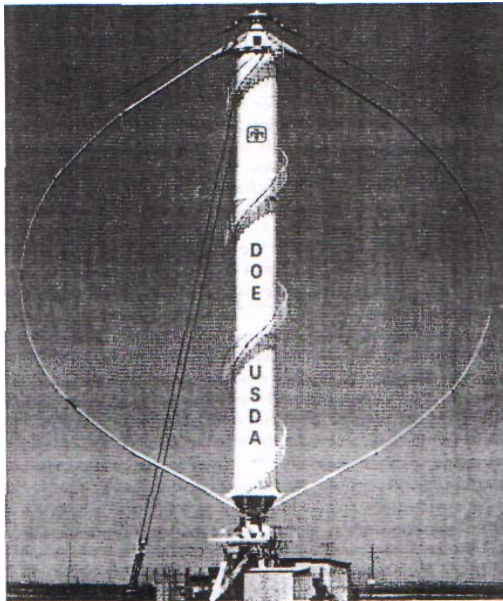
Darrieus rüzgar türbini 1931 de G.J.M Darrieus adına A.B.D Patent Bürosu tarafından, tescil edildi. Darrieus patenti “atlama ipi biçiminde bir akım ipçığı dış hat eğrisine “ sahiptir. Daha önce belirtildiği gibi Darrieus çarkı eğrisel kanatlara sahip olup iki ucundan serbestçe sabitlenmiş düzgün yoğunluk ve kesit alandaki mükemmel bir bükülebilir kablo biçimindedir. Santrifüj kuvvetler etkisinde böyle bir biçim doğal eğilme gerilmelerini en az düzeye indirir. Bu kanat şekli Yunancada “dönen ip” anlamına gelen Troposkien olarak adlandırılmaktadır. Darrieus rüzgar türbini performansı ile ilgili olarak bilinen ilk rüzgar türbini ölçmeleri Kanada Ulusal Araştırma Konseyinde R.S.Rangi ve P.South tarafından yapıldı (South ve Rangi 1975). Daha sonraki ölçmeler birçok kanat, çark katılığı ve bozucuların etkisi ve hava frenlerinin temel araştırmasını içerir. 1970 lerin başlarında, Kanada Milli Araştırma Konseyindeki mühendisler eğrisel kanatlar için bir zincir eğrisinin (catenary) yaklaşık biçimini kabul ederek, düşey eksenli rüzgar türbininin (DERT) benzer bir görünüşünü bağımsız olarak geliştirdiler.

İngiltere’de düşey eksenli rüzgar türbinleri limited şirketi tarafından H-tipi veya Musgrove çarkı DERT tanıtıldı (Musgrove ve Clare 1987). Musgrove çarkı düz bir kanattır hız kontrolünü sağlamak için kanat eğilebilir. H tipi makinenin iki modelinden biri 1986 da 25m çaplı olup İngiltere Enerji Bakanlığı tarafından desteklendi, diğeri ise 14 m çapında olup İtalya’nın Tema Spa şirketi tarafından kuruldu. HM-300 çarkı diğeri bir düz kanatlı Darrieus çarkı olup Heilderberg motor şirketi tarafından imal edilmiştir. İlginç bir H tipi model 1994 de Kaiser –Wilhelm-Koog Rüzgar test alanında denendi; çarkın herhangi bir dişli çarkı yoktu ve düşük çark hızı gürültüyü azalttı. (Paraschivoiu 2002)

Darrieus kavisli kanat çarkı esas itibarıyla Kuzey Amerika'da Kanada Ulusal Araştırma Konseyi gibi enstitüler ve A.B.D de FloWind Corp ve Vawt Power gibi şirketler ve Kanada'da Indal Technologies Inc., Lavalin Inc. ve Adecon Inc gibi şirketler tarafından geliştirildi ve ticari hale getirildi.

Sandia Ulusal Laboratuvarları kavisli kanatlı Darrieus Çarklarının araştırma ve geliştirilmesi için önemli bir gayret harcadı. Böylece 1974'de, SNL 5m çapında bir araştırma amaçlı DERT'i kurdu. 1977'de 17m çapında 60 kW gücünde bir Darrieus çarkı bunu takip etti (Weingarten ve Blackwell 1976, Akins 1989).

Daha büyük ve daha verimli ticari Darrieus DERT'lerin geliştirilmesinde önemli bir adım atılmış ve 625 kW gücünde, 34 metrelik bir düşey eksenli rüzgar türbini Sandia tarafından 1987 de kurulmuş ve çalıştırılmıştır. Sandia 34 metrelik türbini, orijinal olarak tasarlanmış ilk kavisli kanatlı Darrieus türbin çarkı olup değişken kanat kesiti profilini kullanarak ve kanat profil kesiti özel olarak DERT için tasarlanarak kademeli olarak incelen kanatlarla birleştirilmiştir (Şekil 4.1). Bu çarkın ekvator ve geçiş kesitleri SAND 0018-50 kanat profil kesiti kullanmakta fakat uç kısımları NACA 0021 profilindedir (Ashwill 1991).



Şekil 4.1 Darrieus rüzgar çarkı (DOE/SANDIA 34-m) (Paraschivoiu 2002)

Test yataklarının biçimleri rüzgar türbinlerinin temel fiziğini incelemek için çabuk ve kolayca değişebilecek şekilde tasarlanmıştır. Örneğin, Sandia 34 metrelik test yatağı değişken hızlı tahrik sistemiyle donatılmış olup diğer şeylerin içinde yeni kanat profillerinin ve kanat şekillerinin geniş bir Reynolds sayısı aralığında yapmayı sağlasın (Berg 1985)

Mayıs 1977 de Kanadalılar 230 kW lık ilk büyük ölçekli Darrieus türbinini yaptıklarında, Magdalen Adalarındaki ortalama tahmini çıkış gücü 100 kW idi. Beklenmedik bir frensiz ilk çalışmada bu prototip hasar gördü ve benzer bir DERT 1978 de kuruldu. Bu türbin 29.4 d/d da çalışması durumunda performans test verileri geniş ölçekli Darrieus türbinlerinin ilk saha verileri olarak elde edildi (David 1994).

Yüksek rüzgar işletmesi 15 m/s ile sınırlı olduğundan 36.6 d/d da çalışma için tam bir veri seti elde edilemedi. Dinamik boğulma etkisi performans belirleme modellerinde var olmadığından ve modeller tarafından en büyük güç çıkışı ciddi olarak düşük tahmin edildiği için, bu türbinden elde edilen performans verileri Indal 6400-500 kW lık türbin tasarımı için önemli bir faktör oldu (Ashwill ve Leonard 1986).

Sandia'nın teknik yol göstermesi ve Enerji Dairesinin fon desteği altında Alcoa dört adet 17 metrelik 100 kW lık üniteler kurdu. Bunlardan ikisi şebekeye bağlandı. Bunlardan biriside 120 mil/saat lik hızları aşan fırtınalarda 10000 saatin üzerinde başarılı olarak test edildi. Sandia Ulusal Laboratuvarı (SNL)'nin performans testleri, 2 , 5, 17 ve 34 m lik araştırma türbinleri ile yapıldı ve performans verilerinin, sonuçları teorik tahminlerin karşılaştırılması ile elde edilmiştir. SNL, DERT ler için olanlarda dahil olmak üzere diğer verilerle karşılaştırmaları kolaylaştırmak için rutin olarak testleri sunulmuş ve verileri düzenlemiştir (WEB_2 2006).

Günümüze kadar yapılan Darrieus rüzgar türbini için ölçülen en büyük güç çıkışı Lavalin Eole (64m) araştırma türbinindedir (Richards 1987). 1986 da Canada Quebec Cap Chat da inşa edilmiştir. Eole, 2 kanatlı NACA 0018 profilli çark olup sırasıyla 10 ve 11,35 d/d lık sabit dönme hızlarında çalıştırılmıştır. Maksimum güç çıkışı 11.35 d/d da 14,7 m/s lik hızda 1,3 MW ın üzerindedir. Eole türbini 17 m/s lik hızda takriben 3,6 MW lık maksimum bir güce erişecek şekilde ve 16,3 d/d lık bir çark hızına kadar

değişken bir hız aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Sonra daha yüksek rüzgar hızlarında çark hızı azaltılarak sabit tutulmuştur (Richards 1988). Bununla beraber, yorulma ömrü belirlemeleri şunu gösterdi ki, enerji satın alma anlaşmasının 5 yıllık bir sürede başarılı olarak sürdürülebilmesi için türbin 15 m/s rüzgar hızı ile (takriben 2MW lık maksimum güç çıkışı) 13.25 d/d lık nominal bir çalışma hızıyla ile sınırlandırılması öngörülmüştür.

FloWind Amerika Birleşik Devletleri Tesislerinde rüzgardan üretilen elektriği sağlamada bir lider olup 1982 den 1997 ye kadar tasarımlar yaptı, imal etti ve rüzgar türbinlerini çalıştırdı. 51.8 d/d da çalışan ve takriben 20 m/s lik bir rüzgar hızında 250 kW üreten iki kanatlı NACA 0015 kullanarak DERT FloWind 19 m lik rüzgar türbinini geliştirdiler (Solt 1992).

Bu tecrübeye dayanarak FloWind arttırılmış yükseklik çap oranı (AYÇO) ile yeni nesil ileri bir düşey eksenli rüzgar türbinini geliştirilmiştir. Bu sınıf ileri DERT'ler, verilen herhangi bir rüzgar alanından elde edilen enerji üretimini maksimum kılmaktadır. Bu durumda aerodinamik verim; dalgalanma kaybı ve süpürme alanı arasında optimum bir denge, çark yüksekliği ve çapı değiştirilerek elde edilir. Örneğin, 3 kanatlı FloWind AYÇO 17 metrelik rüzgar türbini ile bir laminer SNLA 0021/50 lik bir kanat profili kullanarak 16 m/s lik bir rüzgar hızında 51.8 d/d lık bir çalışmada 175 kW lık bir enerji üretmiştir (Paraschivoiu 2002)

4.1. Kanat Profili Geometrisi ve Aerodinamik Karakteristikler

Tipi ne olursa olsun (yatay veya düşey eksenli makine) rüzgar makinelerinin esas elemanı, kanatlardır. Optimum kanat şekli ve boyutları ile kanat hareketlerinin anlaşılması için bazı aerodinamik akış özelliklerinin bilinmesi gerekir. Betz formülü kanat tasarımı ile ilgili bir yöntemi vermez. (Le Gourieres 1982)

Bundan dolayı akış özelliklerini belirleyebilmek için hareketsiz kanat profili üzerinde rüzgarın vektörel hızı \vec{V} nin etkisi göz önüne alınır. Kanat profili kesitinin paralel kabul edilen hız vektörü \vec{V} ye göre, kanadın geometrisi ve konumu ile ilgili bazı tanımlar verelim.

Şekil 4.2 de bir kanat profili şekli gösterilmiştir. Burada, profilin keskin ucuna (B noktası) kanat arka ucu, öndeki diğer uca ise kanat ön ucu (A noktası) olarak isimlendirilir.

a) Tanımlar:

$AB = c$ Profil giriş uzunluğu,

AMB, Kanat üst yüzeyi,

ANB, Kanat alt yüzeyidir.

α , Hücüm açısı (veya Duruş açısı); giriş eksenini ile hız vektörü (\vec{V}) arasında kalan açıdır.

ε Kaldırma açısı olarak isimlendirilir.

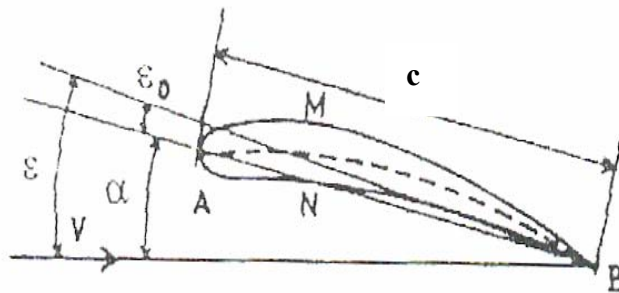
Sıfır kaldırma açısı ε_0 giriş ile sıfır kaldırma hattı arasındaki açıdır.

Kaldırma açısı ε ,sıfır kaldırma hattı ile hava hız vektörü (\vec{V}) arasındaki açıdır.

$$\alpha = \varepsilon - \varepsilon_0$$

$$\varepsilon = \alpha + \varepsilon_0$$

Burada, ε_0 negatif , α ve ε pozitifdir.

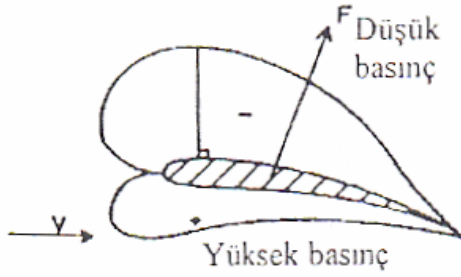


Şekil 4.2 Kanat geometrisi

b) Atmosferde hareketli bir kanat üzerine uygulanan aerodinamik kuvvet

Kanat profilinin şekline ve hücüm açısına bağlı olarak profilin çevresinde basınç dağılımı oluşur. Bu dağılım düzgün değildir. Genellikle profilin üst tarafında düşük

basınç, alt tarafında ise yüksek basınç şeklinde olduğu ifade edilirse de basınç alanını her şeyden önce hücum açısı α ve profilin şekli ile tayin edilir (Le Gourieres 1982).



Şekil 4.3 Kanat profilindeki basınç alanları

Bu basınç farkından dolayı sonuç olarak kanat üzerinde bir kuvvet oluşur ve akış doğrultusuna veya kanadın hareket doğrultusuna dik yönde kanada etki eden bu kuvvete kaldırma kuvveti denir. Şekil 4.3’de kanat profilindeki basınç alanları gösterilmektedir.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_r \cdot S \cdot V^2 \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada;

ρ : havanın yoğunluğu

S : Alan = Kanat giriş uzunluğu (c) x kanat boyu

C_r : Toplam aerodinamik katsayıdır.

Bu kuvvet iki bileşene ayrılır.

Birincisi hız vektörüne (\vec{V}) paralel, sürüklenme (veya direnç) kuvveti (\vec{F}_d)

İkincisi ise hız vektörüne (\vec{V}) dik, kaldırma kuvveti (\vec{F}_l) dir.

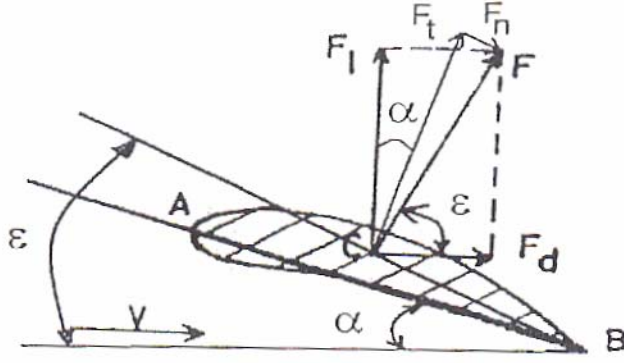
\vec{F}_d ve \vec{F}_l değerleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir;

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S \cdot V^2 \quad (4.2)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho \cdot C_l \cdot S \cdot V^2 \quad (4.3)$$

Burada, C_d ve C_l sırasıyla sürüklenme (itme) ve kaldırma katsayılarıdır. Buradan bileşke kuvvet şu şekilde yazılabilir.

$$F_d^2 + F_l^2 = F^2 \quad (4.4)$$



Şekil 4.4 Kaldırma kuvveti ve bileşenleri

Şekil 4.4 de kanada kirişine paralel kuvvet F_n ve dik kuvvet F_t şu şekilde yazılabilir.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 (C_d \cdot \cos \alpha - C_l \cdot \sin \alpha) \quad (4.5)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 (C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha) \quad (4.6)$$

yukarıdaki denklemlerde:

$$C_t = (C_d \cdot \cos \alpha - C_l \cdot \sin \alpha) \quad (4.7)$$

$$C_n = (C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha) \quad (4.8)$$

şeklindedir (Paraschivoiu 2002).

C_l ve C_n sırasıysa normal ve teğetsel kuvvet katsayılarıdır.

Buradan, toplam aerodinamik katsayı C_r şu şekilde yazılabilir.

$$C_d^2 + C_l^2 = C_r^2 \quad (4.9)$$

Ayrıca Şekil 4.4 de ε kayma açısı, $\tan \varepsilon$ kayma sayısı olarak isimlendirilir.

$$\tan \varepsilon = \frac{F_t}{F_d} \quad (4.10)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{C_t}{C_d} \quad (4.11)$$

Burada; $\tan \varepsilon$, seçilen profilin kaldırma kuvveti katsayısının C_l 'nin sürüklenme kuvveti katsayısı C_d 'ye oranı olarak tanımlanmaktadır. C noktası ise basınç noktasıdır, basınç noktası duruş açısına (α) bağlıdır.

α artarsa basınç noktası C, A'ya yaklaşır.

α azalırsa basınç noktası C, A'dan uzaklaşır.

(Le Gourieres 1982, Şevik 2002).

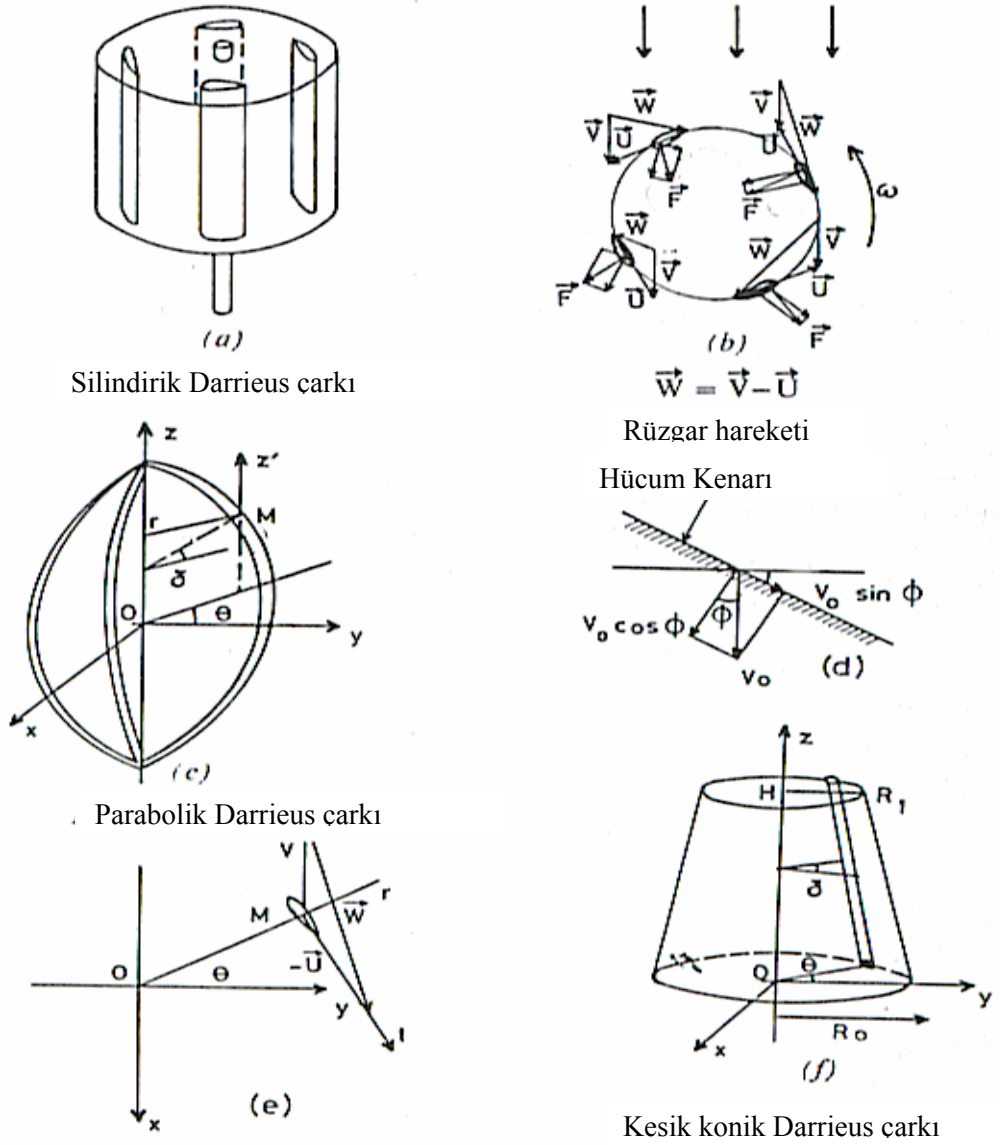
4.1.1. Darrieus çarkı aerodinamik hesaplamaları

Kanada Ulusal Havacılık Araştırma Merkezi Başkanı R.J.Templin tarafından parabolik Darrieus çarkı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları dikey ve küresel Darrieus çarklarına uygulanmıştır (Le Gourieres 1982).

Kanat elemanı kirişinin yönünde ve karşılıklı olarak bu kirişe ve hücum kenarına dik izafi hız W nin bileşenlerini hesaplayalım.(Şekil 4.5c-4.5e)

Hücum kenarı ile açı yapacak şekilde konumlanmış kanat için, kaldırma değeri hücum kenarına dik bileşene bağlıdır. Bu bileşen $V_0 \cos \phi$ dir. Geliş açısı bileşenlerin yönleri ile tanımlanır, ancak hücum kenarına paralel $V_0 \sin \phi$ bileşeninin bir etkisi yoktur (Şekil 4.5.d).

O_{xyz} eksenine sabitlenmiş ve aynı zamanda O_z düşey eksenini etrafında dönen bir Darrieus türbin çarkı düşünülürse, çarkı geçen rüzgarın mutlak hızı V , yönü ise O_x 'e paraleldir (Şekil 4.5.c).



Şekil 4.5 Değişik Darrieus çarkları (Le Gourieres 1982)

M noktasından merkezlenmiş, ds uzunluğunda ve c kiriş boyunda bir kanat elemanı düşünülmüş (Şekil 4.5.e). Bu şekildeki r kanat elemanının dönme eksenine olan uzaklığı; θ , O_{yz} düzlemi ile dönme eksenini kapsayan dikey düzlem arasındaki açı, δ kanat elemanı ile yatay düzlem arasındaki açıdır.

O merkezli $2H$ yüksekliğindeki parabolik bir çark için,

$$\frac{r}{R} = 1 - \frac{z^2}{H^2} \quad (4.12)$$

$$\delta = \tan^{-1} (2zR/H^2) \quad (4.13)$$

Dikdörtgen düşey kanatlı bir silindirik çark için,

$$r = R \quad \text{ve} \quad \delta = 0 \quad (4.14)$$

Kesik koni biçimindeki çark için,

$$r = R_0 - \frac{(R_0 - R_1)z}{H} \quad (4.15)$$

$$\delta = \tan^{-1}((R_0 - R_1)/H) \quad (4.16)$$

bağıntıları elde edilir (Le Gourieres 1982, Dombaycı 2001).

Kanada etki eden akış doğrultusunda rüzgar hızı V , iki bileşenden meydana gelir.

Bunlar; bağıl hız \vec{W} ve çevresel hız $\vec{U} = \omega \cdot \vec{r}$ dir. Relatif hız W , teğetsel hız U ve mutlak rüzgar hızı V ye bağlıdır. Buna göre relatif hız,

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (4.17)$$

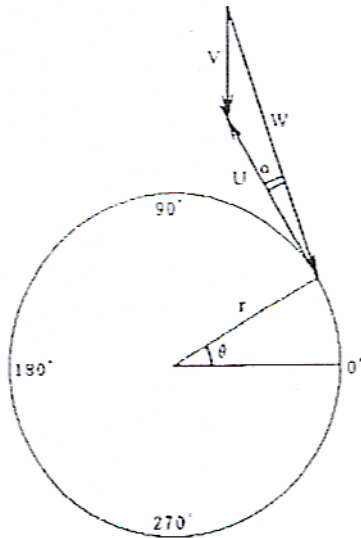
yazılabilir. Şekil 4.6'da kanada etki eden rüzgar hızının bileşenleri gösterilmektedir.

Vektörel hız \vec{W} , iki yatay vektörel hızın toplamıdır ve kendisinde yataydır. Bunlar;

$$W_r = V \cdot \sin \theta \quad (4.18)$$

$$W_t = U + V \cdot \cos \theta \quad (4.19)$$

$$W_z = 0 \quad (4.20)$$



Şekil 4.6 Kanada etki eden rüzgar hızının bileşenleri

Diğer bir deyişle;

$$W = U + V \cdot \cos \theta = r \cdot \omega + V \cdot \cos \theta \quad (4.21)$$

W hızı kanatın maruz kaldığı kuvvetleri belirlemede kullanılır. Burada;

$W^2 = W_t^2 + W_r^2$ denkleminde bileşenler yerine yazılırsa,

$$W^2 = (r \cdot \omega + V \cdot \cos \theta)^2 + V^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \delta \quad (4.22)$$

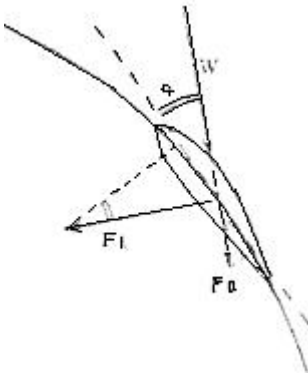
Buradan, α hücum açısı çekilirse;

$$\tan \alpha = \frac{W_r}{W_t} = \frac{V \cdot \sin \theta \cdot \cos \delta}{r \cdot \omega + V \cdot \cos \theta} \quad (4.23)$$

Kanat elemanlarına etki eden kuvvet bileşenleri değerlendirilirse; Şekil 4.7'den,

$$F_l = \frac{1}{2} \rho \cdot C_l \cdot S \cdot W^2 \quad (4.24)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S \cdot W^2 \quad (4.25)$$



Şekil 4.7 W hızı ve kuvvet bileşenleri

Yukarıdaki eşitliklerden, normal ve teğetsel kuvvetlerdeki değişim için şu ifadeler yazılabilir (Paraschivoiu 2002).

$$dN = C_n \cdot q \cdot c \cdot \frac{dz}{\cos \delta} \quad (4.26)$$

$$dT = C_t \cdot q \cdot c \cdot \frac{dz}{\cos \delta} \quad (4.27)$$

yukarıdaki eşitliklerde $dz = ds \cdot \cos \delta$ ile verilir ve q , dinamik basınçtır.

$$q = \frac{1}{2} \rho \cdot W^2 \quad (4.28)$$

Burada, C_n ve C_t sırasıyla, kirişe paralel ve dik aerodinamik katsayılarıdır.

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

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

bileşke kuvvet yazılırsa,

$$\begin{aligned} dF &= dN \cdot \cos \delta \cdot \sin \theta - dT \cos \theta \\ &= q \cdot c \cdot (C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta}) dz \end{aligned} \quad (4.29)$$

Her bir kanat için elementer kuvvet, kanat döndükçe değişir. Bundan dolayı esas değeri hesaplamak gerekir.

Verilen koşullar ve hipotezler rüzgar çarkının kiriş uzunluğunu sabit kılar ve bir bütün olarak türbin çarkı üzerine uygulanan rüzgarın yönündeki kuvvet aşağıdaki denklemlerle verilmiştir (Le Gouieres 1982).

$$F = \frac{b \cdot c}{2 \cdot \pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} q (C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta}) d\theta dz \quad (4.30)$$

- Moment ve güç için ifadelerin türetimi

Dönme eksenini etrafında kanat elemanı üzerine uygulanan aerodinamik kuvvetin momenti aşağıdaki gibi yazılır (Le Gouieres 1982).

$$dM = \frac{C_t q c}{\cos \delta} \cdot r dz \quad (4.31)$$

tüm çark için moment ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$M = \frac{b \cdot c}{2 \cdot \pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} \frac{C_t q r}{\cos \delta} d\theta dz \quad (4.32)$$

Böylece güç ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

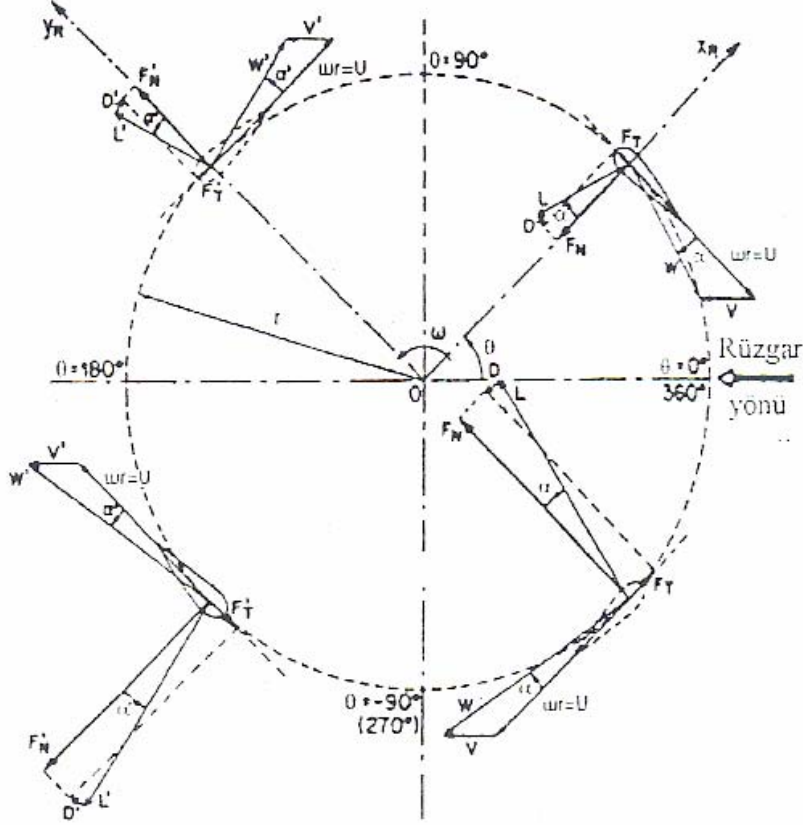
$$P = M \vec{\omega} = \frac{b \cdot c}{2 \cdot \pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} \frac{C_t q r \omega}{\cos \delta} d\theta dz \quad (4.33)$$

Yukarıdaki ifade yalnız başına alındığında bir V_1 rüzgar hızında bir çarkın performansını belirlemeye müsaade etmez. Bunu elde etmek için Betz teorisini kullanmak gerekir.

$$F = \rho \cdot S \cdot V (V_1 - V_2) \quad (4.34)$$

Burada, $V_2 = k \cdot V_1$ şeklinde alınırsa, çark boyunca hız için verilen bağıntı yazılabilir.

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) = V_1 \frac{(1+k)}{2} \quad (4.35)$$



Şekil 4.8 Dönen kanatlar için değişik pozisyonlardaki rüzgar ve kuvvet bileşenleri

Şekil 4.8'de dönen kanatlar için değişik pozisyonlardaki rüzgar ve kuvvet bileşenleri gösterilmektedir.

Böylece F ifadesi aşağıdaki şekli alır:

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^2 (1 - k^2) = 2 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \frac{1-k}{1+k} \quad (4.36a)$$

Yukarıdaki ifade, 30 nolu ifade ile eşitlenirse,

$$2 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \frac{1-k}{1+k} = \frac{b \cdot c}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2H} q \left(C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \right) d\theta dz$$

Dinamik basınç $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_u^2$, yerine yazılırsa yeni ifade,

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{b.c}{8\pi S} \int_0^\pi \frac{W_u^2}{V^2} \left(C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \right) d\theta dz \quad (4.36b)$$

Burada:

$$\frac{W_u^2}{V^2} = \left(\frac{r\omega}{V} + \cos \theta \right)^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \delta \quad (4.37)$$

$\frac{\omega r}{V} = \frac{r}{R} \frac{\omega R}{V}$ olduğundan, aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\frac{W_u^2}{V^2} \left(\frac{\omega R}{V} \frac{r}{R} \cos \theta \right)^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \delta \quad (4.37)$$

Benzer şekilde:

$$\tan \alpha = \frac{\sin \theta}{\frac{\omega R}{V} \frac{r}{R} + \cos \theta} \quad (4.38)$$

Böylece, verilen $R\omega/V$ oranı için, G ve k sabitlerini hesaplamak mümkündür.

$$k = \frac{1-G}{1+G} \quad (4.39)$$

k katsayısının bulunması ile, uç hız oranı λ bulunabilir.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1} = \frac{\omega R}{V} \left(\frac{1+k}{2} \right) = \frac{\omega R}{V(1+G)} \quad (4.40)$$

- Güç ve moment katsayıları

Güç katsayısı C_p aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Le Gourieres 1982).

$$C_p = \frac{2.P}{\rho.S.V_1^3} = \frac{b.c}{2.\pi.S} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} C_t \frac{W_u^2}{V_1^3} \frac{\omega r}{\cos \delta} d\theta dz \quad (4.41)$$

formül düzenlenirse,

$$\frac{W_u^2}{V_1^3} \omega r = \frac{W_u^2}{8V^2} \frac{\omega R}{V} \frac{r}{R} (1+k)^3 \quad (4.42)$$

Bu denklemi kullanarak C_p ; $r\omega/V$ nin çeşitli değerlerini kullanarak hesaplanabilir.

$r\omega/V$ nin her bir değeri için karşılık bir λ değeri vardır, bundan dolayı C_p eğrisini λ hız oranının bir fonksiyonu olarak çizmek zor değildir.

Moment katsayısı ile güç katsayısı arasında aşağıdaki denklemde olduğu gibi bir bağıntı mevcuttur.

$$C_p = C_m \cdot \lambda \quad (4.43)$$

böylece güç katsayısını bilmek demek otomatik olarak moment katsayısını da içeriyor demektir. Bu, düşey eksenli çark için aşağıdaki ifade ile belirlenir.

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2P}{\rho \cdot S \cdot V_1^3} \frac{V_1}{\omega R} = \frac{2M}{\rho \cdot S \cdot V_1^2} \quad (4.44)$$

şeklinde yazılabilir. (Le Gourieres 1982)

Sonuç olarak türbinden elde edilecek güç, kayıplar da dikkate alındığında, Denklem (4.41) den;

$$P = \eta_{kay} \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (4.45)$$

ifadesi elde edilir. Buradan η_{kay} , toplam kayıpları ifade eder, bu kayıplar ise yataklardaki sürtünme kayıpları, dişli kutusu ve mekanik kayıplar ile çeşitli elektrik – elektronik kayıpları ifade eder (Şevik 2002).

Ottawa’da, J.Templin tarafından iki ve üç kanatlı parabolik Darrieus çarkları üzerinde testler ve matematik modeller çalışılmıştır. Maksimum güç yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir (Le Gourieres 1982).

$$P=0,25 \cdot S \cdot V^3 \quad (4.46)$$

$$S = \frac{8}{3} \cdot R \cdot H \quad (4.47)$$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{60 \cdot V} \quad (4.48)$$

Güç, uç hız oranı λ ile ilişkilidir ve λ aşağıdaki gibi ifade edilir (Templin 1974).

$$\lambda^2 = \frac{5 \cdot R}{b \cdot c} \quad (4.49)$$

ise, buradan c çekilirse denklem (4.50) elde edilir.

$$c = \frac{5 \cdot R}{b \cdot \lambda^2} \quad (4.50)$$

Burada ;

R: Çarkın yarıçapı (m)

b : Çarkın kanat sayısı

c: Kanat giriş uzunluğu (m)

H : Çarkın yarı yüksekliği (m) dir.

4.2. Darrieus Çarkının Tasarım Yöntemleri ve Geometrileri

Darrieus çark performansı üzerinde kanat geometrilerinin tesiri hiçbir zaman ayrıntılı olarak incelenmedi ve basitlik nedeniyle mevcut modellerin geniş bir kategorisi kanatların quadratik bir parabol şekline sahip olduğunu göz önüne alır.

Parametrik bir analiz; parabolik, zincir eğrisi (catenary), Troposkien ($G \neq 0$ yerçekimi etkisiyle), değiştirilmiş Troposkien ($G=0$ yerçekimi ihmal ediliyor), ve Sandia (düz hatlı/dairesel yay) tiplerinde olduğu gibi bir çok kanat geometrisi için aerodinamik performanslarının karşılaştırılmasını sağlar (Paraschivoiu 2002). Çark kanatlarının şekli bir santrifüj kuvvet alanında veya değiştirilmiş Troposkien şekli ($G=0$); çark kanatlarının biçimi bir parabolik, bir zincir eğrisi (catenary) ve Troposkien yaklaşımı ($G \neq 0$) ve Sandia biçimi ile karşılaştırılmıştır.

Aynı maksimum çap/yükseklik oranı ($\beta=0.984$) için her bir geometri ideal Troposkien biçimiyle karşılaştırılmış. Bu bölümün sonunda, farklı çark biçimleri incelenmiş ve yerçekimi etkisinin ihmal edildiği dönen kanatların en uygun yaklaşımının Sandia biçimi olduğu görülmüştür.

Küçük Darrieus çarkları veya çıkış gücü 100 kW dan az olan çarklar için tam dönme durumunda, kanatların dönmesiyle oluşan santrifüj kuvvet ile karşılaştırıldığında yerçekimi kuvvetinin etkisi ihmal edilmiştir. Bununla beraber, yerçekimi etkisi büyük çark boyutlarında önemlidir ve tasarım hesaplarında göz önüne alınmıştır.

Düşey eksenli çarkın düzlemsel geometrileri doğru kanatlı silindirik biçimleri de içerir, aerodinamik performanslar üzerindeki eğri kanatlara göre bazı üstünlükleri vardır. Fakat bu da büyük bir eğilme momenti etkisi yapar. Düz kanatlı çark verilen bir performans için türbin ölçütlerini kabul edilebilir bir değere düşürecek şekilde müsaade eder. Bu düz kanatlı çark biçimi en basit geometriyi gösterir ve böylece yapım maliyetlerini düşürür. Düşük rüzgar hızı koşulları ve küçük çark boyutları için bu çark konstrüksiyonu tavsiye edilir.

Rüzgar türbinlerinin süpürme alanı önemli bir değişkendir. Gerçekte kanat maliyeti, artan uzunlukla değişir ve güç çıkışı büyük süpürme alanıyla artar. O zaman kanat uzunluğuna göre süpürme alanının oranını maksimum kılınması amaçlanır. Çap/yükseklik oranının $\beta=R/H =0.984$ için (Troposkien de) bir maksimum değer meydana geldiği görülmüştür. Fakat daha önemli tasarım seçenekleri de vardır; örneğin daha düşük β oranına sahip Flowind 17m lik türbinde olduğu gibi tahrik mekanizmasının maliyetlerini düşürür (Solt 1992). Böylece verilen süpürme alanı için daha yüksek dönme hızı ve daha düşük moment sağlanır.

Bu bölümde Darrieus çarkı için tüm geometrik parametreler aynı zamanda ekvatordaki eğrilik yarıçapları, kanat uzunluğu, çark süpürme alanı, yerçekiminin kanat merkezindeki yeri belirlendi. Darrieus çarkı incelemesinin esas amacı kanat biçiminin ve çap/yükseklik oranının bir fonksiyonu olarak kanadın her bir kesitindeki gerilme kuvvetini ifade etmektir ve maksimum gerilme kuvveti için bir analitik bağıntıyı belirlemektir. Bu çalışmayı takiben Sandia biçimi (doğru hat/dairesel yay) göz önüne alınarak pratik bir geometri incelendi. Parabolik Darrieus çarkını göz önüne alan bazı teorik çalışmalarda, çarkın ekvator kısmının takriben %60 nın, momentin hemen hemen %95 ini ürettiği görülür (Blackwell vd 1977, 1980). Bununla beraber, kanatlar aerodinamik kesitleri gerektirir ki buda artan direnci ve azalan makine performansını engeller.

4.2.1. Zincir eğrisi (catenary) kanat geometrisi

Bir zincir eğrisi (catenary) kanat şekli, yerçekimi kuvveti etkisi altında uçları A ve B iki noktasından bağlanması ile düzgün yoğunluklu ve kesit alanlı mükemmel esnek bir kablo şeklinde oluştuğu, kabul edilmiştir (Şekil 4.9). Denge difransiyel denklemi vektör şeklinde verilmiş olup aşağıdaki gibi ifade edilir : (Paraschivoiu 2002)

$$\frac{d\vec{T}}{ds} + \vec{p} = 0 \quad (4.51)$$

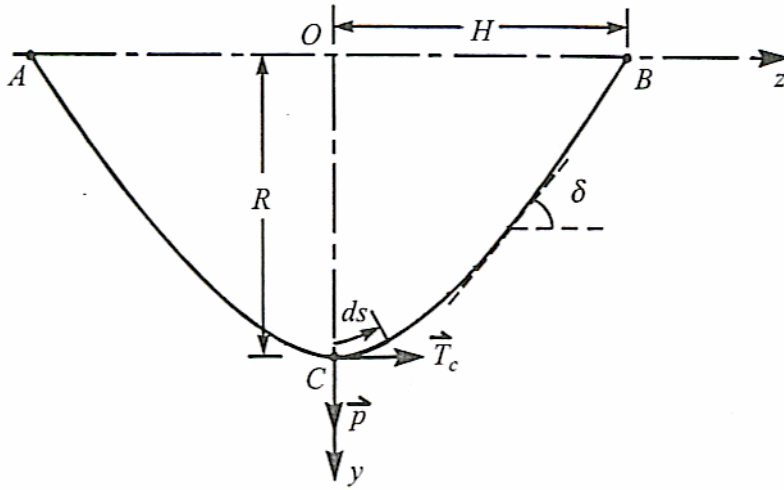
buradaki birinci terim $(d\vec{T}/ds)$ gerilimin türevini, yay uzunluğu ds ve \vec{p} birim uzunluk yüküne (örneğin kablunun ağırlığı, rüzgar kuvvetleri, harici ağırlık, buz, kirlilik , vb. dış ağırlıklar) bağlı olarak gösterir.

(4.51) nolu denklemin y - ve z - yönündeki bileşenleri aşağıdaki şekli alır:

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) + p = 0$$

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dz}{ds} \right) = 0 \quad (4.52)$$

burada $ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2} dz$



Şekil 4.9 Zincir geometrisi (catenary) kanat şekli (Paraschivoiu 2002)

(4.52) nolu denklemde T gerilme kuvvetini yok edersek , buradan:

$K = \text{sabit alınarak}; \quad K \frac{d}{ds} \left(\frac{dy}{dz} \right) = -p \quad \text{ile}$

veya

$$\frac{\left(\frac{d^2 y}{dz^2} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2}} = -\frac{p}{K} \quad (4.53)$$

$a = p/K$ şeklinde tanımlayıp ve $dy/dz = \sinh u$ değişkenini kullanarak , (4.53) nolu denklemin integre edilmesiyle aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$u = -az + C_1$$

$$\frac{dy}{dz} = \sinh(-az + C_1)$$

$$y = -a \cosh(-z/a + C_1) + C_2 \quad (4.54)$$

$z = 0$ için ve $dy/dz = 0$ ve $z = H$ için $y = 0$ sınır koşullarını kullanarak İntegrasyon sabitleri

$C_1 = 0$ ve $C_2 = a \cosh(H/a)$ olarak belirlenebilir. Böylece, zincir eğrisi (catenary) geometrisi için denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\eta = 2(\zeta_0 / \beta) \sinh[(1 + \zeta) / 2\zeta_0] \sinh[(1 - \zeta) / 2\zeta_0] \quad (4.55)$$

burada $\zeta = z/H$, $\zeta_0 = a/H$ ve $\eta = y/R$.

$\eta = 1$ koşuluyla ve (4.55) denklemin de $\zeta = 0$ konursa, ζ_0 sabitinin değerini çap/yükseklik oranının, ($\beta = R/H$.) bir fonksiyonu olarak, belirlenebilir.

$$\beta = \zeta_0 [\cosh(1/\zeta_0) - 1] \quad (4.56)$$

β nın bilinen bir değeri için, ζ_0 değeri (4.56) denkleminde hesaplanır. Bir catenary kanat biçiminin ekvatorundaki eğrilik yarıçapı aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$r_E = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right]^{3/2}}{\left(\frac{d^2y}{dz^2}\right)} = \frac{[\cosh^3(\zeta/\zeta_0)]}{\left[\frac{1}{\zeta_0 H} \cosh(\zeta/\zeta_0)\right]} \quad (4.57)$$

$z = 0$ için, $r_c = r_E$ olur ve böylece

$$|r_E| = a = \zeta_0 H, \quad \text{ve} \quad |r_E| = R = \zeta_0 / \beta \quad (4.58)$$

zincir geometrisi (catenary) kanadının uzunluğu aşağıdaki gibi ifade edilmiştir :

$$\ell = 2 \int_0^1 ds = 2\zeta_0 H \sinh(1/\zeta_0) \quad (4.59)$$

veya boyutsuz şekilde ifade edilirse :

$$\ell / 2H = (a/H) \sinh(H/a) = \zeta_0 \sinh(1/\zeta_0) \quad (4.60)$$

Bir zincir eğrisi (catenary) kanat şekli için çark süpürme alanı; simetri eksenini düşey eksen olarak alınırsa aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$S = 4 \int_0^H y(z) dz = 4\zeta_0 H^2 [\cosh(1/\zeta_0) - \zeta_0 \sinh(1/\zeta_0)] \quad (4.61)$$

boyutsuz şekilde ifade edilirse aşağıdaki şekli alır :

$$S/\ell^2 = \frac{[(1/\zeta_0)\cosh(1/\zeta_0) - \sinh(1/\zeta_0)]}{\sinh^2(1/\zeta_0)} \quad (4.62)$$

(4.62) ifadesi optimum (S/ℓ^2) oranını hesabını $\beta = 0.99128$ ile ilgili olarak (ℓ/ζ_0) 'ın bir fonksiyonu olarak hesaplamamızı sağlar. Her bir kanadı bir catenary şeklinde olan bir Darrieus çarkı için, maksimum süpürme alanı (verilen bir kanat uzunluğu için) çap/yükseklik oranının bir olduğu durumda meydana gelir.

Homojen bir zincir eğrisi (catenary) kanadının ağırlık merkezi, eksenlerin orjinine göre Oy - eksenini üzerinde bir y_G mesafesinde bulunur.

$$\frac{y_G}{R} = \frac{\left[\frac{\sinh(2/\zeta_0) - 2/\zeta_0}{4 \sinh(1/\zeta_0)} \right]}{[\cosh(1/\zeta_0) - 1]} \quad (4.63)$$

Meridyen açısı δ (şekil 4.9) aşağıdaki denklemden bulunur.

$$\delta = \tan^{-1}[\sinh(\zeta/\zeta_0)] \quad (4.64)$$

Maksimum yer değiştirmenin olduğu kesitteki gerilme aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$T_0 = \sigma H \zeta_0 \quad (4.65)$$

buradaki σ birim uzunluktaki kablunun kütleliğini gösterir. Eğer $G = \sigma g \ell$ kanadın ağırlığı ise buradan aşağıdaki gibi ifade edilir: (Paraschivoiu 2002)

$$G/T_0 = 2 \sinh(1/\zeta_0) \quad (4.66)$$

4.2.2 Parabolik kanat geometrisi

Parabolik kanat şekli Şekil 4.9'daki zincir geometrisi (catenary) şeklinden, $T_c \gg p$ gerilmesi kabul edilerek elde edilebilir. Böyle bir durumda $T_c / p = a$ değeri çok büyük, böylece $\cosh(z/a)$ Taylor serisine göre açılım yapılırsa: (Paraschivoiu 2002)

$$\cos(z/a) = 1 + \frac{1}{2!}(z/a)^2 + \frac{1}{4!}(z/4a)^2 + \dots \quad (4.67)$$

ve ilk iki terim alınarak (4.55) denklemiyle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y \cong R - \frac{z^2}{2a^2} \quad (4.68)$$

(4.68) denklemi A noktasında $z_A = H, y_A = 0$ için sınır koşullarını sağlar ve boyutsuz biçimde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta = 1 - \zeta^2, \quad \zeta \in [-1, 1] \quad (4.69)$$

bu da quadratic (ikinci dereceden) bir parabolü gösterir.

Ekvatordaki eğrilik yarıçapı (4.57) denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{|r_E|}{R} = \frac{1}{2\beta^2} \quad (4.70)$$

Parabolik kanadın uzunluğu boyutsuz olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\ell}{2H} = \left[\sqrt{1 + 4\beta^2} + (1/2\beta) \ln \left(2\beta + \sqrt{1 + 4\beta^2} \right) \right] \quad (4.71)$$

ve parabolik kanatlı çarkın süpürme alanı aşağıdaki gibidir.

$$S/(4HR) = 2/3 \quad (4.72)$$

Çarkın optimum süpürme alanı $\beta=0.973$ değeriyle ilgili olarak S/ℓ^2 oranıyla verilir.

Quadratik parabolün ağırlık merkezi aşağıdaki şekilde verilir.

$$\frac{y_G}{R} = 1 - \frac{h_a}{h_b} \quad (4.73)$$

burada

$$h_a = h^{3/2} - \frac{h^{1/2}}{8\beta^2} - \frac{1}{32\beta^4} \ln \left(\frac{1 + h^{1/2}}{2h/R} \right) \quad (4.74)$$

$$h = 1 + 1/4\beta^2 \quad \text{ve} \quad h_b = \frac{2}{\beta} \cdot \frac{1}{2H}$$

değerleri ile kanadın meridyen açısı δ aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta\zeta) \quad (4.75)$$

4.2.3 Troposkien kanat geometrisi (G=0)

İdeal Troposkien şekli, (şekil 4.10) da görüldüğü gibi, merkezkaç kuvvetlerin etkisi altında sabit bir açısal hızla düşey bir eksen etrafında dönen düzgün yoğunluk ve kesit alanındaki mükemmel bir esnek kablo şeklinde düşünülebilir. Troposkien eğrisinin denklemleri, dönmeden dolayı merkezkaç kuvvetlerine göre, yerçekimi kuvvetlerini ihmal eden (G=0) ve kanat üzerinde sadece gerilmeyi göz önüne alarak geliştirilmiştir. (Blackwell vd 1977, 1980).

Bir ds kanat elemanı üzerindeki kuvvetlerin dinamik dengesi için denklem aşağıdaki gibi yazılabilir (Paraschivoiu 2002).

$$\frac{d\vec{T}}{ds} + \vec{p} + d\vec{F}_c = 0 \quad (4.76)$$

Oy ve Oz eksenleri ile scaler biçimde ifade edilirse,

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) + \sigma \omega^2 y ds = 0$$

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dz}{ds} \right) - g \sigma ds = 0 \quad (4.77)$$

burada

ω = sabit açısal hız,

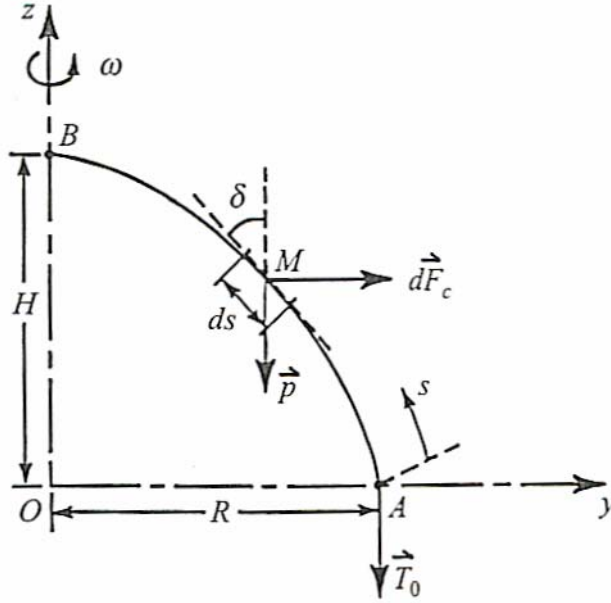
σ = birim uzunluk başına kablonun kütlesi,

g yerçekimi ivmesi ve

s maksimum yatay yer değiştirme (z = 0) noktası ile M noktası arasındaki kablonun uzunluğu olup Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Gerekli ayrıntılı hesaplar yapılarak,

$\frac{\ell}{2H}$ ve $\frac{S}{\ell^2}$ ifadeleri aşağıdaki gibi bulunur (Paraschivoiu 2002).



Şekil 4.10 Troposkien şekli (Paraschivoiu 2002)

$$\frac{\ell}{2H} = \frac{2}{1-k^2} \cdot \frac{E(k; \pi/2)}{F(k; \pi/2)} - 1 \quad (4.78)$$

burada;

$$E(k; \pi/2) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

$$F(k; \pi/2) = \int_{\pi/2}^{\phi} \frac{d\phi}{1-k^2 \sin^2 \phi}$$

$$1/k^2 = 1 + 4/(\beta^2 \Omega^2)$$

$$\Omega = \sqrt{1-k^2} [F(k; \pi/2)]$$

ikinci tipten bir eliptik tam integral olan. (4.78) denklemi iterasyonla çözülebilir. Burada k parametresi için, yakınsamanın takriben 8 iterasyon sürdüğü Newton iterasyon yöntemi kullanılmıştır (Paraschivoiu 2002).

Çap/yükseklik oranı $\beta = R/H$, k nın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir :

$$\beta = \frac{2k}{1-k^2} \cdot \frac{1}{F(k; \pi/2)} \quad (4.79)$$

sonuç olarak, hesap için pratik formül aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{S}{4HR} = \frac{\ln|(1+k)/(1-k)|}{2k} \cdot \frac{1}{F(k; \pi/2)} \quad (4.80)$$

Gerçekten, kanadın maliyeti kanat uzunluğu ile orantılıdır ve elde edilen enerji çark süpürme alanı ile artar. Bu sebepten S/ℓ oranının maksimum değerini belirleme önemlidir (Reis ve Blackwell 1974, 1975).

(4.78), (4.79) ve (4.80) bağıntılarını kullanarak, S/ℓ^2 oranını aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır (Paraschivoiu 2002).

$$\frac{S}{\ell^2} = \frac{(1-k)\ln|(1+k)/(1-k)|}{[2E(k; \pi/2) - (1-k^2)F(k; \pi/2)]} \quad (4.81)$$

ve $\beta = 0.99459$ da (S/ℓ^2) meydana gelir. $\beta \in [0.8; 1.2]$ için (S/ℓ^2) in değeri yaklaşık olarak 0.3 dür.

Kanat gerilmesi için sırasıyla yatay ve düşey eksenlerdeki denge kuvvetleri sırasıyla göz önüne alınır, aşağıdaki denklemler yazılır.

$$T \sin \delta = \int_0^s \sigma \omega^2 y ds = F_C \quad (4.82)$$

$$T \cos \delta = T_0 + \int_0^s g \sigma ds = T_0 + G \quad (4.83)$$

İdeal Troposkien kanat geometrisi için gerilmelerle ilgili bağıntıların ayrıntılı hesabı literatürden temin edilebilir. Ayrıca Troposkien biçimine sahip bir Darrieus çarkı için kanadın meridyen açısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Paraschivoiu 2002).

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{1-k^2}{1+(1-2\eta^2)k^2} \right] \quad (4.84)$$

4.2.4 Değiştirilmiş Troposkien kanadı (G≠0)

100 kW veya daha az Darrieus tipi düşey eksenli küçük rüzgar türbinleri için, çark üzerindeki yerçekimi tesiri santrifüj kuvvetlere göre ihmal edilebilir. Bununla beraber, daha büyük Darrieus rüzgar türbinleri için kanat ağırlığı önem kazanır ve bu etki tasarımda önem taşır. Bu durumda şekil denkleminin tam bir çözümü difransiyel denklemin integre edilmesiyle ve numerik çözümü ile elde edilir. Bununla birlikte ideal Troposkien şeklinin değiştirilmesiyle kanat üzerindeki yerçekimi tesiri yaklaştırılabilir. Böylece değiştirilmiş Troposkien kanadı'nın, düşey eksene göre simetrik kaldığı varsayılır ve sadece yatay eksene göre şekil değiştirmesi göz önüne alınır. Aynı yükseklik için maksimum yarıçap R olur ve H/R oranı β_1 bağıntısıyla ifade edilecektir. Bu konu ile ilgili ayrıntılı hesap literatürde verilmiş olup sonuç olarak kanat uzunluğu ve gerilme ile ilgili bağıntılar aşağıda verilmiştir (Paraschivoiu 2002).

$$\frac{\ell_1}{2H} = \left[\frac{2}{1-k_1^2} \cdot \frac{E(k_1; \pi/2)}{F(k_1; \pi/2)} \right] - 1 \quad (4.85)$$

$$\left(\frac{T}{T_0} \right)_{\max} = \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} \left(1 + \frac{G}{T_0} \right) \quad (4.86)$$

ve Meridyen açısı δ :

$$\tan \delta = -\frac{dy}{dz} = -\beta \frac{d\eta}{d\zeta}$$

Ve çarkın her iki yarısı için (4.87) nolu denklemden hesaplanabilir :

$$\delta = \arctan \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\beta}{1 \pm G/T_0} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{1 \pm \zeta}{1 + G/T_0} \right) \right] \quad (4.87)$$

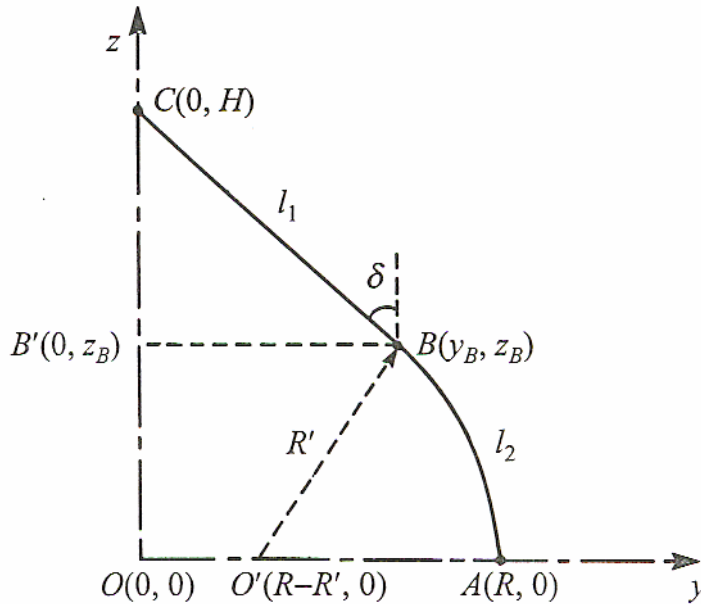
Yerçekimi etkisi ve santrifüj kuvvetlerden dolayı minimum kanat gerilmesini elde etmek için, Grover ve Veneruso (1977) kanat hücum açısının değiştirilmesini önerdiler. Tüm kanat şekillerinin geometrik parametreleri sırasıyla incelik, kanat uzunluğu, süpürme alanı, maksimum giriş yarıçapı ve katılık; bir Darrieus çarkı için 2 adet NACA 0015 kanatlarıyla hesaplandı.

Hesaplamalar ekvator bölgesinde kanatların toplam uzunluğunun takriben % 60 lık kısmında toplam momente % 95 katkıda bulunduğunu gösterir (Kadlec 1978). Bu da

kanadın tüm elemanlarının çark momentine eşit şekilde katkıda bulunmadığı gerçeğinden açıklanabilir. Kutup bölgeleri küçük bir moment koluna sahiptirler ve kanat kesiti durma anlarındaki aralıklarda çalışır fakat ekvator yakın kısımlarda büyük bir moment kolundan dolayı katkısı daha büyüktür.

4.2.5 Sandia tipi kanat geometrisi

Pratikte, Darrieus çarkı Troposkien'e takribi olarak uygun olacak basitleştirilmiş bir şekilde kurulabilir. Böylece çark kanadı çarkın üst ve alt kısmında doğru bir hat şeklinde ve ortada dairesel bir yay şeklinde tasarlanabilir. Bu şekildeki pratik kanat şekli Sandia Ulusal laboratuvarlarında, Blackwell vd (1977) tarafından önerilen biçim şekil 4.11 de gösterildi.



Şekil 4.11 Sandia kanat şekli (Paraschivoiu 2002)

Şimdi Şekil 4.11 de gösterildiği gibi \overline{CB} bir doğru hat ve R' yarıçaplı bir dairesel yaydan ibaret olan yarım bir kanadı göz önüne alalım. Çark kanadının toplam uzunluğunu ℓ ve kanat yüksekliğini $2H$ olarak alalım. Çap/yükseklik oranı $\beta = R/H$ ve B noktasının koordinatları (y_B, z_B) olsun, sonra \overline{CB} doğru hattının denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir (Paraschivoiu 2002)

$$\frac{y_B}{-y} = \frac{z_B - H}{H - z}$$

veya boyutsuz biçimde:

$$\eta = \frac{\eta_B}{1 - \zeta_B} (1 - \zeta) \quad (4.88)$$

burada

$$\eta = y/R \quad \text{ve} \quad \zeta = z/H \quad (4.89)$$

B noktası için $\eta_B = y_B/R$ ve $\zeta_B = z_B/H$ olur.

Doğru hat \overline{CB} üzerindeki δ_1 meridyen açısı sabittir ve aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\tan \delta_1 = \frac{\beta \zeta_B}{1 - \zeta_B} \quad (4.90)$$

(4.88) denkleminde $\eta \in [0, \eta_B]$ ve $\zeta \in [\pm 1, \zeta_B]$ Kanadın toplam uzunluğu $\ell = 2(\ell_1 + \ell_2)$ burada,

$$\frac{\ell_1}{H} = \frac{1 - \zeta_B}{\cos \delta_1}$$

$$\frac{\ell_2}{H} = \frac{R'}{H} \delta_1 = \frac{R'}{R} \beta \delta_1$$

$$\frac{\ell}{2H} = \frac{2(\ell_1 + \ell_2)}{2H} = \frac{1 - \zeta_B}{\cos \delta_1} + \frac{R'}{R} \beta \delta_1 \quad (4.91)$$

Daire denklemi $O'(R - R', 0)$ merkezine sahip olup, $A(R, 0)$ ve $B(y_B, z_B)$ noktalarından geçer ve daire denklemi $[y - (R - R')]^2 + z^2 = R'^2$ şeklinde verilir. Boyutsuz olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta = 1 - \frac{R'}{R} + \sqrt{\left(\frac{R'}{R}\right)^2 - \left(\frac{\zeta}{\beta}\right)^2} \quad (4.92)$$

burada $\eta \in [1, \eta_B]$ için $\zeta \in [0, \pm \zeta_B]$ kapsar.

Daire yayı konumunda δ_2 meridyen açısı aşağıdaki şekildedir:

$$\tan \delta_2 = \frac{\zeta}{\sqrt{\left(\beta^2 \frac{R'}{R}\right)^2 - \zeta^2}} \quad (4.93)$$

$\zeta = \zeta_B = z_B/H$ için, $\delta_2 \equiv \delta_1$ ve aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz:

$$\frac{R'}{R} = \frac{\zeta_B}{\beta \sin \delta_1} \quad (4.94)$$

burada δ_1 (4.90) denkleminle ifade edildi. Böylece (4.92) denkleminin aşağıdaki biçimini alır:

$$\eta = 1 + \frac{\sqrt{\zeta_B^2 - \zeta^2 \sin^2 \delta_1} - \zeta_B}{\beta \sin \delta_1} \quad (4.95)$$

“Sandia tipi kanadın” toplam uzunluğu ℓ olup (Şekil 4.11) ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\ell}{2H} = \frac{1 - \zeta_B}{\cos \delta_1} + \frac{\zeta_B \delta_1}{\sin \delta_1} \quad (4.96)$$

Çarkın süpürme alanı S , aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir:

$$\frac{S}{4HR} = \frac{1}{2} \left[\eta_B + \zeta_B + \left(\frac{\beta \delta_1 - \sin \delta_1}{\beta \sin^2 \delta_1} \right) \zeta_B^2 \right] \quad (4.97)$$

Ekvator düzlemindeki eğrilik yarıçapı aşağıdaki gibidir:

$$R' = \frac{\zeta_B}{\beta \sin \delta_1} R \quad (4.98)$$

Kanadın ağırlık merkezi aşağıdaki gibi yerleştirilmiştir:

$$\frac{x_G}{R} = 0, \frac{y_G}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta}{\ell/2H} (\eta_B \ell_1 + 2\ell_2) \quad (4.99)$$

Kanattaki gerilme oranı aşağıdaki gibidir:

$$\left(\frac{T}{T_0} \right)_{\max} = \frac{\sqrt{(1 - \zeta_B)^2 + \eta_B \beta^2}}{1 - \zeta_B} \quad (4.100)$$

burada T_{\max} ın maksimum değeri kanadın düşey eksenle kesişme noktasıdır.

$$T_{\max} = \sigma R \omega^2 (\ell_1 + \ell_2) / \sin \delta_1 \quad (4.101)$$

Maksimum gerilme katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$(C_{TS})_{\max} = \frac{T_{\max}}{\sigma R^2 \omega^2} = \frac{1}{2H} \cdot \frac{\ell}{\beta \sin \delta_1} \quad (4.102)$$

Bu bölümde tüm kanat biçimleri için iki kanatlı bir Darrieus çarkının geometrik parametreleri incelendi ve Tablo 4.1 de gösterildi. Çap / Yükseklik oranları $\beta = 0.984$ ve $\beta = 0.667$ olan iki çark göz önüne alındı. Sonuçlar boyutsuz şekilde sunuldu ve şunları içermektedir: kanat uzunluğu $\ell/2H$, çarkın süpürme alanı $S/4RH$ ve çark katılığı $Nc/\ell/S$ olup burada N kanat sayısı ve c ise kanat profilinin giriş uzunluğudur.

Aynı zamanda kanat üzerinde yerçekimi ivmesinin göz önüne alındığı Troposkien biçimi kanat için c/R oranı ve dönme hızı (d/d) verildi. Pratik şekiller arasında örnekler Sandia 17m ($\beta = 0.984$) ve Magdalen islands çarkı ($\beta = 0.667$) pratik olup bunların şekilleri iki düz hat parçası, ekvatora göre simetrik iki dairesel yaydan ibarettir (Shawinigan 1978).

Tablo 4.1 de verilen sonuçlar, kanat uzunluklarının farklı değerlerini ve β nın bir fonksiyonu olarak katılığın değişimini göstermektedir. Aynı tabloda n (d/d) dönme hızıyla orantılı olan teğetsel hız değerleri (m/s) verilmiştir. Teğetsel hız $V_T = \pi n R / 30$ fiziksel bir parametre olup Darrieus çarkının tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Genel olarak, ekvator da teğetsel hız aralığı 30 ile 40 m/s veya daha fazla değişir. β parametresinin sabit ve belli bir hızda $V_T = \text{sabit}$ olduğunu kabul edelim. Dönme hızı n_1 den n_2 ye değişir. Çark çapı da D_1 den D_2 ye değişir. $n_1/n_2 = D_1/D_2$ dir. Sonuç olarak çarkın yüksekliği $\beta = \text{sabit}$ olacak şekilde değiştirilir.

Tablo 4.1 Farklı kanat biçimlerindeki iki kanatlı Darrieus çarkları için geometrik parametreler (Paraschivoiu 2002).

Kanat Biçimi	Çap / Yükseklik	Kanat Uzunluğu	Çarkın süpürme alanı	Kiriş/Yarıçap	Çark katılığı	Teğetsel hız
	β	$\ell / 2H$	$S/(4RH)$	c/R	$N_c \ell / S$	V_t m/s ve (d/d)
Zincir Eğrisi (Catenary)	0.984	1.483	0.683	0.073	0.156	29.53 (33.7) 36.98 (42.2) 44.34 (50.6) 32.07 (36.6)
	0.667	1.252	0.682	0.050	0.092	
Parabola	0.984	1.467	0.667	0.073	0.160	
	0.667	1.246	0.667	0.050	0.093	
İdeal Troposkien (G=0)	0.984	1.463	0.657	0.073	0.162	
	0.667	1.239	0.648	0.050	0.096	
Modified Troposkien (G≠0)	0.984	1.497	0.658	0.073	0.166	
	0.984	1.477	0.658	0.073	0.164	
	0.984	1.470	0.658	0.073	0.163	
	0.667	1.241	0.648	0.050	0.096	
Sandia Tipi	0.984	1.416	0.657	0.073	0.157	
Magdalen-Island Çarkı	0.667	1.25	0.648	0.05	0.098	

Tablo 4.2 Boyutsuz koordinatlar ve meridyen açısı (Radyan olarak)(Paraschivoiu 2002)

Kesit nosu	ζ	İdeal Troposkien		Zincir Eğrisi (Catenary)		Parabol		Sandia Tipi		Değiştirilmiş Troposkien ($G \neq 0$) d/d=42.2	
		η	$\delta(\text{rad})$	η	$\delta(\text{rad})$	η	$\delta(\text{rad})$	η	$\delta(\text{rad})$	η	$\delta(\text{ran})$
1	-1	0	-1	0	-1.172	0	-1.101	0	-1.044	0	-1.06
2	-0.95	0.07	-1.038	0.115	-1.139	0.097	-1.08	0.078	-1.04	0.095	-1.078
3	-0.9	0.156	-1.033	0.221	-1.105	0.19	-1.057	0.156	-1.049	0.189	-1.072
4	-0.85	0.233	-1.023	0.318	-1.067	0.277	-1.032	0.235	-1.049	0.281	-1.063
5	-0.8	0.309	-1.01	0.4	-1.028	0.36	-1.005	0.313	-1.049	0.371	-1.049
6	-0.75	0.383	-0.993	0.46	-0.985	0.438	-0.975	0.391	-1.049	0.45	-1.03
7	-0.7	0.454	-0.972	0.559	-0.939	0.51	-0.943	0.469	-1.049	0.54	-1.005
8	-0.65	0.522	-0.946	0.625	-0.89	0.578	-0.907	0.548	-1.049	0.618	-0.974
9	-0.6	0.588	-0.914	0.685	-0.839	0.64	-0.868	0.626	-1.049	0.689	-0.938
10	-0.55	0.649	-0.877	0.738	-0.784	0.698	-0.825	0.705	-0.976	0.755	-0.887
11	-0.5	0.707	-0.833	0.786	-0.725	0.75	-0.777	0.77	-0.851	0.814	-0.827
12	-0.45	0.76	-0.783	0.828	-0.664	0.798	-0.725	0.822	-0.743	0.865	-0.753
13	-0.4	0.809	-0.726	0.86	-0.6	0.84	-0.667	0.865	-0.644	0.909	-0.662
14	-0.35	0.853	-0.66	0.898	-0.532	0.876	-0.603	0.899	-0.553	0.945	-0.551
15	-0.3	0.891	-0.587	0.926	-0.462	0.91	-0.533	0.926	-0.467	0.971	-0.418
16	-0.25	0.924	-0.505	0.949	-0.389	0.938	-0.457	0.951	-0.384	0.99	-0.263
17	-0.2	0.951	-0.416	0.967	-0.314	0.96	-0.375	0.969	-0.304	0.999	-0.09
18	-0.15	0.972	-0.319	0.982	-0.237	0.978	-0.287	0.983	-0.227	0.999	0.042
19	-0.1	0.988	-0.216	0.992	-0.159	0.99	-0.194	0.992	-0.15	0.995	0.128
20	-0.05	0.997	-0.109	0.998	-0.08	0.998	-0.1	0.998	-0.08	0.98	0.214
21	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0.973	0.295
22	0.05	0.997	0.109	0.998	0.08	0.997	0.098	0.998	0.075	0.955	0.371
23	0.1	0.988	0.216	0.992	0.159	0.99	0.194	0.992	0.15	0.934	0.441
24	0.15	0.972	0.319	0.982	0.237	0.977	0.287	0.983	0.227	0.907	0.505
25	0.2	0.951	0.416	0.967	0.314	0.96	0.375	0.969	0.304	0.877	0.563
26	0.25	0.924	0.505	0.949	0.389	0.938	0.457	0.951	0.384	0.803	0.616
27	0.3	0.891	0.587	0.926	0.462	0.91	0.533	0.928	0.467	0.806	0.663
28	0.35	0.853	0.66	0.898	0.532	0.876	0.603	0.899	0.553	0.768	0.709
29	0.4	0.809	0.726	0.86	0.6	0.84	0.667	0.865	0.644	0.719	0.741
30	0.45	0.76	0.783	0.828	0.664	0.798	0.725	0.822	0.743	0.671	0.773
31	0.5	0.787	0.833	0.78	0.833	0.75	0.777	0.77	0.851	0.62	0.802
32	0.55	0.649	0.877	0.73	0.784	0.698	0.825	0.705	0.976	0.56	0.826
33	0.6	0.58	0.914	0.685	0.839	0.64	0.868	0.626	1.049	0.51	0.847
34	0.65	0.522	0.946	0.625	0.89	0.57	0.907	0.548	1.049	0.451	0.866
35	0.7	0.454	0.972	0.559	0.939	0.51	0.943	0.469	1.049	0.391	0.881
36	0.75	0.383	0.993	0.486	0.985	0.438	0.975	0.391	1.049	0.326	0.694
37	0.8	0.309	1.01	0.406	1.028	0.36	1.005	0.313	1.049	0.264	0.504
38	0.85	0.233	1.023	0.31	1.067	0.278	1.032	0.235	1.049	0.199	0.911
39	0.9	0.156	1.033	0.221	1.105	0.19	1.057	0.156	1.049	0.133	0.917
40	0.95	0.08	1.038	0.115	1.139	0.098	1.08	0.078	1.049	0.067	0.92
41	1	0	1.04	0	1.179	0	1.101	0	1.049	0	0.921

Tablo 4.2 sırasıyla düşey yöndeki ζ ve yatay yöndeki η boyutsuz koordinatları ve Darrieus çarkının farklı geometrileri için radyan cinsinden δ meridyen açısını verir. Yarım bir kanat için tablo 41 kesiti listeliyor. Darrieus çarkı, sadece Ox eksen simetrisinin muhafaza edildiği değiştirilmiş Troposkien kanat ($G \neq 0$) durumu hariç,

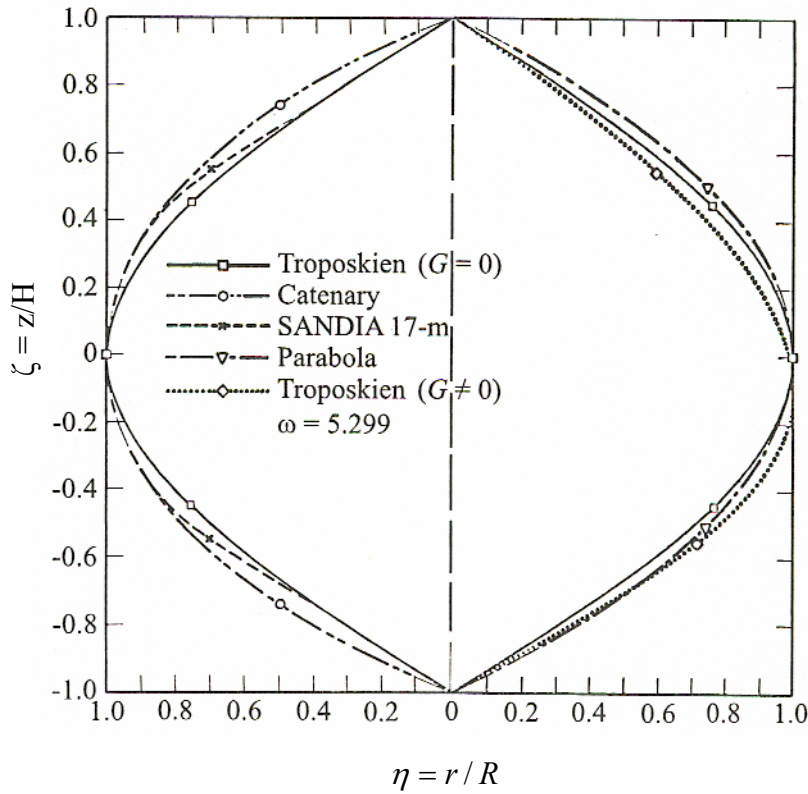
eksen simetrisine göre simetriktir. Tablo 4.3 yarım bir kanat için 61 istasyonda Magdalen İslands Darrieus çarkının (M.I.D.R.) için boyutsuz koordinatlarını listeler.

Tablo 4.3 Magdalen İslands Darrieus çarkının boyutsuz koordinatları (Paraschivoiu 2002).

Kesitler 1 - 15		Kesitler 16 - 30		Kesitler 31 - 45		Kesitler 45 - 61	
ζ	η	ζ	η	ζ	η	ζ	η
0	1	0.25	0.951	0.5	0.756	0.75	0.403
0.017	1	0.267	0.948	0.517	0.738	0.767	0.376
0.033	1	0.283	0.933	0.533	0.72	0.783	0.349
0.05	1	0.3	0.923	0.55	0.702	0.8	0.322
0.067	1	0.317	0.911	0.567	0.683	0.817	0.295
0.083	0.999	0.333	0.899	0.583	0.663	0.833	0.269
0.1	0.997	0.35	0.887	0.6	0.643	0.85	0.242
0.117	0.995	0.367	0.875	0.617	0.618	0.867	0.215
0.133	0.992	0.383	0.861	0.633	0.591	0.883	0.188
0.15	0.988	0.4	0.848	0.65	0.564	0.9	0.161
0.167	0.984	0.417	0.834	0.667	0.537	0.917	0.134
0.183	0.979	0.433	0.819	0.683	0.51	0.933	0.107
0.2	0.973	0.45	0.804	0.7	0.483	0.95	0.081
0.217	0.967	0.467	0.788	0.717	0.457	0.967	0.054
0.233	0.959	0.483	0.72	0.733	0.43	0.983	0.027

Darrieus çarkının farklı kanat geometrilerini karşılaştırmak için ideal Troposkien kanadı esas biçim olarak göz önüne alındı. Böylece şekil 4.12'de $\beta=0.984$ için catenary çarkı, Troposkien şekli ile karşılaştırılmıştır. Catenary şeklinin, Troposkien'e göre oldukça farklı olduğu bu nedenle parabol şeklinin Troposkien'in kabul edilebilir bir yaklaşımı olduğu görülebilir.

Kanat katılığını ihmal ederek değiştirilmiş Troposkien kanadının, Troposkien'e yaklaşık kabul edilebilir olduğunu gösterir. Hız arttıkça, yerçekimi tesirine göre santrifüj kuvvetleri önemli derecede artar ve kanat biçimi Troposkien'inkine yaklaşır. Örneğin ağırlığı ihmal ederek 50,6 d/d durumunda hata büyük ölçüde düşer. Yukarıda bahsedilen şekilde çizilen eğriler için, Sandia 17m Darrieus çarkı $\sigma=25.8$ kg /m lik bir lineer ağırlık kullanıldı. İdeal troposkien'in iyi bir yaklaşımı, pratik Sandia biçimi için (2 düz hat ve bir dairesel yay) $\beta=0.984$ için Şekil 4.12 de gösterildi (Paraschivoiu 2002).



Şekil 4.12 Darrieus çark geometrileri (Paraschivoiu 2002).

Darrieus çarkı için tüm kanat şekillerinin incelenmesi bu bölümde incelendi. Parabolik şeklin, ideal Troposkien'e takriben çok yakın olduğu sonucuna varılır. Bunun ötesinde, bir çark tasarımı için daha kolay imal edilmesinden dolayı, Sandia şeklini uyarlamak daha uygundur. Bu nedenle iyi bir aerodinamik karakteristiklere sahip olup yapısal olarak daha iyi davranır. Bununla beraber, büyük Darrieus çarkları için (500 kW veya daha fazla), kanadın ağırlığı önem kazanır ve hesaplarda göz önüne alınması gerekir.

Kanat rijitliğini incelemekle hem aerodinamik hem de yapısal bakımdan daha iyi bir Darrieus çark tipi tasarlanabilir. Kanadın ağırlık etkisi SNL' de (Sandia Ulusal Laboratuvarları) incelendiği gibi, çarkın alt kısımlarında düşey eksene göre kanat açısı artar. Bu yaklaşım Grover (1977) tarafından, yükseklik/çap oranı 1.5 olan 17 metrelik Sandia çarkı için önerilmiş olup, kanadın düşey eksene üst tarafta 47 derece ile ve alt tarafta 49 derece ile birleştiği görülür.

5. DARRIEUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ TASARIMINDAKİ GELECEK EĞİLİMLER

Rüzgar enerjisinin global elektrik pazarlarına kolay uyumunun anahtarı, enerjinin son maliyetini minimuma indirecek bir rüzgar dönüşüm sisteminin geliştirilmesidir. Her rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin, toplam maliyet verimliliği aşağıdakilerle belirlenir:

- a.) Rüzgar türbini imalat maliyetleri;
- b.) Elde edilen enerji miktarı
- c.) Yer hazırlama ve kurulum maliyetleri
- d.) Bakım maliyetleri
- e.) Parasal maliyetleri

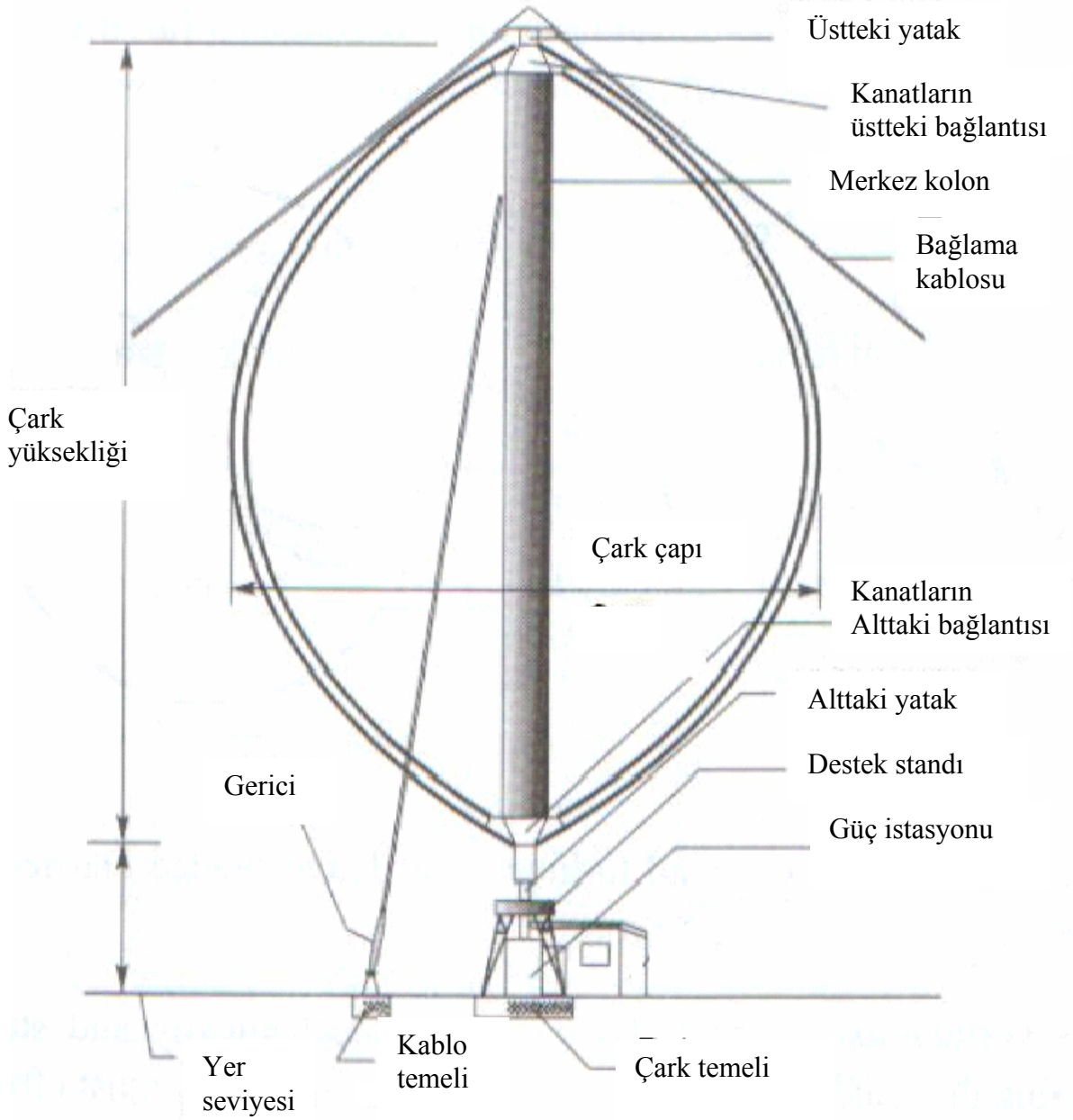
Darrieus rüzgar türbini maliyetleri esas olarak biçimin ve malzemelerin seçimine buna ilaveten tüm aşağıdaki tasarım parametrelerini içerir.

- a.) Süpürme alanı, çap/yükseklik oranı ve çark katılığı
- b.) Kanatların sayısı ve kanat profili
- c.) Çark hızı ve hız kontrol tipi
- d.) Kanat malzemesi ve yapısı
- e.) Merkez kolonun tip ve çapı
- f.) Yatay destek çubuklarının yeri ve yapısı
- g.) Bağlama kablolarının sayısı, büyüklüğü ve önyüklemesi
- h.) Frenlerin tipi ve yeri
- i.) Standart yada özel yapım vites kutusu
- j.) Motor / jeneratör tipi
- k.) Temeller

5.1. Rüzgar Türbini Tasarım Parametreleri

- Süpürme Alanı:

Çarkın toplam süpürme alanı, rüzgar çarkının boyutuyla hesaplanır. Optimum çark ölçüsü yatay ve dikey eksenli rüzgar çarkları tasarımcıları için bir ön çalışmadır. Her ikisinde de ekonomik faktörler esastır. Optimum ekonomik biçimi bulmak için çok çalışmalar yapıldı fakat farklı irdelemelerle sonuçlandı.



Şekil 5.1 Darrieus türbini (Paraschivoiu 2002)

Böylece, Sullivan (1979) tarafından 15-20 m çap sınıfında, optimum ekonomik biçimi inceledi ve sonuçlar DOE 100 kW (Sandia 17m) tasarımını gerçekleştirdi, burada maliyetin düşük olmasına dikkat edildi.

Bununla beraber çark tarafından alınan enerji süpürme alanıyla ve rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Birim süpürme alanı başına çarkın ve sabitleme kablolarının toplam kütlesi bazı ticari ve araştırma rüzgar makineleri için süpürme alanlarıyla karşılaştırıldı

ve tablo 5.1 de gösterildi. Boyutlar artarken birim süpürme alanı başına düşen kütlenin de arttığını göstermektedir.

Tablo 5.1 Çark kütlesi ve çark boyutları (Paraschivoiu 2002).

Türbin	Süpürme Alanı (m²)	Toplam Kütle (kg)	Kütle/Alan (kg/m²)	Düşünceler
FloWind 17-m	241	7524	26.1	Ticari
FloWind 19-m	315	10962	34.8	Ticari
Adecon 19-m	316	9100	28.8	Ticari
Magdalen Is 24m	478	14961	31.3	Araştırma
Indal 6400	495	17770	35.9	Ticari
Sandia 34-m	955	72198	75.6	Araştırma
Eole	4000	300000	75.0	Prototip

- Çap / Yükseklik Oranı :

Darrieus çarkının çap/yükseklik oranı; türbin çapının yüksekliğe oranı olarak tanımlanır. Başlangıçta, verilen bir süpürme alanı için Darrieus çarkları kanat uzunluğunun ve merkezi kolonu minimum yapmak için düşük çap/yükseklik oranlarına sahipti.

Bununla beraber tahrik mekanizmasının maliyeti toplam makine maliyetinin takriben %50 si kadardı ve buda düşük hız momentinin değerine bağlıdır; eğer çark çap/yükseklik oranı artarsa o zaman çark hızı artar (izafi rüzgar hızı ve uç hız oranını sabit tutulur) ve eğer güç sabit ise moment azalır (DAF 1984)

Birçok analizden sonra Darrieus rüzgar çarklarının çap/yükseklik oranlarının 1.3 ile 1.5 arasında olduğu benimsenmiştir. Fakat Şekil 5.2 deki Flowind Darrieus türbinleri bu kuralın dışında örneklerdir (Paraschivoiu 2002).

- Kanatların sayısı:

Bazı Darrieus çarkları üç kanatlı olarak imal edildi. (Örneğin NRC 4.3-m, Sandia 2-m) Her iki durumda da momentin ve yapısal özelliklerin yararlı olması amaçlandı. Fakat daha sonra 2 kanatlı makinede malzeme ve kurulum giderlerinin dikkate değer ölçüde düştüğü anlaşıldı ve tercih nedeni olmuştur (Worstell 1982, Johnson 2001).

Kanatların sayısı ve kanat kirişinin seçimi, aynı zamanda kanat yapısının seçiminden etkilenebilir. Tablo 5.2 iki ve üç kanatlıların üstünlük ve sakıncalarını vermektedir. Bu, toplam ekonomikliğin yapı ve aerodinamik kurullarla birleştirilmesine bir örnek teşkil eder.

Tablo 5.2 İki ve üç kanatlıların üstünlükleri (Paraschivoiu 2002).

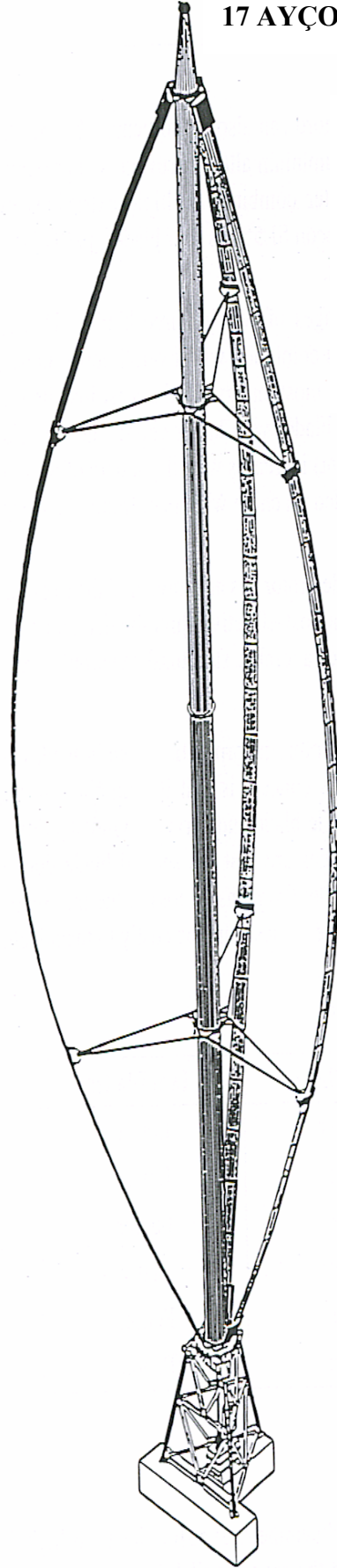
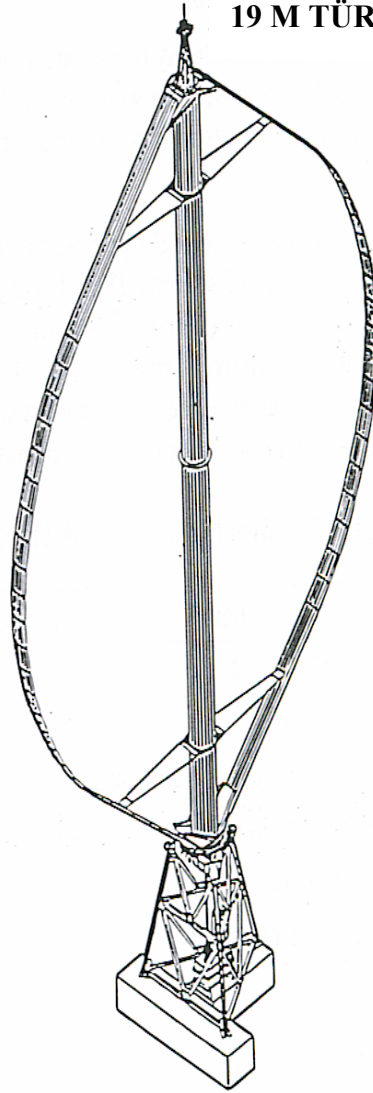
Madde	Üç kanatlı	İki kanatlı
Yapı maliyeti	Daha yüksek	Daha az
Montaj maliyetleri	Daha yüksek	Daha az
Fabrikasyon tekniklerinin seçimi	Daha iyi	Daha zayıf
Gerilme / Ağırlık oranı	Daha zayıf	Daha iyi
Moment dalgalanması	Daha iyi	Daha zayıf
Yapısal dinamikler	Daha iyi	Daha zayıf

- Kanat Profili:

Yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı Darrieus çarklarında en çok NACA 00XX simetrik kanat profilleri kullanılmıştır. Başlangıçtaki çarklarda esas itibarıyla daha ince olan NACA 0012 ve NACA 0015 profilleri kullanıldı. Fakat düzlemsel yöndeki gerilmeyi arttırmak için NACA 0018 bazı imalatçılar tarafından tercih edilmiştir.

17 AYÇO TÜRBİNİ

Çark Özellikleri	17 AYÇO	19M
Yükseklik / Çap oranı	2.78	1.31
Kanat profili	SNLA 2150	NACA 0015
Kanat krişi	0.68m	0.71m
Direk çapı	1.06m	1.07m
Destek derinliği, aşağıda	11.35m	2.95m
Destek derinliği, yukarda	11.52m	3.29m

**19 M TÜRBİNİ**

Şekil 5.2 Flowind Darrieus türbinleri (Paraschivoiu 2002)

- Çark Hızı :

Çark hızı esas itibarıyla rüzgar rejimi, katılık ve makinenin güç miktarıyla kontrol edilir. Çark hızını arttırarak daha az kanat alanıyla daha fazla enerji üretmek mümkündür. Bununla beraber kanatların aerodinamik ve atalet yüklemelerine dayanamamalarına sebep olabilir. Bu durum NRC / Hydro-Quebec (Magdalen islands) 24m ve 28-36 d/d arasındaki hızlarda çalışan makinenin durumunu gösterir.

Çark hızını arttırmak düşük hız momentini azaltır ve bundan dolayı Adecon SL 38 ve SL 45 tasarımlarında olduğu gibi hareket mekanizması maliyetini düşürür. Örneğin diğer rüzgar türbinleri Cenemesa 23 var olan bir güç modelini kullanmak için tasarlanmış ve bu yüzden rotor hızı önceden belirlenmiştir (Taylor 2004)

- Çark Katılığı :

Çark katılığı , kanatların açılmış alanlarının süpürme alanına oranıdır ve anahtar tasarım parametrelerinden birini gösterir. Bu da diğer ana değişkenlerle birleştirilmesi ve dengelenmesini gerektirir. Minimum maliyet için katılık düşük olmalıdır. Bununla beraber yapısal bütünlükle en düşük değerler karşılaştırıldığında 0.10 civarında olduğu görülür (Manwell ve Rogers 2002).

5.2. Gelecekteki Tasarım Seçenekleri

Darrieus rüzgar türbinlerinin maliyet faktörleri öncelikle, yatay eksenli rüzgar türbinleri ile karşılaştırılarak mukayese edilir. Bu karşılaştırmada Darrieus çarkları birinci nesil makinelerin ötesindeki gelişmelerden yeteri kadar faydalanamamıştır. Darrieus rüzgar türbinlerinin birkaç tasarım seçenekleri, Tablo 5.3 'de gösterilmiştir.

Çeşitli tasarım analizleri takip edilirse, Darrieus çark tasarımını arttıran seçenek ve gelişmeleri belirlemek şu anda mümkündür. Örneğin:

- En yüksek moment ve gücü sınırlayarak, süpürme alanı maksimum yapılabilir.
- Yapısal bütünlüğü elde ederek, toplam kütle minimize yapılmalıdır.
- Katılık minimize edilerek ve çark hızı arttırılarak, kütle (ve maliyetler) düşürülebilir.

- Kanat profillerinin geliştirilmesi veya kanat profillerinin birleştirilmesi ile aerodinamik verim artırılır.
- Yorulma gerilimlerini hafifletmek için alternatif taşıyıcı biçimleri yapılır.
- Yer seviyesi montaj kolaylıkları avantajlarını kullanarak tahrik mekanizması ve çark taşıyıcıları basitleştirilir; çark biçimi ve hızıyla tahrik mekanizması optimum hale getirilebilir.
- Aerodinamik frenleme kullanılabilir.
- Değişken hız işletimi

Tablo 5.3 Darrieus rüzgar türbini tasarım seçenekleri (Paraschivoiu 2002).

Parametre	Değerler/Seçenekler		
Kanat sayısı	1	2*	3
Çap / Yükseklik oranı	2	1.5*	1
Kanat malzemesi / konstrüksiyon	Alüminyum ekstrüzyon*	Çelik sac	Çelik özlü
Destekler	Desteksiz	Tam destekli*	Desteksiz
Merkez direği	Düzgün tüp	Konik tüp	Çelik destekli
Frenler	Düşük hız*, yüksek hız	Elektrik	Aerodinamik
Taşıyıcı	Destek kabloları*	Destekli	Katı çerçeve

* En yaygın seçenekleri gösterir.

Malcom ve Schienbein tarafından sunulan Darrieus rüzgar türbinleri için hem teknik hem de ekonomik olarak en verimli özellikleri Tablo 5.4'de gösterilmiştir.

Birim süpürme alanı başına yapısal maliyeti daha fazla düşürmek için birçok adım atılabilir. Bunların içinde en ümit vericisi narin destek kabloları ve takviyeli cam-elyaf kanatlar, birleştirilmiş vites kutusudur. Konik kırıklı kanatlar %5-10 civarında daha fazla enerji kazanmak için geliştirilebilir fakat bunlar maliyeti artırır.

Tablo 5.4 Darrieus rüzgar türbini gelişmeleri (Malcom ve Schienbein 1995)

Özellik	Düzenek basitliği	Maliyet düşüşü	Enerji artışı	Toplam değerlendirme	Düşünceler
Narin bağlantı kabloları	3	5	0	8	İsteğe göre değişir, test edilmelidir
Destek sütunu	4	4	0	8	Narin, kablolarla birleştirilmeli
Takviyeli fiberglas kanatlar	3	3	0	6	Ümit vericidir, elastik olarak bükülebilir mi?
Menteşeli kanatlar	3	3	0	6	Kısmen başarılı, güvenilir mi?
Kanatların dengelenmesi	5	0	1	6	Kullanışlı, basit
Birleştirilmiş vites kutusu/yatak	4	2	0	6	Zaten kullanılıyor, ümit verici
Kayış tahrikli	1	5	-1	5	Dert'lere uygulanabilir, araştırma geliştirmeye ihtiyaç var.
Vorteks jeneratörler	4	-1	2	5	Halihazırda kullanılıyor, yeni kanatlarla teste ihtiyacı var.
Çoklu ayrılmış hız jeneratörleri	4	-1	1	4	Halihazırda test ediliyor.
Konikleşmiş kriş	2	-2	3	3	İmal edilmesi zor ?
Pompalı bozucular (düzenleyiciler)	1	-2	1	0	Güç kontrolü, daha fazla gelişmeye gerek var.
Aerodinamik bozucular	1	-2	0	-2	Güvenilir mi?
Değişken hız	1	-3	1	-2	%5 enerji artırımını var, maliyeti sorun
Doğrudan tahrik	2	-3	0	-1	Eole'de kullanıldı, pahalı

Not : Lavalin Tech L24 değerlendirme için kullanıldı.

Geliştirme için en kolayı = 5

En büyük enerji çıkış artışı = 5

Geliştirme için en zoru = 0

Sıfır enerji artışı = 0

Yapım maliyetinde en büyük düşüş = 5

Eneji çıkışında en büyük düşüş = -5

Yapım maliyetinde sıfır düşüş = 0







Yapım maliyetinde en büyük artış = - 5

5.3. Yatay Eksenli ve Düşey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırması

Bu kısımda, YERT veya diğer bir adıyla pervaneli tip ve Darrieus tipi DERT karşılaştırılacaktır. Her iki tip deki makine için ileri tasarımlar üzerine odaklanarak rüzgar türbininin teknik özellikleri göz önüne alınarak karşılaştırma yapılacaktır.

Tablo 5.5 tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olarak çark performanslarını, çıkış gücü ve momenti gösterir. Buradaki tasarım parametreleri, çap, yükseklik (DERT için), süpürme alanı iki yatay eksenli çark ile, düşey eksenli çarklarla karşılaştırıldı. Bu tabloda gösterilen Darrieus çarkları farklı yükseklik / çap oranlarına sahiptir. Bu oranlar 1, 1.5, 2 ve 3 dür. Yükseklik/çap oranı 3 olan bir Darrieus çarkı “Artırılmış yükseklik çap oranı” (AYÇO) olarak bilinir (bazı FloWind türbinlerindeki gibi). Bu çark, 14.7m çapındaki yatay eksenli çark ile karşılaştırıldı. Her iki makine için 68 kW lık aynı çıkış gücü elde edildiği görüldü.

Tablo 5.5 DERT yükseklik / çap oranları (Paraschivoiu 2002).

		Çap (m)	H (m)	S (m ²)	d/d (1)	kW (2)	M (Nm)
	YERT	10	yok	79	95	31	3100
	DERT 1 :1	10	10	67	95	23	2300
	DERT 1.5 :1	10	15	100	95	34	3400
	DERT 1.8 :1	10	18	120	95	41	4100
	DERT 3 :1	10	30	200	95	68	6800
	YERT	14.7	yok	170	65	68	9960

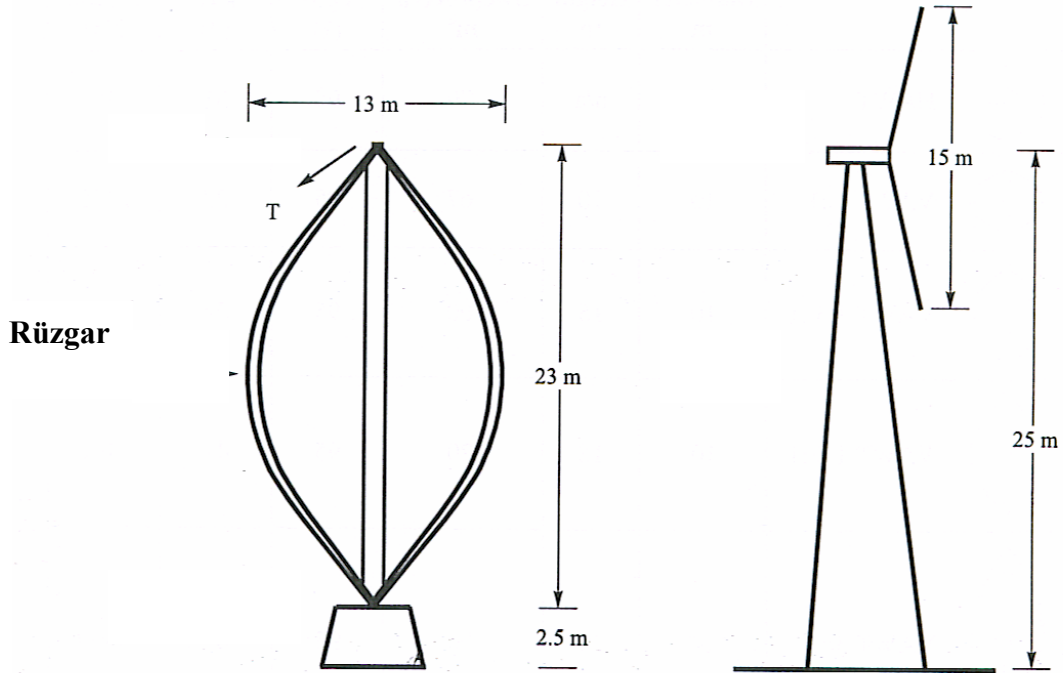
(1) d/d @ $R_{\omega} = 50$ m/s (2) kW @ 400 W/m² – YERT kW @ 340 W/m² – DERT

Tablo 5.6’da rüzgar türbinlerinin her iki tipi için üstünlüklerinin ve eksikliklerinin tartışması verildi.

Tablo 5.6 YERT ile DERT lerinin üstünlükleri ve sakıncaları (Paraschivoiu 2002).

YERT	
Üstünlükleri	Sakıncaları
<ul style="list-style-type: none"> • Bu seviyelerde meydana gelen oldukça yüksek rüzgar hızlarına maruz kalır. • Bunlarda genellikle serbest olarak duran kuleler kullanıldığından daha küçük yer alanı gerektirir. • Sabit hücum açısıyla sabit aerodinamik yüke sahiptir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kulenin tepesine tahrik mekanizması yerleştirmeyi gerektirir. • Tahrik mekanizması kulenin tepesine yerleştiğinden, daha ağır kuleleri gerektirir. • Pahalı ve zahmetli kanat ayar sistemi gerektirir. • Sıklıkla pahalı krenler kullanılarak yer seviyesinden yukarda bakım yapılır. • Yaygın olarak destek ve konsollar kullanılır. <ul style="list-style-type: none"> - Kanatlar üzerinde yüksek eğilme momentleri - Temel üzerinde yüksek devrilme momentleri • Kanat uçları ve tahrik mekanizması gürültüsü yüksek kulelerden dolayı yayılabilir.
DERT	
Üstünlükleri	Sakıncaları
<ul style="list-style-type: none"> • Yöne bağlı değildir. Döndürme teçhizatına gerek yok. • Yer seviyesinde tahrik mekanizmasına sahiptir. İşletme ve bakımı daha kolaydır. • Daha basit tasarım, kanat döndürme mekanizması yok. Kabloları azaltır. • Düşük maliyet kurulumu, (Devrilme momentlerinin düşürülmesinden ve daha düşük kule üstü kütesinden dolayı) • Konsollu kanat taşıyıcılarına sahip değildir. • Kanat uçları olmadığından ve tahrik mekanizması yer seviyesine monte edildiğinden daha sessizdir. • Tam keşfedilmemiş teknoloji maliyet düşüşleri için daha fazla potansiyel sunabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Çark hızını azaltan düşük bir çark yüksekliğine sahiptir. • En yüksek aerodinamik verim için daha düşük uç hız oranına sahiptir. Daha yüksek moment demek daha pahalı vites kutusu anlamına gelir • Germe tellerinden dolayı daha büyük alanı gerektirir. • Aerodinamik moment dalgalanmaları tahrik mekanizması üzerinde periyodik yüklemeler sağlar. • Daha uzun kanat ,YERT ‘in takriben 2 misli uzunluğunda .Kanatlar rüzgar türbini maliyetinde ana maddeyi teşkil eder.DERT ‘e göre düşük maliyetli kanatlar.

Şekil 5.3'de iki eşdeğer yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinleri boyutları verilmiştir.



	Türbin ölçüleri	
	DERT	YERT
D (m)	13	15
H (m)	23	yok
S (m ²)	204	176
N (d/d)	75	64
R ω (m/s)	51.2	50.4
P (kW)	70	70

Şekil 5.3 Eşdeğer DERT/YERT çark boyutları (Paraschivoiu 2002)

Buzlu koşullarda Darrieus tipi rüzgar çarklarının çalıştırılması özellikle soğuk kuzey iklimler için ilgi çekicidir. Çünkü hem kurulum hem de işletme ve bakım masrafları, yatay eksenli çarklara göre daha azdır. Yatay eksenli çarklarda hareket mekanizması kulenin üstündedir. Buzlu koşullarda düşey eksenli Darrieus çarkının uygulanması işletme güvenliği açısından da üstündür. Bütün bunlar göz önüne alınırsa, düşey eksenli çarklar sert soğuk iklimlerde parasal maliyetleri azaltır.

5.4 Düşey eksenli çarkların uygulanabilirliği

Modern Darrieus çarklarının araştırma ve geliştirilmesine devam edilmelidir. Düşey eksenli çarkların verimini artırmak için varolan eksikliklerin çözülmesi ve gelişen ilerlemelerin avantajlarından faydalanılmalıdır. Varolan eksikliklerin çözümüyle kastedilen düşey eksenli çarkları geliştirmek veya sakıncalarını önlemek için yeni tekniklerin geliştirilmesidir. Bunlar sırasıyla:

- Moment dalgalanması : değişken hız ; hafif tahrik mekanizması; çoklu kanatlar.
- Düşük çark yüksekliği: güç yükleme azaltılması
- Büyük kanat uzunluğu: yüksek hacim üretim teknikleri
- Düşük uç hız oranları: Çap/yükseklik oranları arttırılması

Artan gelişmelerin avantajı şunlardır:

- Aerodinamikler: $C_{p_{max}}$ geliştirilmesi; zararlı sürüklenmelerin azaltılması; kademeli kanatlar
- Malzemeler: hız arttırıcılar; kanat malzemeleri.
- Kütle / süpürme alanı azaltılması: yüklemelerin geliştirilmesinin anlaşılması

DERT ve YERT lerinin teknik durumlarını karşılaştırdıktan sonra Carl Brothers şu sonuçları elde etmiştir.

Yatay eksenli çarklar belki daha basit olabilir fakat bu hala bilinmiyor. Düşey eksenli çarkların kalıcı üstünlükleri ve gelişmemiş potansiyeli bu teknolojiyi geliştirmede zorlayıcı sebeplerdir. Düşey eksenli çarklar için küçük yatırımların büyük geri dönüşümleri olabilir. Her iki rüzgar çarkı gelişen rüzgar enerjisi endüstrisinde, geleneksel kaynaklarla rekabet etmede elektrik enerjisi üretimi bakımından kendi yerlerini muhafaza etmektedirler. Sonuç olarak rüzgar enerjisinin çevre dostu olduğu ve ekonomi için önemli bir ürün haline gelebileceği unutulmamalıdır (Brothers 1997).

6. DARRIEUS RÜZGAR ÇARKLARININ ÖRNEK HESABI VE BOYUTLANDIRILMASI

6.1 Darrieus Rüzgar Çarkının Basit Hesap ve Tasarımı

1994-2000 yılları arasında İzmir, Çeşme -Kocadağ'da 10m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı yaklaşık ~8 m/s için, 50 kW lık bir güce sahip, çapı yüksekliğine eşit 3 kanatlı bir Darrieus rüzgar türbini hesabı 1974'de Templin'in vermiş olduğu aşağıdaki basit tasarıma göre yapılmıştır.

Darrieus çarkı için güç denklemi, (4.46) denklemine göre hesaplanır.

$$P=0,25.S.V^3 \quad (4.46)$$

burada ;

P :Güç (W)

S : Çarkın süpürme alanı (m^2)

V : Rüzgar hız (m/s)

$$S=\frac{P}{0,25.V^3}=\frac{50000}{0,25.8^3}=390\text{ m}^2$$

olarak hesaplanır. R yarıçapında, H yarı yüksekliğinde bir Darrieus çarkı için süpürme alanı, $2R$ ve $2H$ lık bir alanın $2/3$ ü ile ifade edilir ve aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$S=\frac{8}{3}.R.H \quad (4.47)$$

buradan,

$$R.H=\frac{3.390}{8}=146\text{ m}^2; R=H \text{ kabul edildiğine göre,}$$

$$R^2=146 \text{ ve } R=12,08 \text{ m bulunur.}$$

Çarkın toplam yüksekliği $D=2R=H=24,16$ m bulunur.

$V=8$ m/s verildiğine göre ve devir sayısı $N=26$ d/d alınırsa, uç hız oranı:

$$\lambda=\frac{2.\pi.N.R}{60.V}=\frac{2.\pi.26.12,08}{60.8}=4,1 \text{ olarak bulunur.}$$

(4.46) denkleminle verilen güç bağıntısı; λ uç hız oranı ile ilişkili olup, bu uç hız oranı kanatların c kiriş uzunluğu ve kanat sayısına bağlı olarak (4.49) bağıntısı ile verilmiştir.

$$\lambda^2 = \frac{5.R}{b.c} \quad (4.49)$$

burada ;

R: Yarıçap (m)

b : Kanat sayısı

c: Kanat kiriş uzunluğu (m)

(4.49) denkleminde,

$$c = \frac{5.R}{b.\lambda^2} = \frac{5.12,08}{3.4,1^2} = 1,19m \text{ bulunur.}$$

NACA 0012 için kanat profilinin maksimum kalınlığı; kiriş uzunluğunun %12 sine eşittir (Le Gouieres 1982). Buradan;

$$\text{NACA 0012 için, kanat profilinin maks. kalınlığı} = 1,19 \cdot \frac{12}{100} = 0,14 \text{ m} = 14 \text{ cm}$$

$$\text{NACA 63(2)-215 için, kanat profilinin maks. kalınlığı} = 1,19 \cdot \frac{15}{100} = 0,17 \text{ m} = 17 \text{ cm}$$

bulunur (Pfleiderer ve Petermann 1978).

b = 3 kanat yerine , 2 kanat için kanat kiriş uzunluğu ve maksimum kanat profili kalınlığı hesabı yapılırsa ,

$$\lambda = \left(\frac{2.\pi.N.R}{60.V} \right) = \sqrt{\frac{5.R}{b.c}} = \frac{2.\pi.26.12,08}{60.8} = \sqrt{\frac{5.12,08}{2.c}} \text{ buradan,}$$

$$c = 1,79 \text{ m ve}$$

$$\text{NACA 0012 için, kanat profilinin maks. kalınlığı} = 1,79 \cdot \frac{12}{100} = 0,21 \text{ m} = 21 \text{ cm}$$

$$\text{NACA 63(2)-215 için, kanat profilinin maks. kalınlığı} = 1,79 \cdot \frac{15}{100} = 0,26 \text{ m} = 26 \text{ cm}$$

bulunur.

6.2. Ayrıntılı Hesaplama

Bu bölümde yarıçapı bir metre olan bir Darrieus rüzgar çarkı için zincir eğrisi (catenary), parabolik, ideal troposkien ve Sandia tipi kanat geometrileri için örnek tasarım hesabı yapıldı. Burada çap/yükseklik oranı $\beta=R/H=0.984$ alındı (Tablo 4.1).

Buna göre :

$$H = \frac{R}{\beta} = \frac{1}{0.984} \text{ den } H = 1.016 \text{ m olarak bulunur.}$$

S yaklaşık olarak çap ile yüksekliğin çarpımının 2/3 katına eşittir. (Paraschivoiu 2002)

$$S = \frac{2}{3} \cdot (2R) \cdot (2H) = \frac{2}{3} (2.1)(2.1,016) = 2,709 \text{ m}^2 \text{ yaklaşık olarak bulunur}$$

- Zincir eğrisi (catenary) için ; $\frac{S}{4.R.H} = 0.683$ alınır.

$$\begin{aligned} \text{Buradan } S_{\text{catenary}} &= 0,683 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,016 \\ &= 2,7757 \text{ m}^2 \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

(4.41) nolu güç denkleminde, değerler yerine konulursa;

$$\begin{aligned} P_{\text{catenary}} &= C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,250 \cdot 2,7757 \cdot 5^3 \\ &= 86,740 \text{ W,} \end{aligned}$$

- Parabol için ; $\frac{S}{4.R.H} = 0.667$ alınır.

$$\begin{aligned} \text{Buradan } S_{\text{parabol}} &= 0,667 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,016 \\ &= 2,7107 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{parabol}} &= C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,250 \cdot 2,7107 \cdot 5^3 \\ &= 84,709 \text{ W,} \end{aligned}$$

- İdeal troposkien için; $\frac{S}{4.R.H} = 0.657$ alınır.

$$\begin{aligned} \text{Buradan } S_{\text{ideal troposkien}} &= 0,657 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,016 \\ &= 2,67 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ideal troposkien}} &= C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,250 \cdot 2,67 \cdot 5^3 \\ &= 83,437 \end{aligned}$$

- Sandia için; $\frac{S}{4.R.H} = 0.657$ alınır.

$$\text{Buradan } S_{\text{Sandia}} = 0,657 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,016 \\ = 2,67 \text{ m}^2$$

$$P_{\text{Sandia}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,250 \cdot 2,67 \cdot 5^3 \\ = 83,437 \text{ W,}$$

- Magdalen için; $\frac{S}{4 \cdot R \cdot H} = 0,648$ alınır.

$$\text{Buradan } S_{\text{Magdalen}} = 0,648 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,016 \\ = 2,6335 \text{ m}^2$$

$$P_{\text{Magdalen}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,250 \cdot 2,6335 \cdot 5^3 \\ = 82,296 \text{ W, değerleri bulunur.}$$

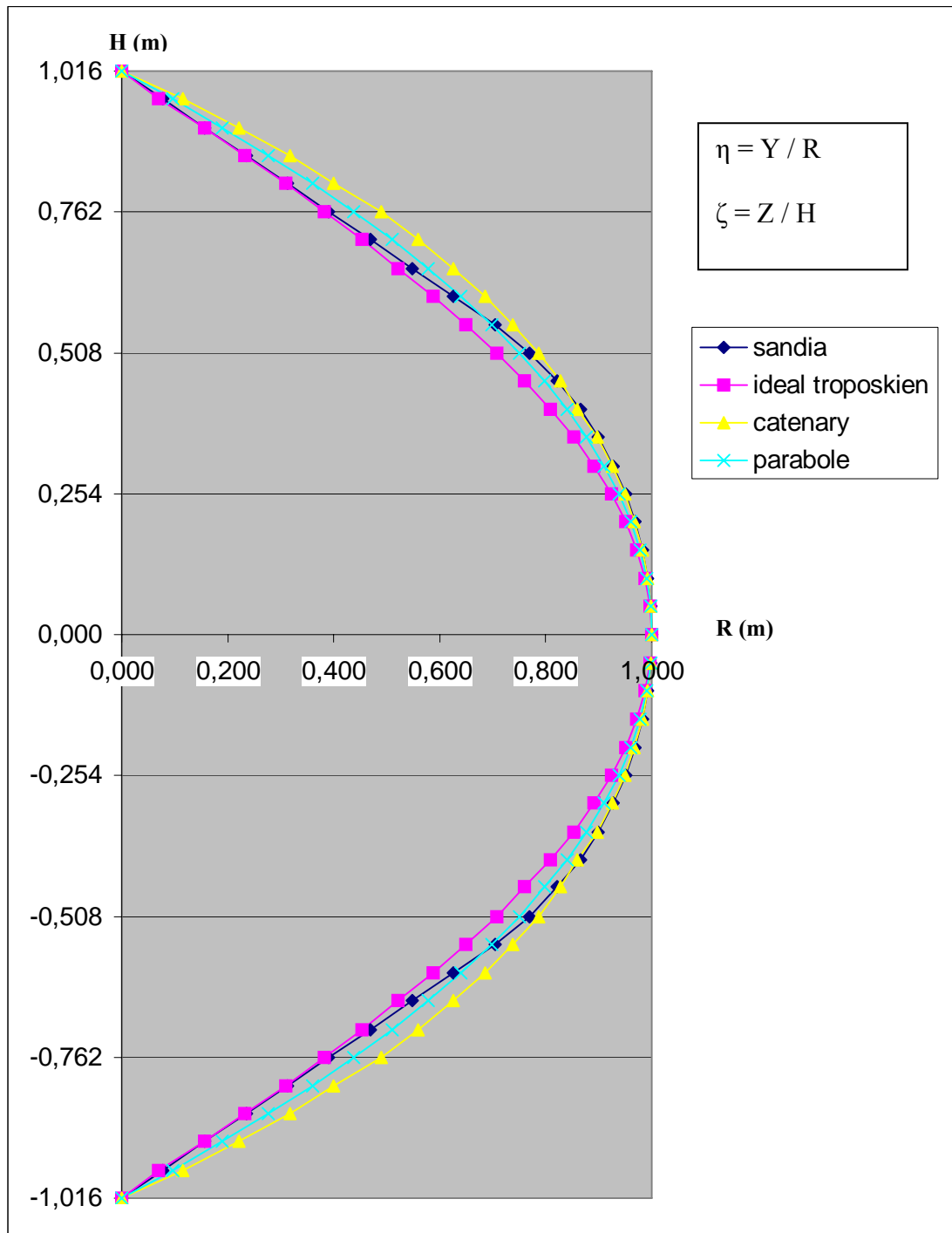
Buradan görüldüğü gibi, her ne kadar zincir eğrisi (catenary) ile Sandia tipi geometrisinin aynı değerler için yaklaşık ~ % 4 lük süpürme alanı azlığından dolayı güçte bu oranda bir düşüş söz konusudur, fakat yapım kolaylığı nedeniyle Sandia tipi geometrisi tercih edilir.

Her bir farklı kanat geometrisi için kanat boylarını hesaplamak için Tablo 4.1'den $\beta=0,984$ seçilerek hesaplar Tablo 6.1'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi en kısa kanadın Sandia olduğu görülür.

Tablo 6.1 Farklı kanat tipleri için kanat boylarının karşılaştırılması

Kanat Şekli	β	$H=R/\beta$ (m)	$K=\ell / 2H$	$\ell =2K.H$ (m)
Catenary	0,984	1,016m	1,483	3,013
Parabol	0,984	1,016m	1,467	2,980
İdeal Troposkien	0,984	1,016m	1,463	2,972
Sandia	0,984	1,016m	1,416	2,877

Tablo 4.2'deki boyutsuz koordinatlar yardımıyla çeşitli tipteki geometrilere ait kanat boyutları ; $R=1$ m ve $H=1.016$ m için hesaplanarak tablo 6.2'de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak excelde farklı kanat geometrilerinin değişimi şekil 6.1'de çizilmiştir.

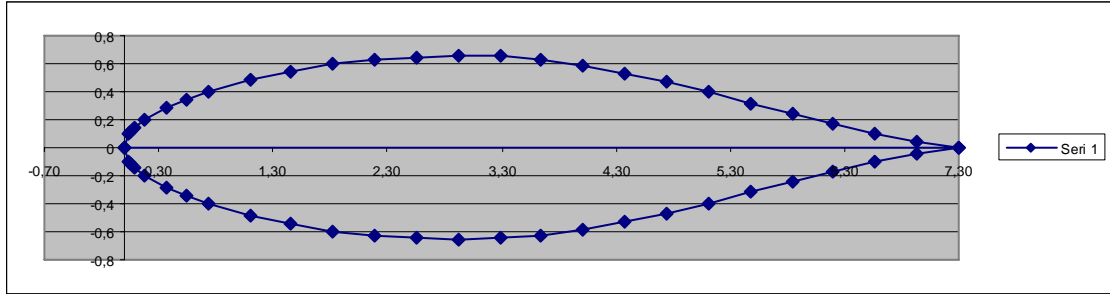


Şekil 6.1 Farklı tipteki kanat geometrileri

Tablo 6.3 NACA 65-018 kanat profili için eksen değerleri (Pfleiderer ve Petermann 1978)

Boyutsuz eksenel giriş uzunluğu X	$X_{\text{gerçek}} = C \cdot X$ $C / R = 0.073$ R=1 için C= 0.073 m C= 7.3 cm	Boyutsuz kanat yüksekliği Yüst	$Y_{\text{gerçek}} = C \cdot Yüst$ $C / R = 0.073$ R=1 için C= 0.073 m C= 7.3 cm
0	0	0	0
0.5	0,0365 cm	1.337	0,097 cm
0.75	0,05475	1.608	0,117
1.25	0,09125	2.014	0,147
2.5	0,1825	2.751	0,2
5	0,365	3.866	0,28
7.5	0,5475	4.733	0,346
10	0,73	5.457	0,398
15	1,095	6.606	0,482
20	1,46	7.476	0,546
25	1,825	8.129	0,593
30	2,19	8.595	0,627
35	2,555	8.886	0,649
40	2,92	8.999	0,657
45	3,285	8.901	0,65
50	3,65	8.568	0,625
55	4,015	8.008	0,585
60	4,38	7.267	0,53
65	4,745	6.395	0,467
70	5,11	5.426	0,396
75	5,475	4.396	0,321
80	5,84	3.338	0,244
85	6,205	2.295	0,168
90	6,57	1.319	0,096
95	6,935	0.490	0,036
100	7,3 cm	0	0

Tablo 6.3'deki değerler kullanılarak, sabit profil durumu için her bir kesitteki NACA 65-018 kanat profili için kanat kesiti Şekil 6.2'de çizilmiştir.

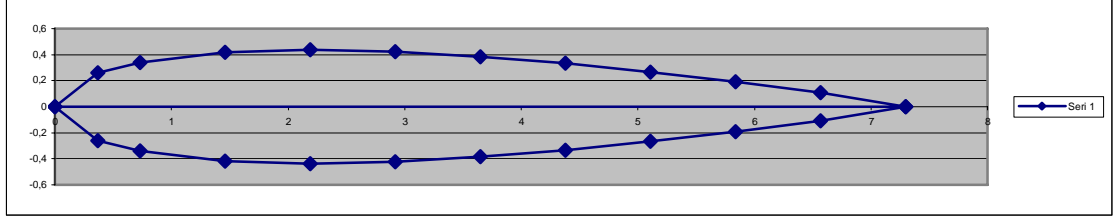


Şekil 6.2 NACA 65-018 kanat profili

Tablo 6.4 NACA 0012 Kanat Profili için eksen değerleri (Le Gouieres 1982)

Boyutsuz aksel giriş uzunluğu X	$X_{gerçek} = C \cdot X$ $C / R = 0.073$ $R=1$ için $C=0.073$ $C= 7.3$ cm	Boyutsuz kanat yüksekliği Yüst	$Y_{gerçek} = C \cdot Yüst$ $C / R = 0.073$ $R=1$ için $C=0.073$ $C= 7.3$ cm
0	0	0	0
0.05	0,365	3.56	0,26
0.1	0,73	4.68	0,3416
0.2	1,46	5.74	0,419
0.3	2,19	6	0,438
0.4	2,92	5.80	0,423
0.5	3,65	5.29	0,386
0.6	4,38	4.56	0,333
0.7	5,11	3.66	0,267
0.8	5,84	2.62	0,19
0.9	6,57	1.45	0,106
1	7,3 cm	0	0

Tablo 6.4'deki değerler kullanılarak, sabit profil durumu için her bir kesitteki NACA 0012 kanat profili için kanat kesiti Şekil 6.3'de çizilmiştir.



Şekil 6.3 NACA 0012 kanat profili

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de görüldüğü gibi NACA 0012 kanat profilinin daha ince olduğu görülmektedir. Bu durum kanat ağırlığı bakımından üstünlük gibi görülsede kanadın şiddetli rüzgar durumlarında mukavemeti açısından sakıncalı olabilir. Bu durumlarda, rüzgar çarkının kurulacağı yerin rüzgar şiddetinin de göz önünde bulundurulması gerekir.

7. SONUÇ VE İRDELEME

Dünyadaki fosil enerji kaynaklarının tükenmesi ve artan nüfus karşısında ve aynı zamanda gelişen teknoloji ile enerji ihtiyacındaki talebinde artması sonucu yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma gündeme gelmiş ve bu konuda araştırmalara hız verilmiştir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi ve uygulamalarından biri olan Darrieus çarkının farklı tiplerinin geometrileri incelenmiş ve bunların içerisinde kolay uygulanabilir tipler ve hesapları üzerinde durulmuştur.

Rüzgar enerjisinin tarihçesi Dünyadaki ve ülkemizdeki gelişmeler anlatılmış ve mevcut rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması yapılmıştır. İnceleme konusu olan Darrieus rüzgar türbinleri üzerinde yapılan araştırmalar ve tesisler tanıtılmış ve bunlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Kanat profilleri geometrisi ve performansı ile ilgili bilgiler verilmiş, çeşitli Darrieus tipi çarklar tanıtıldıktan sonra bu türbinlere ait moment ve güç bağıntıları üzerinde durulmuştur.

Darrieus rüzgar türbinlerinin gelecekteki tasarımları ile ilgili gerek imalat ve gerekse maliyet bakımından birçok kısıtlayıcı faktörlerin olmasının ötesinde; kullanılan malzeme, kanatların sayısı, çarkın hızı ve sistemin kurulumuyla ilgili birçok faktörlerde etkindir.

Yatay ve düşey eksenli rüzgar çarklarının üstünlükleri ve sakıncaları Tablo 5.5 de verilmiş ve bunlarla ilgili karşılaştırmada Tablo 5.6 da verilmiştir.

Bölüm 6'da, Darrieus rüzgar çarklarının performans ve boyutlandırılması ile ilgili hesaplar ayrıntılı olarak verilmiştir. Öncelikle J.Templin tarafından verilen yaklaşık hesap yöntemleri kullanılarak güç ve kanat boyutlarıyla ilgili basit hesap yöntemleri tanıtılmıştır. Daha sonra, Darrieus çarkının gelişmiş tasarım yöntemleri ve geometrileri ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiş ve buradaki temel bağıntılar kullanılarak kanatların biçimini oluşturan hesaplar yapılmış ve bunların süpürme alanları, kanat uzunlukları ile ilgili hesaplar yapılmıştır. Bu kanat tipleri içerisinde süpürme alanı açısından en büyük güç; zincir eğrisi (catenary) tipi ile elde edilmiş olmasına karşın yapım kolaylığı bakımından Sandia tipi daha çok tercih edilmektedir.

Bu bölüm sonunda yukarıda adı geçen kanat geometrileri çizilmiş, bu kanat geometrileri ile ilgili karşılaştırma yapıldıktan sonra NACA 65-018 ve NACA 0012 kanat profilleri için hesaplar yapılmış Tablo 6.3 ve Tablo 6.4 deki değerlere göre, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 de kanat profil kesitleri çizilmiştir. Şekil 6.3 deki kanat profili ince kesit alanına sahip olduğundan Şekil 6.2 deki kanat profiline göre daha hafiftir. Dolayısıyla mukavemeti yüksek bir malzeme seçilirse kanatların bu profilde yapılması daha uygun olacağı görülmektedir. Fakat rüzgar hızının yüksek olduğu yerlerde Şekil 6.2 deki NACA 65-018 Kanat profiline seçimi mukavemet açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akins, R.E. (1989) Measurements of Surface Pressures on an operating Vertical Axis Wind Turbine. Sandia National Laboratories, **Sand** 89-7051
- Ashwill, T. D., and Leonard, T.M. (1986) Developments In Blade Shape Design for a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine. **Sand** 86-1085, s 7-14
- Ashwill, T.D. (1991) Measured Data for Sandia 34-Meter Vertical Axis Wind Turbine. Sandia National Laboratories, **Sand** 91-2228
- Atılğan, M. (1995). Yenilenebilir Enerji Kaynakları, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** Ders Notları, Denizli
- Berg, D.E. (1985) Structural Design of the Sandia 34 –Meter Vertical Axis Wind Turbine. **Sand** 84-1287, 23s
- Blackwell, F, Sheldahl R.E. and Feltz L.V., (1977) Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades. **Sand** 76-0130,61s
- Blackwell, F, Sheldahl R.E. and Feltz L.V., (1980) Aerodynamic Performance of a 5 metre Diameter Darrieus Turbine with Extruded Aluminum NACA-0015 Blades. **Sand** 80-0179, 41s
- Brothers, C. (1997) HAWTs and VAWTs-Myths and Facts, **Atlantic Wind Test Site Inc.**, Prince Edward Island, Canada
- DAF, İ. (1984) Technology Development Study of Vertical Axis Aerogenerator Systems Yielding the Lowest Cost of Energy, **Final Report**, National Research Council of Canada, SSC 31155-0-4605
- David, A.S. (1994) Fundamental Concepts of Wind Turbine Technology, **ASME**, T94-605, ABD, s 98-173
- Deda, B. (2000) Savoniu Rüzgar Enerjisi ve Savonius Rüzgar Çarklarının Performanslarının Arttırılması., Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 100s.
- Deniz, M.(2002) Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Türkiye Enerji İhtiyacına Katkısı., Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 130s.
- Dombaycı, Ö.A. (2001) Isparta Yöresi Rüzgar Potansiyeline Uygun Darrieus ve Savonius Rüzgar Jeneratörlerinin Tasarım Parametrelerinin Tespit Yöntemleri, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta,120s.

- Grover, R.D. and Veneruso A.F (1977) "Sandia Vertical Axis Wind Turbine Program Technical" **Quarterly Report**, Kanada
- Johnson, G.L. (2001) Wind Energy Systems, **Prentice Hall**, ABD
- Kadlec, E.G. (1978) Characteristics of Future Vertical Axis Wind Turbines, **Sand** 78-1068
- Karadereli, S (1995). Türkiye ve AB'de Rüzgar Enerjisi, **TODAİE**, Ankara
- Karadereli, S. (2001). Rüzgar Enerjisi, **EİE Genel Müdürlüğü**, Ankara,46s.
- Le Gourieres, D. (1982). Wind Power Plants Theory and Design, **Pergamon Pres Ltd**, Headingtan Hill Hall Oxford OX30BW, England, 285s.
- Malcolm, D. and Schienbein, L. (1995) Status of Darrieus Rotor, **Private Communication**
- Manwell, J. F., and Rogers, A. L. (2002). Wind Energy Explained Theory, Design and Application, **John Wiley Sons Ltd**, İngiltere, 576s.
- Musgrove, P. J., and Clare R. (1987) Development of the U.K Vertical Axis Wind Turbine", **Proceedings of the Windpower**, Washington, s. 28-34.
- Paraschivoiu, I. (2002). Wind Turbine Design With Emphasis On Darrieus Concept, **Polytechnic International Pres**, Kanada, 440s.
- Pfleiderer, C. and Petermann (1978) Akım Makineleri, 124, **İTÜ Yayınları**, Kaan Ediz-Yavuz Tekin, İstanbul, s 425-459
- Reis, G.E and Blackwell, B.F.(1974) Blade Shape for a Troposkien Type of Vertical-Axis Wind Turbine. **SLA -74-0154**,25s
- Reis, G.E and Blackwell, B.F. (1975) Practical Approximations to a Troposkien by Straight-Line and Circular-Arc Segments. **Sand** 74-0100, 35s.
- Richards, B. (1987) Initial Operation of Project Eole 4MW Vertical Axis Wind Turbine Generator", **Windpower 87**, San Francisco.
- Richards, B. (1988) Project Eole Update", **8th Annual VAWT Aerodynamics Seminar**, Texas.
- Shawinigan Engineering Company Limited, (1978) Design Study; Large Capacity Vertical Wind Turbine Generators- Follow on Work, **SECL Report No. 5800-00-2-78**
- Solt, T.S. (1992) Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Structural Life Management at Flowind Corporation", **11th ASME Wind Energy Symposium**, Houston.

- South, P., and Rangi, R. S. (1975) An Experimental Investigation of a 12-Ft Diameter High Speed Vertical-Axis Turbine. **National Research Council of Canada**, LTR-LA-166
- Sullivan, W. N., (1979) Economic Analysis of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Systems for the Generation of Utility Grid Electrical Power. **Sand 78-0962**
- Şevik, R. (2002) Laboratuvar tipi Darrieus rüzgar türbini tasarımı, imalatıve performans ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 60s
- Taylor, D. (2004) Wind Energy, Renewable Energy, Godfrey Boyle, **Oxford University Press**, İngiltere, s267-314
- Templin, R.J. (1974) “Aerodynamic Performance Theory for NRC Vertical Axis Wind Turbine”, **Report Ltr La 160**, NRC, Kanada
- WEB_1.(2006) European Wind Energy Association, <http://www.ewea.org/> (15.05.2006)
- WEB_2.(2006) Sandia National Laboratories, Vertical Axis Wind Technology <http://www.sandia.gov/wind/topical.htm#VAWTARCHIVE> (18.1.2006)
- WEB_3.(2006) Wikipedia http://tr.wikipedia.org/wiki/Resim:Coriolis_effect14.png
- Weingarten, L.I and Blackwell, B.F. (1976) “Sandia Vertical Axis Wind Turbine Program Technical Quarterly Report”, Kanada, **Sand 76-0338**
- Worstell, M.H. (1982) Aerodynamic Performance of the 17-M-Diameter Darrieus Wind Turbine in the Three-Bladed Configuration:An Addendum. **Sand 79-1753**, s 1-11
- Yerebakan, M. (2001). Rüzgar Enerjisi, **İstanbul Ticaret Odası, 2001-33**, İstanbul, 176s

ÖZGEÇMİŞ

Adı, soyadı : Ali Barlas Atlıhan

Doğum yeri ve tarihi : Denizli- 14.07.1980

Lisans Eğitimi ve mezuniyet tarihi : Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği
2003