

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DARRIEUS TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI



Onur ŞAMDAN

Eylül, 2016

İZMİR

DARRIEUS TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı



Onur ŞAMDAN

Eylül, 2016

İZMİR

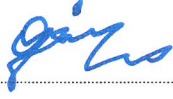
YÜKSEK LİSANS TEZİ SONUÇ FORMU

ONUR ŞAMDAN, tarafından DOÇ.DR. ALPASLAN TURGUT yönetiminde hazırlanan “DARRIEUS TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



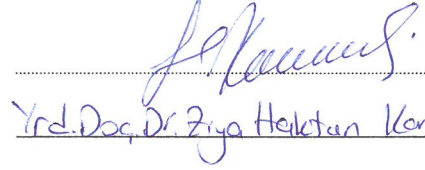
Doç. Dr. Alpaslan TURGUT

Yönetici



Prof. Dr. Binnur GÖREN KIRAL

Juri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Ziya Heleketan Karadeniz

Juri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın baőlangıcından bitimine kadar her aşamada beni destekleyen, hayallerime ve fikirlerime inanan, motivasyonumu arttıran, beni yönlendiren, bilgilendiren, tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Alpaslan TURGUT hocama, aynı Şekilde tüm süreçlerde yanımda olan, manevi ve bilgi desteğini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Ziya Haktan KARADENİZ hocama tüm itenlikleri ile beni daha güçlü kıldıkları için sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Belirtmek isterim ki, bu çalışma giriőimci bir ruhun sektörün ihtiyaına yönelik kurduğu bir hayal ile baőladı. Bu hayalin peőinde benimle birlikte koőan ve dostluğun getirdiği g ile ilerlememi sağlayan ortaklarım Abdullah HEPBANDIRMALI ve Burak KAPLAN'a da çok teşekkür ederim.

Son olarak tüm yaőanılan süreçlerde bana inanan, aldığım kararlara saygı gösterip beni hem maddi hemde manevi olarak destekleyen, yardım eden, bana olan inançları sayesinde en sıkıntılı zamanlarımda bile toparlanmamı sağlayan aileme de sonsuz teőekkürler.

Bu alıőma T.C Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın TEKNOGİRİŐİM destek programı kapsamında (0316.TGSD.2014 proje nosu ve Yerli Dikey Eksenli Rüzgar Türbini adıyla) desteklenmiő ve baővurumuz onay olarak SONENSİS A.Ő adlı firmamız faaliyete geçmiőtir.

Onur ŞAMDAN

DARRIEUS TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

ÖZ

Artan enerji kullanımı nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Türkiye rüzgar enerjisi açısından çok verimli topraklara sahip bir ülkedir. Bu nedenle son yıllarda rüzgar enerjisine olan yatırımlar artmıştır. Rüzgar enerjisi yatırımlarında çoğunlukla yatay rüzgar türbinleri tercih edilmektedir.

Şehir merkezleri incelendiğinde rüzgar akışının türbülanslı ve rüzgar yönünün sık sık değiştiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle yatay rüzgar türbinleri şehir içerisinde istenilen performansı gösteremezler. Ancak dikey rüzgar türbinleri her yönden gelen rüzgar ile dönebildikleri, türbülanslı hava koşullarına dayanıklı olmaları ve sessiz çalışmalarından dolayı şehir içi kullanımlarında yatay eksenlilere göre çok daha avantajlıdır. Yatayların, hakim rüzgar yönünde dikey eksenlilere göre daha verimli olduğu belirlendikten sonra dikey eksenli rüzgar türbinlerinin gelişimi yavaşlamıştır. Günümüzde, yatay rüzgar türbinlerinin araştırılması ve geliştirilmesinde belirli bir doygunluğa ulaşılmıştır. Bu nedenle son on yılda dikey eksenli rüzgar türbinleri üzerine yapılan araştırmaların ve bilimsel yayınların giderek arttığı gözlemlenmektedir.

Bu çalışmada, şehir içindeki rüzgar potansiyelinden faydalanmak üzere her yönden gelen rüzgar ile dönüş sağlayabilen Darrieus tipi rüzgar türbini tasarımı üzerinde durulmuştur. Çalışmada, öncelikle Türkiye'nin enerji görünümü hakkında bilgiler sunulmuş, ardından dikey eksenli rüzgar türbinleri hakkında bilgiler verilmiş ve türbin üzerine etkiyen kuvvetler teorik olarak açıklanmıştır. Yapılan ön araştırmalardan sonra literatürde Darrieus tipi olarak adlandırılan dikey eksenli rüzgar türbinlerinin tasarım kriterleri hakkında detaylı bilgiye sahip olunmuştur. Belirlenen tasarım kriterleri ile 3 kilowatt kapasiteli Darrieus tipi rüzgar türbini tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar enerjisi, dikey eksenli rüzgar türbini, NACA0018 kanat profili, türbin tasarım parametreleri

DESIGN OF DARRIEUS TYPE WIND TURBINE

ABSTRACT

Interest in the renewable energy sources is increasing day by day due to the increment of the energy consumption. Turkey has high potential lands for wind energy. Therefore, investments in wind energy has increased in recent years. For wind energy investments, mostly horizontal wind turbines are preferred.

Considering the wind potential in city centres, generally it is observed that, the turbulence and wind direction of the wind flow change frequently. Therefore, horizontal wind turbines cannot show the desired performance, in the city centers. However, due to rotatable with the wind coming from all directions, resistant to air turbulence and silence of the rotation, vertical axis wind turbines have much more advantages than the horizontal wind turbines in urban use. Once it was shown that the predominant wind direction is more efficient for horizontal wind turbines than the vertical ones, the development of vertical axis wind turbines have been slowed down. Research and development of horizontal wind turbines has almost reached the saturation. For this reason, vertical axis wind turbine's research and scientific publications are increasing gradually in the last decade.

This study focused on the Darrieus type of wind turbine because of the ability of rotatable with the wind coming from all directions for benefit from the wind potential in the cities. Firstly, information on the energy outlook in Turkey is presented, after that information on the vertical axis wind turbines is provided and forces acting on the turbine are described theoretically. After the preliminary investigation, knowledge of the detailed design criteria has acquired for vertical axis wind turbine. 3 kilowatt capacity Darrieus-type wind turbine is designed and made with the specified design criteria.

Keywords: Wind energy, vertical axis wind turbine, NACA0018 airfoil , turbine design parameters

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Türkiye'nin Enerji Görünümü.....	1
1.2 Rüzgar Enerjisi.....	2
1.2.1 Dünya'da Rüzgar Enerjisi	2
1.2.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi	3
1.2.3 Türkiye Rüzgar Potansiyeli Atlası	6
1.3 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)	11
1.3.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Çeşitleri	11
1.3.1.1 Savonius Tipi Rüzgar Türbinleri.....	12
1.3.1.2 Lafond Tipi Rüzgar Çarkları.....	13
1.3.1.3 Panemone Tipi Rüzgar Türbinleri.....	13
1.3.1.4 Darrieus Rüzgar Türbinleri	14
1.3.2 Dikey Rüzgar Türbinleriyle İlgili Akademik Çalışmalar.....	16
1.4 Çalışmanın Amacı.....	17

BÖLÜM İKİ - RÜZGAR TÜRBİNİNDE KANAT PROFİLİ GEOMETRİSİ VE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLER 18 |

BÖLÜM ÜÇ - RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM KRİTERLERİ 26 |

3.1 Kanat Uç Hız Oranı.....	27
3.2 Güç Katsayısı	27

3.3 Türbin Tarama Alanı ve R/H Oranı	28
3.4 Kanat Şekli ve Veter Uzunluğu.....	30
3.5 Kanat Sayısı	31
BÖLÜM DÖRT - DİKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE ANALİZLERİ.....	34
4.1 Teorik Tasarım Hesabı.....	34
4.2 Yataklama Hesabı	38
4.3 Kompozit Kanat Analizi ve İmalatı	44
4.3.1 Kanat Üzerine Etkiyen Basınç Dağılımları.....	44
4.3.2 Statik Analizler.....	48
4.3.3 Türbin İmalatı.....	53
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR.....	55
KAYNAKLAR	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 2016 yılı mart sonu elektrik üretiminde kaynakların dağılımı.....	1
Şekil 1.2 Türkiye'nin kurulu güç bazında enerji kaynaklarının dağılımı	2
Şekil 1.3 Kurulu rüzgar gücü olarak Dünya'daki 20 lider ülke	3
Şekil 1.4 Türkiye Rüzgar enerji santrallerinin yıllık kurulum değerleri	4
Şekil 1.5 Türkiye rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı	5
Şekil 1.6 İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı.....	5
Şekil 1.7 İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı	6
Şekil 1.8 Türkiye rüzgâr atlası	7
Şekil 1.9 Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (REPA)	8
Şekil 1.10 REPA' da noktasal rüzgar verilerinin Weibull diyagramı ve rüzgar gülü grafiği olarak gösterimi.....	10
Şekil 1.11 Savonius rüzgar çarkı.....	12
Şekil 1.12 Lafond rüzgar türbini	13
Şekil 1.13 Panemone tipi rüzgar türbinleri	14
Şekil 1.14 Parabolik ve konik Darrieus rüzgar	15
Şekil 1.15 H-Darrieus ve helisel tip rüzgar türbini	15
Şekil 2.1 Kanat üzerindeki akış ve kanat profili	18
Şekil 2.2 Örnek kanat profili.....	19
Şekil 2.3 Kanat üzerine etkiyen rüzgar hız bileşenlerinin gösterimi	20
Şekil 2.4 Kanat profilindeki basınç alanları	21
Şekil 2.5 Kanat üzerinde oluşan kuvvetler	22
Şekil 3.1 Üç farklı tip rüzgar türbininin kanat uç hız oranı ve verim eğrileri.....	28
Şekil 3.2 H/R oranının türbin performansına olan etkisi	29
Şekil 3.3 Farklı kanat profillerinin performans karşılaştırması	31
Şekil 3.4 Farklı kanat sayısındaki H tipi rüzgar türbinlerinin güç eğrileri	32
Şekil 3.5 Farklı kanat sayısındaki türbinlerin C_p ve λ eğrileri	32
Şekil 3.6 Aynı Reynold sayısı farklı katılık değerlerindeki türbinlerin güç eğrileri..	33
Şekil 4.1 NACA0018 farklı Reynold sayılarındaki verim eğrileri	35
Şekil 4.2 Türbin gövde modellemesi	39

Şekil 4.3 . 0, 45, 90 derecedeki akış görünümü	45
Şekil 4.4 0, 45 ve 90 derecedeki kanat yüzeyinde oluşan basınç değişimi.....	46
Şekil 4.5 0-15 mm veter uzunluğu arasında oluşan basınç etki yüzeyi	48
Şekil 4.6 0 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehim grafikleri.....	50
Şekil 4.7 45 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehim grafikleri.....	51
Şekil 4.8 90 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehim grafikleri.....	52
Şekil 4.9 a) XPS köpük kanat, b) kanat iskeleti, c) boyalı kompozit kanat.....	54
Şekil 4.10 Bitmiş rüzgar türbini	54



TABLolar LİSTESİ

Sayfa

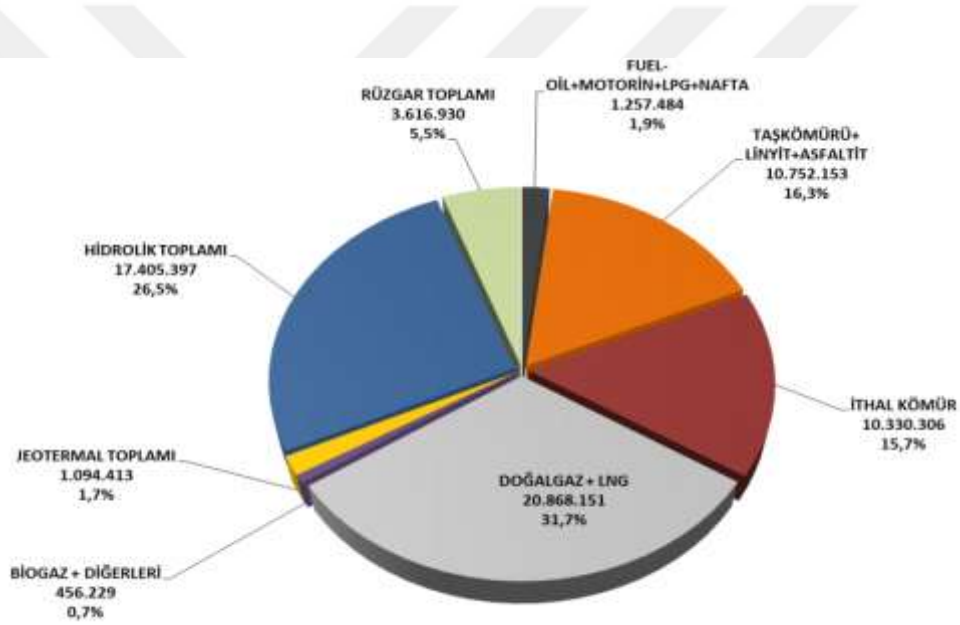
Tablo 4.1 Teorik tasarım kriterleri ve hesaplama sonuçları.....	37
Tablo 4.2 A ve B rulmanlarının teknik özellikleri	40
Tablo 4.3 Dinamik yükün hesabında kullanılan aksenal kuvvetin hesaplanması.....	41
Tablo 4.4 Eşdeğer dinamik ve statik yük hesaplama formülleri	42
Tablo 4.5 Basınç diyagramlarından elde edilmiş basınç denklemleri.....	47
Tablo 4.6 Cam elyaf / epoksi malzeme özellikleri	49
Tablo 4.7 Analiz sonuçlarının karşılaştırılması	53



BÖLÜM BİR GİRİŞ

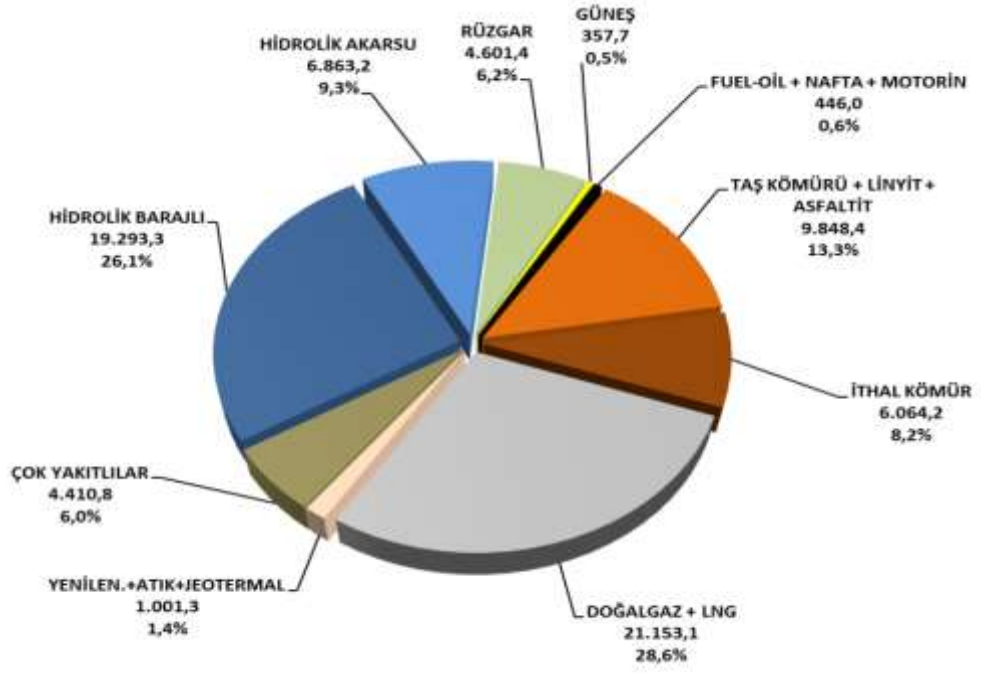
1.1 Türkiye'nin Enerji Görünümü

Kaynaklar açısından bakıldığında, 2016 yılı Mart Sonu itibariyle, toplam elektrik üretiminin 65.781.064 MWh olmuş olup, bu üretimin % 31,7'si doğalgaz, % 26,5'i hidrolik kaynaklar, % 16,3'ü (taşkömürü+linyit+asfaltit), % 15,7'sinin ithal kömür, % 5,5'nin rüzgar, %1,9'nun (fuel oil+motorin+LPG+nafta), %1,7'sinin jeotermal, %0,7'nin (biogaz ve diğerleri) tarafından üretildiği görülmektedir. Şekil 1.1'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 1.1 2016 yılı mart sonu elektrik üretiminde kaynakların dağılımı (Elektrik Mühendisleri Odası [EMO], 2016)

2016 yılı mart ayı sonunda Türkiye'nin kurulu gücü 74.039,4 MW'a ulaşmıştır. Kurulu güç bazında enerji kaynaklarının dağılımı Şekil 1.2'deki grafikte verilmiştir.

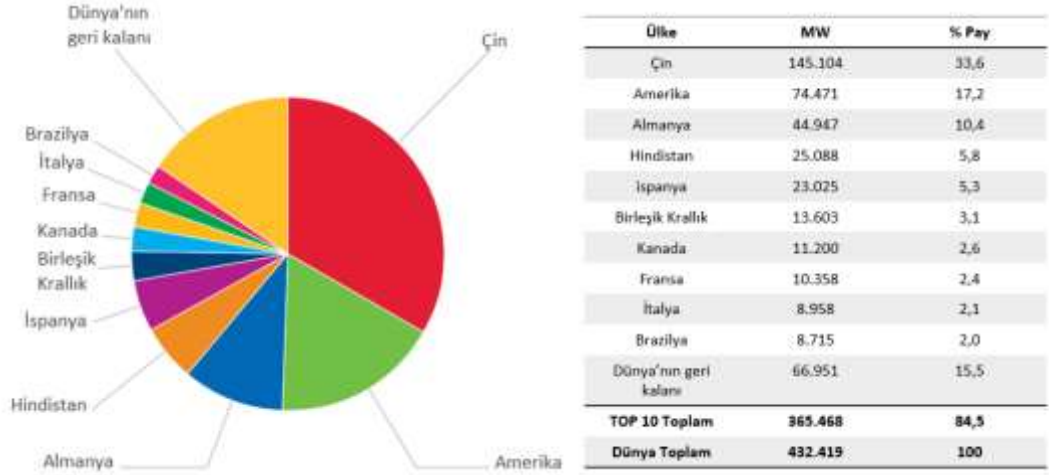


Şekil 1.2 Türkiye'nin kurulu güç bazında enerji kaynaklarının dağılımı (EMO, 2016)

1.2 Rüzgar Enerjisi

1.2.1 Dünya'da Rüzgar Enerjisi

Birçok ülke kurulu elektrik gücünü arttırmak amacı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisini kullanmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde bulunan 44 ülke bulunmaktadır. Bu ülkeler arasında 2015 verileri incelendiğinde 145.104 MW ile birinci konumda olan ülke Çin'dir. Çin'den sonra ikinci ülke olarak 74.471 MW kurulu güç ile ABD yer almaktadır. Üçüncü ülke ise 44.947 MW kurulu güç ile Almanya'dır. Dünya'da rüzgar enerjisi üretiminde bulunan lider 10 ülkeye ait kurulu güç verileri Şekil 1.3'de belirtilmiştir.



Şekil 1.3 Kurulu rüzgar gücü olarak Dünya'daki 20 lider ülke (Global Wind Energy Council, 2016)

1.2.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

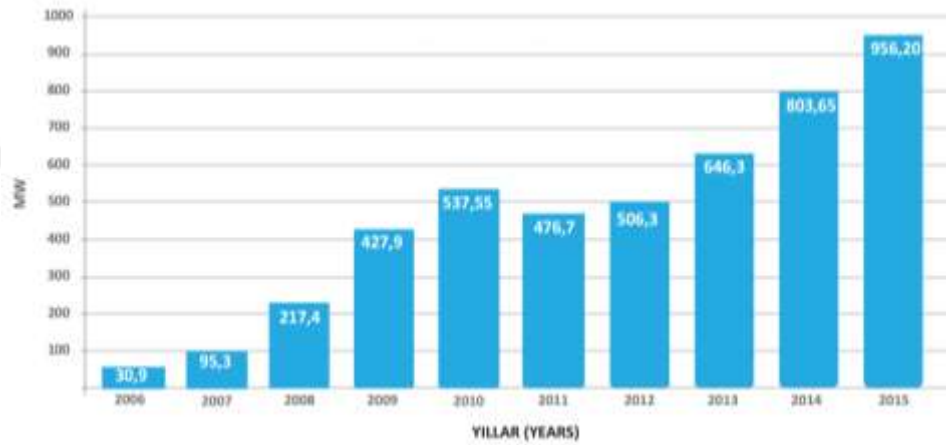
Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde ekonomik gelişmeye paralel olarak enerji ihtiyacı ve tüketimi giderek artmaktadır. Elektrik, günlük hayatımızın birçok alanında vazgeçilemez parçası haline gelmiştir. Bu nedenle elektrik tüketimi, ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önemli göstergelerinden biri olarak belirtilmektedir. Diğer bir ifadeyle elektrik kullanımının her alanda yaygınlığı ve tüketimindeki artışlar, toplumun refah artışının da bir göstergesi niteliğindedir (Ağır ve Kar, 2010).

“Nüfus artışı, kentsel gelişim ve sanayileşmeye paralel olarak dünya birincil enerji tüketimi de giderek artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasına neden olan temel etkenlerin başında nüfus ve gelir artışı gelmektedir. Yapılan projeksiyonlar, 2030 yılında dünya nüfusunun 8,3 milyara yükseleceğini göstermektedir. Bu durum, 1,3 milyar insana daha enerji arzı sağlanması gerektiğini ortaya koymaktadır” (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2014, s.3).

Fosil kaynakların tükeniyor olması bilinen bir gerçektir. Ayrıca elektrik üretiminde kullanılan bu kaynaklar çevreyi olumsuz olarak etkilemektedirler. Bu nedenle 21. yüzyılda yenilenebilir enerji kaynakları her zamankinden daha çok önemli hale gelmiştir.

Türkiye İstatistik Kurumu'nun çalışmalarına göre; yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim oranları sırasıyla 2000-2006 yılları arasında %0,3 değerindeyken 2009 yılında %1,2 ile artışa geçmiş olup 2010 yılında %1,9, 2011 yılında %2,6, 2012 yılında %3,1, 2013 yılında %4,2, 2014 yılında %4,9 olarak belirlenmiş ve artışın devam ettiği gözlemlenmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu [TUİK], 2015).

Görüldüğü üzere yenilenebilir enerji sektörü Türkiye'de yeni gelişmekte ve giderek artmaktadır. Son yıllarda, Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Santralleri [RES] 'lerin yaygınlaşmasına yönelik ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Şekil 1.4'de yapılan çalışmaların bir yansıması olarak yıllara göre RES yıllık kurulum değerleri görülebilmektedir. Şekil 1.5'de Türkiye rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı incelenebilmektedir.

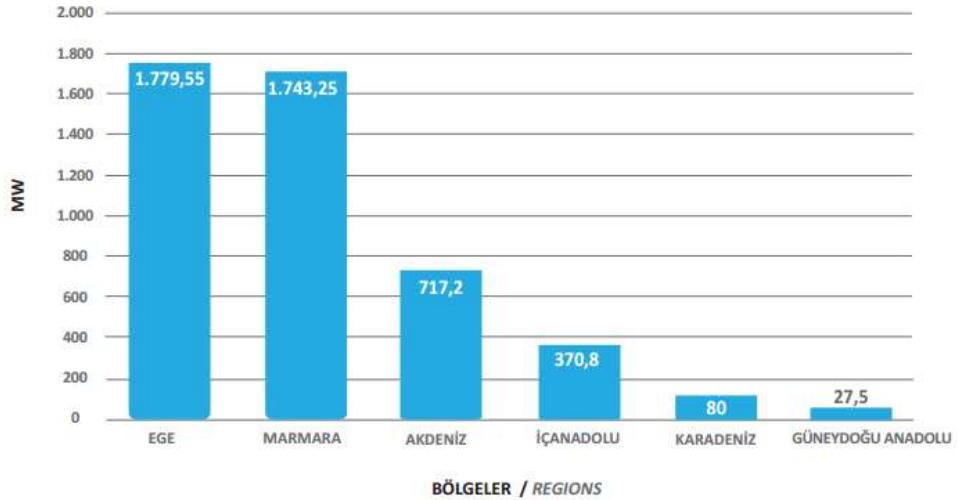


Şekil 1.4 Türkiye rüzgar enerji santrallerinin yıllık kurulum değerleri (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği [TUREB], 2016)



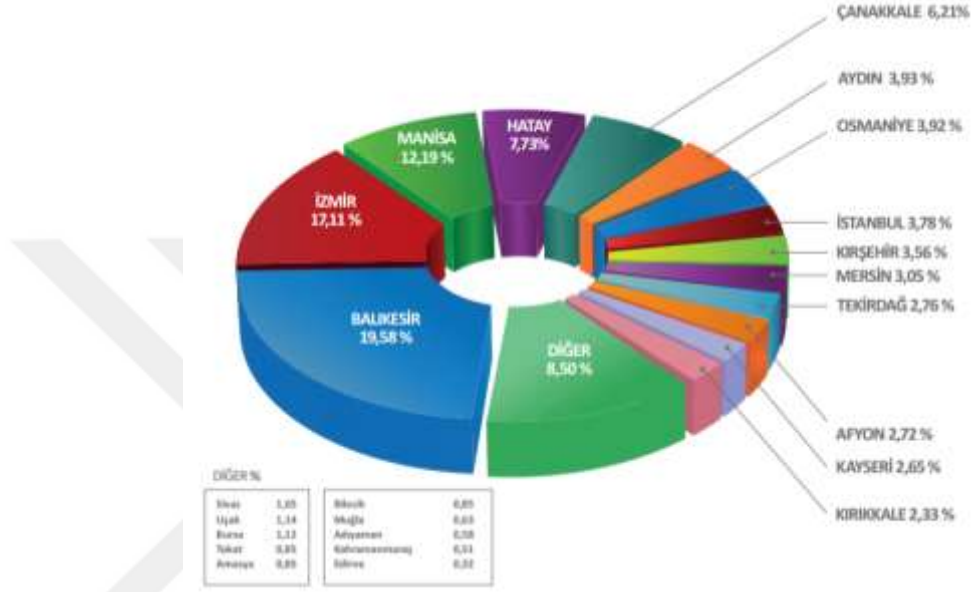
Şekil 1.5 Türkiye rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı (TUREB, 2016)

Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücünün, 2023 yılına kadar 20.000 MW'a çıkarılması hedefine ulaşabilmesi için yatırımların gün geçtikçe daha yüksek oranlarda artması öngörülmektedir. Rüzgar türbini yatırımlarını bölgesel olarak inceleyecek olursak, rüzgar potansiyeli oldukça yüksek olan Ege ve Marmara bölgelerinde yatırımın yoğunlaştığını görmekteyiz. Bununla ilgili bilgiler Şekil 1.6.'da belirtilmiştir.



Şekil 1.6 İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı. (TUREB, 2016)

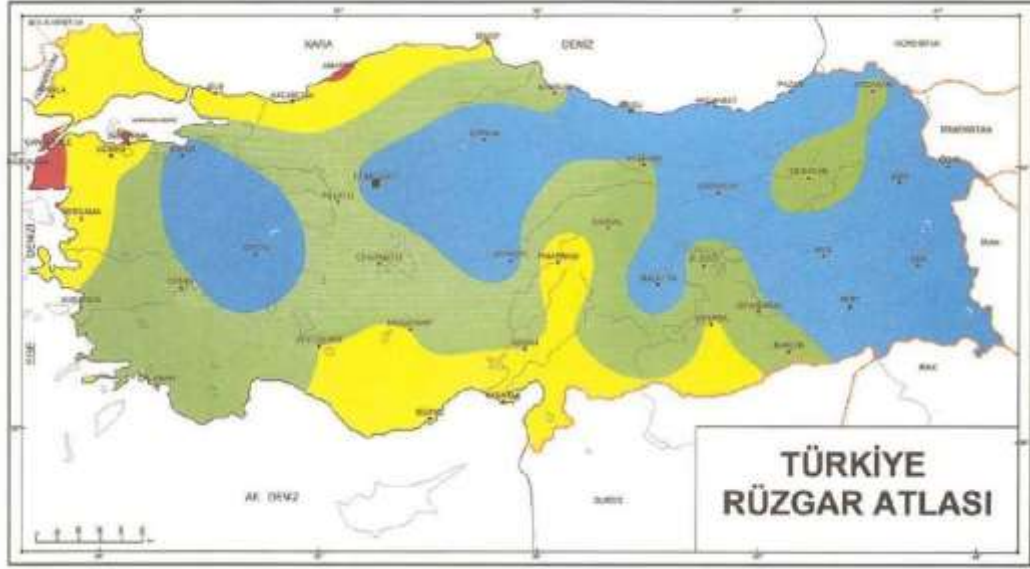
TUREB'in Ocak 2016 raporuna göre, işletmedeki RES'ler il bazında incelendiğinde %19,58 ile Balıkesir'in birinci, %17,11 ile İzmir' in ikinci ve %12,19 değer ile Manisa'nın 3. olduğu görülmektedir. Bu değerler sürekli olarak güncellenmekte olup inşa halindeki RES'lerin tamamlanmasıyla değerler değişmektedir. İşletmedeki diğer illere ait değerler Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı (TUREB, 2016)

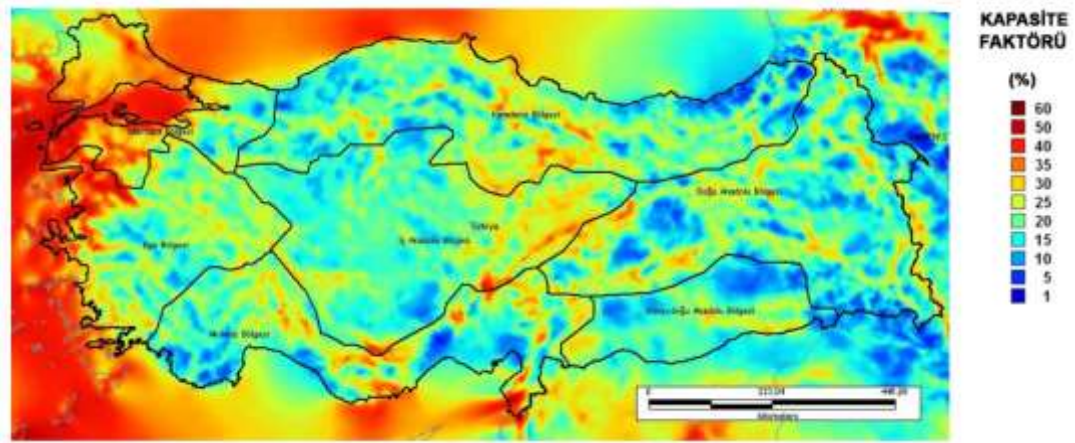
1.2.3 Türkiye Rüzgâr Potansiyeli Atlası

Türkiye'de rüzgâr potansiyelini belirlemek amacıyla bazı ön çalışmalar yapılmıştır ve 2002 yılında bir rüzgâr atlası oluşturulmuştur. Türkiye Rüzgâr Atlası için, Danimarka Meteoroloji Teşkilatı tarafından hazırlanan ve Avrupa Rüzgâr Atlası'nın hazırlanmasında da kullanılan WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programı kullanılmıştır. Bu çalışma için Türkiye üzerinde homojen dağılım gösteren 96 adet meteoroloji istasyonu için yerinde incelemelerde bulunulmuş ve bu istasyonlardan 45 adetinin verileri kullanılarak Türkiye Rüzgâr Atlası hazırlanmıştır. Şekil 1.8'de rüzgâr atlası görülmektedir. Günümüze kadar bazı değişiklikler yapılmıştır. Ancak yine de rüzgâr atlasındaki bilgiler son derece yüzeysel kalmaktadır. Türkiye'nin rüzgâr karakteristiği ile ilgili pek fikir vermemektedir.



Şekil 1.8 Türkiye rüzgâr atlası (TÜREB, 2012)

Elektrik İşleri Etüt İdaresi, 2007 yılında, bundan daha kapsamlı bir çalışma yapmış ve tamamlamıştır. EİE tarafından hazırlanmış olan bu Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası'na göre rüzgâr potansiyeli bakımından zengin bölgelerimiz Ege, Marmara ve doğu Akdeniz kıyılarıdır. Şekil 1.9'da Türkiye'deki bölgelerin yıllık kapasite faktörü (rüzgâr karakteristikleri ile belirlenen, kurulabilecek bir rüzgâr santralinin yıllık kullanılabilme oranı) görülmektedir. Ekonomik rüzgâr enerjisi santrali yatırımı için %35 veya üzeri kapasite faktörü gerekmektedir. Hesaplamalarda 1 MW gücündeki referans bir rüzgâr türbinine ait teknik değerler kullanılmıştır.



Şekil 1.9 Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (REPA) (EİE, 2011)

Rüzgar kaynak bilgileri, aşağıda belirtilen tematik haritalarla desteklenerek Türkiye geneli, grid, coğrafi, bölge ve il seçilecek herhangi bir alan veya nokta bazında sorgulanabilmektedir. Böylece rüzgâr enerji santrali kurulabilecek alanlar kolaylıkla belirlenmekte, ön fizibilite çalışmaları yapılabilmekte, rüzgâr kaynağı arama amacıyla yapılan çalışmalar ortadan kaldırılarak tasarruf sağlanmaktadır. REPA çalışmalarında rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplamalarını yaparken 20'nin üzerinde altlık harita kullanılmıştır. Bu haritalar aşağıda listelenmiştir.

- Arazi pürüzlülüğü
- Topografya ve yükseklik
- Deniz derinliği
- Arazi eğimi
- Yerleşim birimleri
- Yerleşim alanları
- Göller
- Nehirler
- Sulak alanlar
- Limanlar
- Trafo merkezleri
- Enerji nakil hatları
- Enerji santralleri

- Deprem fay bölgeleri
- Arazi kullanım şekli
- Rüzgâr enerjisi santral kurulması için başvuru alanları
- Ormanlar
- Çevre koruma alanları
- Kuş göç yolları
- Kara-demir-hava yolları gibi sıralanabilir.

Rüzgâr enerjisi uygulamaları açısından uygun olmayan alanlar aşağıda belirtilmiştir;

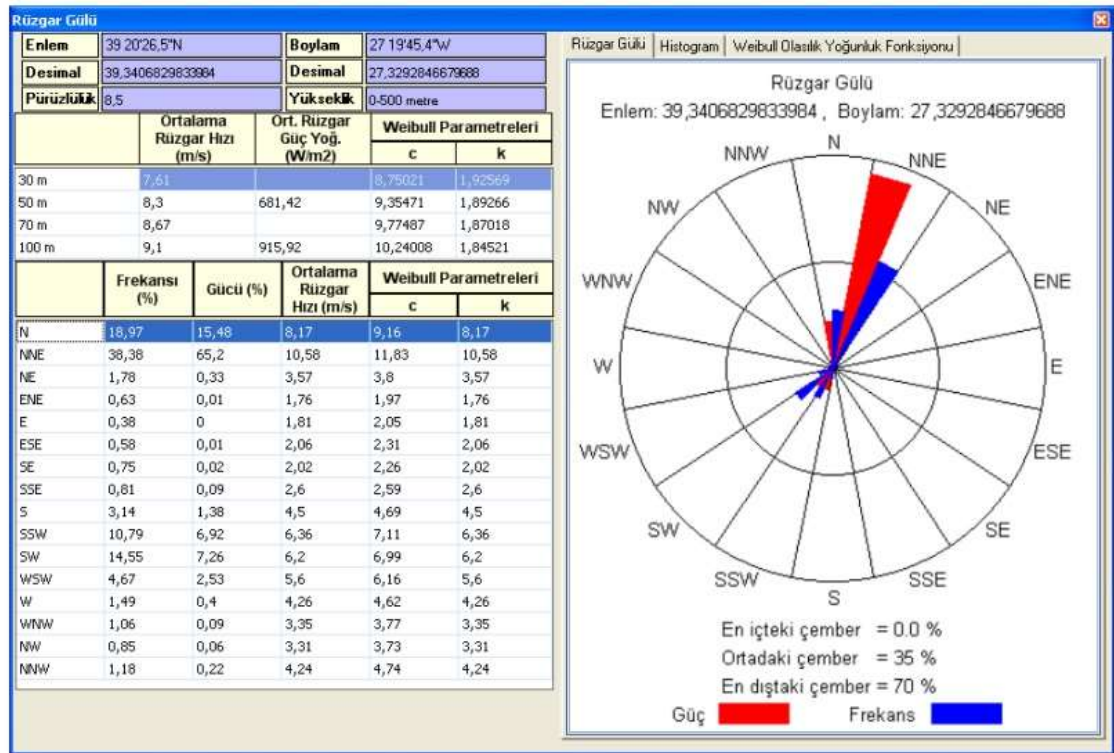
- Rakımı 1500 metrenin üzerinde ve eğimi %20' den fazla olan bölgeler
- Yerleşim alanları
- Kara ve demir yolları ile hava alanları ve limanlar
- Sulak alanlar ve nitelikli orman alanları
- Koruma alanları (milli parklar, Özel Çevre Koruma Bölgeleri vb.)
- Enerji santralleri
- Emniyet bantları
- Derinliği 50 metreden fazla olan deniz alanlarıdır.

Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde 200 m x 200 m çözünürlüğünde;

- 30,50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hız ortalamaları,
- 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgâr güç yoğunlukları,
- Referans bir türbin için 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü,
- 50 m yükseklikteki yıllık rüzgâr sınıfları,
- 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri
- Deniz seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki basınç değerleri öğrenilebilmektedir.

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçemediğimiz yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir. Türkiye rüzgâr enerji potansiyeli, belirlenmiş kıstaslar doğrultusunda rüzgâr sınıfı iyi ile sıra dışı arasında 47.849 MW olarak belirlenmiştir. Bu araziler Türkiye toplamının % 1,3'üne denk gelmektedir. Orta ile sıra dışı arası rüzgâr sınıfına ait rüzgârlı arazilerde ise 131.756 MW'lık rüzgar enerji potansiyeli bulunduğu ve toplam rüzgarlı arazi alanının ise Türkiye'nin %3,57'si olduğu görülmüştür.

Şekil 1.10'da koordinatları belirtilmiş olan Türkiye'deki bir konumun yerden çeşitli yüksekliklerdeki ortalama rüzgar hızlarının değerleri ile rüzgar esme sıklıklarının ve şiddetinin yönler göre dağılımı Weibull diyagramı ve rüzgar gülü grafiği şeklinde verilmiş hali görülmektedir.



Şekil 1.10 REPA'da noktasal rüzgar verilerinin Weibull diyagramı ve rüzgar gülü grafiği olarak gösterimi

Bu bilgiler ile yapılacak enerji üretim hesaplaması kesin sonuçlar vermemektedir. Yalnızca üretilecek enerji miktarları hakkında fikir sahibi olunmasında yardımcı olmaktadır. Belirlenen bir konumun rüzgâr karakteristiği ile ilgili tatmin edici bir sonuç alınmak isteniyorsa en az 1 yıllık olmak kaydı ile noktasal rüzgâr ölçümü yapılması gerekmektedir.

1.3 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)

1.3.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Çeşitleri

Dönme eksenli rüzgar yönüne dik konumda çalışan rüzgar türbinleridir. En eski rüzgar türbinlerinden biri olan dikey eksenli rüzgar türbinlerinin verimleri, yatay eksenli rüzgar türbinlerine kıyasla daha düşüktürler. Ancak, DERT'ler rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. Hakim rüzgar yönünün bulunmadığı, rüzgar yönünün çok sık değiştiği bölgeler için çok uygun tasarımlardır. Bu tür rüzgar türbinlerinde kanatların yüzeylerine gelen itme kuvveti farkı nedeni ile dönüş hareketi oluşmaktadır. DERT'lerin bazı tasarımları sürüklenme kuvveti bazıları ise kaldırma kuvveti ile güç üretirler.

Dikey eksenli rüzgar türbinleri çalışma kuvvetlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir

Sürüklenme kuvveti ile çalışanlar

1. Savonius tipi rüzgar türbinleri
 - a) İki kanatlı
 - b) Çok kanatlı
 - c) Helezonik
2. Lafond tipi rüzgar türbinleri
3. Panemone tipi rüzgar türbinleri

Kaldırma kuvveti ile çalışanlar

1 . Darrieus tipi rüzgar türbinleri

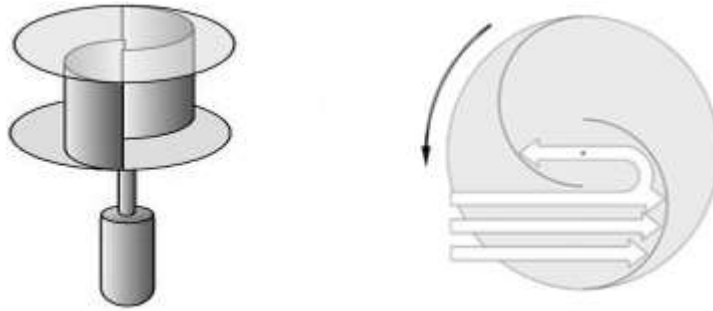
- a) H tipi
- b) Konik tip
- c) Mikser tipi

2.Giromill tipi rüzgar türbinleri

3.Helisel Rüzgar türbinleri

1.3.1.1 Savonius Tipi Rüzgar Türbinleri

1925 yılında, Finlandiyalı mühendis Sigurd Johannes Savonius tarafından keşfedilmiştir. Savonius rüzgar türbinleri iki yatay disk arasında yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine simetrik iki yarım silindirden oluşur. Rüzgarın sürüklenme kuvveti ile dönme etkisi oluşur. Türbini oluşturan kanatların iç kısmına pozitif, dış kısmına negatif bir moment yaratır. Silindirin iç kısmında oluşan moment dış kısmında olduğundan büyük olduğu için dönme hareketi oluşmaktadır. Savonius tipi rüzgar türbinlerinin bir çok çeşidi mevcuttur. Tek kanatlı, çok kanatlı veya helisel olarak da üretilmektedir. Her bir tasarım çalışma koşullarına göre farklılıklar gösterir (Atlıhan, 2006; Le Gourieres,1982).

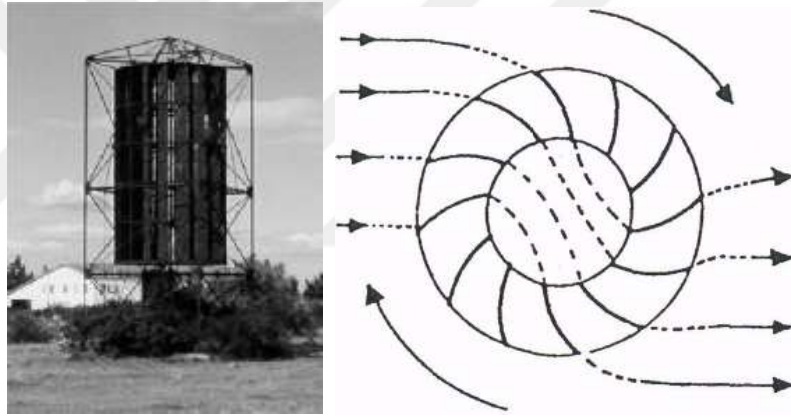


Şekil 1.11 Savonius rüzgar çarkı

Savonius rüzgar türbinleri düşük rüzgâr hızlarında çalışabilmektedir. Kendiliğinden ilk harekete başlama kabiliyeti, diğer DERT'lere göre çok daha yüksektir. Genellikle havalandırma, su pompalama gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.3.1.2 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 türbini 2,5 m/s’lik rüzgar hızında dönmeye başlar” (Atlıhan, 2006, s.20). Şekil 1.12’de Lafond rüzgar türbini kanatları içinden havanın izlediği yol gösterilmiştir. Bu türbin ile elde edilen enerji, aynı süpürme alanına sahip yatay eksenli diğer herhangi bir rüzgar türbini tarafından elde edilen enerjinin yarısı dolayındadır (Le Gourieres, 1982; Deda, 2000).

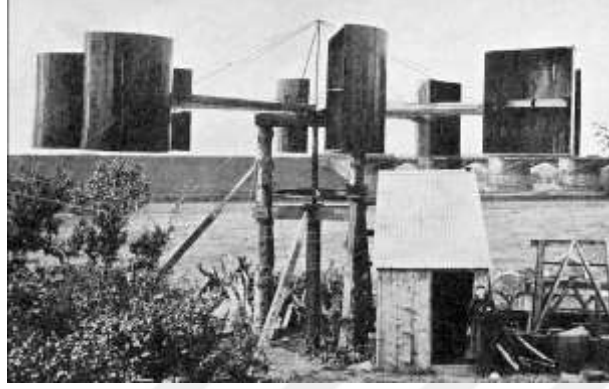


Şekil 1.12 Lafond rüzgar türbini

1.3.1.3 Panemone Tipi Rüzgar Türbinleri

Kayıtlara geçen ilk rüzgar gücü ile çalışan makine ise M.Ö. 500-900 arasında Pers'ler tarafından su pompalamak için kullanılmıştır. Panemone tasarımı, verimi en düşük sistemlerden biri olmasına karşın, rüzgar enerjisi tarihi boyunca tekrar tekrar keşfedilen en popüler rüzgar türbini konseptlerinden biridir. Geçmişte bu tasarım tahıl öğütmek ve su pompalamak amacıyla kullanılmıştır. İlerleyen zamanlarda artan teknoloji ile panemone rüzgar türbinlerinin sahip olduğu ilgi giderek azalmıştır.

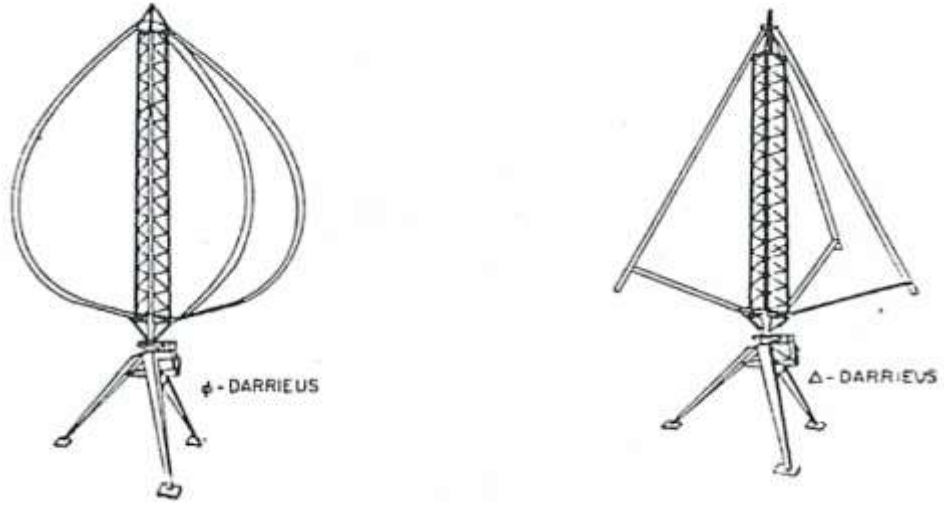
Rüzgarın oluşturduğu sürüklenme kuvveti esasına dayanarak dönme hareketi oluşmaktadır. Şekil 1.13'te su pompalamak için kullanılan eski tip bir panemone rüzgar çarkı bulunmaktadır (Le Gourieres,1982).



Şekil 1.13 Panemone tipi rüzgar türbinleri

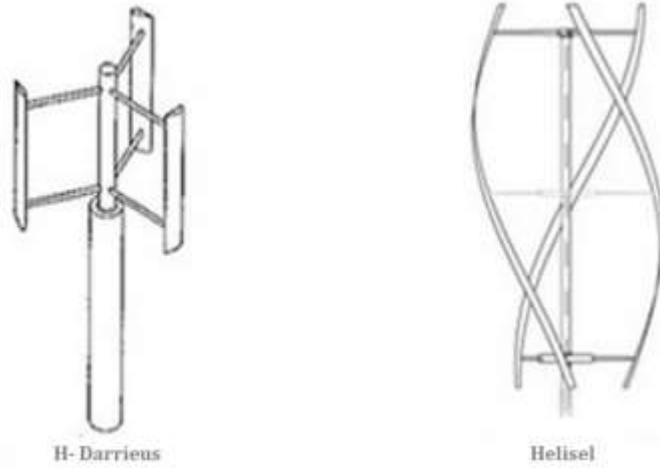
1.3.1.4 Darrieus Rüzgar Türbinleri

Fransız bilim adamı Georges Darrieus tarafından yapılmış olup 1931 yılında patenti alınmıştır. 1970 ve 1980'lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat tasarımları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik biçimli aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde, kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur. Kendiliğinden harekete geçme özelliği kötü olduğu için ilk hareketin verilmesi gerekmektedir. İlk hareket darrieus tipi rüzgar türbininin içerisine yerleştirilen bir savonius rüzgar türbini ile veya tahrik motoru ile verilebilir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Kanat biçimleri silindirik, konik, küresel veya paraboliktir. Şekil 1.14'de parabolik ve konik tip Darrieus rüzgar türbinleri görülmektedir. Kanat kesitleri boyutuna göre çok ince olduğu için bıçak olarak da adlandırılır. Günümüzde çoğunlukla NASA standartlarından NACA00XX simetrik kanat profilleri kullanılmaktadır. (XX) kanat veter uzunluğu ile maksimum et kalınlığının oranını belirtmektedir. Örneğin; veter uzunluğu 100 mm olan NACA0018 kanat profilinin maksimum et kalınlığı 18 mm'dir.



Şekil 1.14 Parabolik ve konik Darrieus rüzgar (Atlıhan, 2006; Le Gourieres,1982).

Darrieus tipi rüzgar türbinleri kendi içerisinde de çeşitlilik göstermektedir. Şekil 1.15’de gösterilen H tipi darrieus ve helisel rüzgar türbinleri ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Helisel tip rüzgar türbinleri; H Darrieus rüzgar türbinlerinin daha gelişmiş versiyonu olup, kanat açılarının etkisine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Tork eldesini daha dengeli tutmak için helisel tip rüzgar türbinleri geliştirilmektedir.

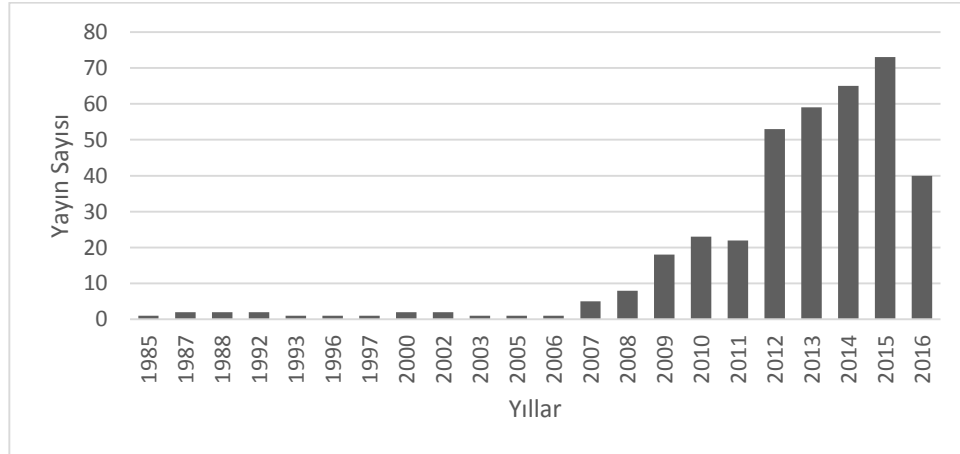


Şekil 1.15 H-Darrieus ve helisel tip rüzgar türbini

1.3.2 Dikey Rüzgar Türbinleriyle İlgili Akademik Çalışmalar

Akademik çalışmalar incelendiğinde, 2007 yılından itibaren dikey eksenli rüzgar türbinleriyle ilgili yayınların arttığı gözlemlenebilmektedir (Web of Science, 2016). 1985 yılından 2016 Ağustos'una kadar olan süreçte dikey eksenli rüzgar türbinleri ile ilgili yayınlanan makalelerin, yıllara göre dağılımı Şekil 1.16'da verilmiştir. Toplamda, dikey eksenli rüzgar türbinleri ile ilgili 383 makale basılmış olup, bunların %76'sı, Ocak 2012 ile Ağustos 2016 tarihleri arasında yayınlanmıştır. Grafik incelendiğinde, özellikle 2012 yılından itibaren yayın sayısında bir sıçrama yaşandığı ve artışın düzenli olarak devam ettiği söylenebilir. Sonraki üç yıl boyunca da düzenli bir artış devam etmiştir. 2016 yılı henüz tamamlanmadığı için toplam yayın sayısı bir önceki yıllar ile kıyaslandığında düşük kalmakta, ancak ağustos ayına kadar olan zaman diliminde 40 yayının, 2016 sonuna doğru artarak benzer bir eğilim göstereceği düşünülmektedir.

Ticari olarak gelişmeler incelendiğinde, bir çok yenilikçi firma bu tarihler arasında dikey eksenli rüzgar türbinleri ile ilgili çalışmalar yürütmüş ve ticari ürün olarak kullanıma sunmuştur.



Şekil 1.16 Yıllara göre dikey eksenli rüzgar türbinleriyle ilgili yayın sayıları (Web of Science, 2016)

1.4 Çalışmanın Amacı

Önceki başlıklarda da belirtildiği üzere Türkiye rüzgar potansiyeli bakımından oldukça verimli topraklara sahiptir. Ayrıca, her yıl enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu durum, hem firmaları hem de bilim insanlarını yenilenebilir enerji ile ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütmeye yöneltmektedir. Rüzgar türbinleriyle ilgili geçmişten günümüze kadar olan süreçte hem akademik hem de ticari olarak yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin büyük bir kısmı, yatay rüzgar türbinlerine yönelik olmuştur. Ancak günümüzde yatay rüzgar türbinleri ile ilgili yürütülen çalışmalar belirli bir doygunluğa erişmiş olup, yeterli çalışmanın bulunmadığı ve bir çok belirsizlik içeren dikey rüzgar türbinleriyle ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin arttığı görülmektedir.

Üzerine çalışma yapılacak bir çok parametrenin bulunması, yapılmış çalışmaların yetersiz olması, artan elektrik tüketimine yönelik alternatif çözümler üretmek ve şehir içindeki rüzgar potansiyelinden faydalanmak istenmesi, son yıllarda hem akademik hem de ticari olarak dikey eksenli rüzgar türbinlerine olan ilginin artmasına neden olmuştur.

Türkiye Rüzgar enerjisi atlası (REPA) incelendiğinde şehir içlerinde oldukça yüksek rüzgar potansiyeli olduğu görülmektedir. Yasa gereği şehirleşmenin bulunduğu alanlara büyük boyutlu yatay rüzgar türbinlerinin yerleştirilmesi yasaktır. Bu nedenle mevcut şehir içi rüzgar potansiyeli kullanılamamaktadır. Ev tipi olarak adlandırılan küçük yatay rüzgar türbinleri ile şehir içindeki türbülanslı ve değişken yöne sahip rüzgar akışında verimli sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebeple, dikey rüzgar türbinlerine olan talep artmıştır. Çünkü dikey eksenli rüzgar türbinleri yataylara kıyasla daha sessiz çalışarak, her yönden gelen rüzgar ile dönebilmekte olup, kule ihtiyaçları bulunmamaktadır.

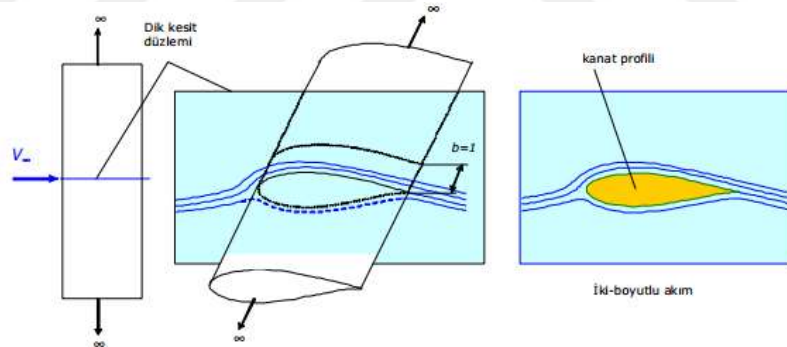
Bahsi geçen tüm nedenlerden dolayı, bu çalışmada dikey eksenli bir rüzgar türbini tasarımı ve imalatının yapılması ile, ileriki çalışmalara zemin hazırlanması amaçlanmış olup, ilerleyen dönemlerde bu tasarım üzerinden deneysel çalışmaların yürütülmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM İKİ

RÜZGAR TÜRBİNİNDE KANAT PROFİLİ GEOMETRİSİ VE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLER

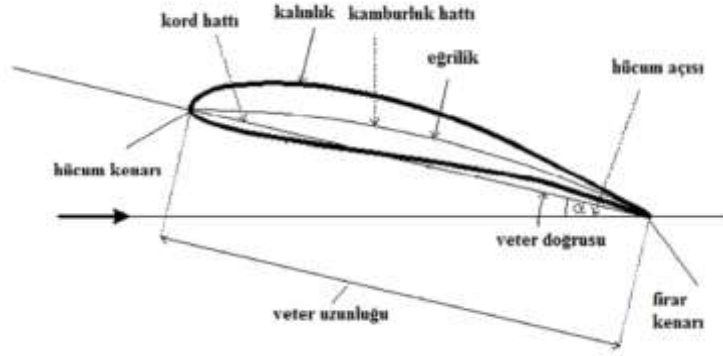
Rüzgar türbinlerinin en önemli parçası kanatlarıdır. Optimum kanat şekli ve boyutları için kanat hareketlerinin anlaşılması ve aerodinamik akış özelliklerinin bilinmesi gerekir (Le Gourieres, 1982).

Kanat profilinin şekline bağlı olarak üzerine etkiyen basınç değerleri değişmektedir. Şekil 2.1’de bütün kesit profilleri aynı olan, dikdörtgensel üst görünümü, sonsuz açıklıklı bir kanadın üzerindeki akış resmedilmiştir. Kesit değişmediği için bu tür kanatlarda sayısal analizler iki boyutlu olarak yapılabilmektedir (Yükselen, 2006). Bu nedenle sayısal veya deneysel olarak yapılan çalışmalar ile kanada özgü bazı veriler elde edilmektedir.



Şekil 2.1 Kanat üzerindeki akış ve kanat profili (Yükselen, 2006)

Şekil 2.2’de kanat geometresi üzerindeki terimler bulunmaktadır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde kanat tasarımı yapılırken veter uzunluğu ve hücum açısı çok önemlidir. Veter uzunluğunun artışı doğrudan devir sayısını ve verimi etkilemektedir. Hücum açısının artırılması ise, belirli bir açı değerine kadar verim artışı sağlarken artış devam ettirildiğinde verim kaybına yol açmaktadır. Giromill olarak tanınan dikey eksenli rüzgar türbinlerinde hücum açısı yaylı bir mekanizmayla belirli bir serbestlikte değişme yeteneğine sahiptir. Bu da Giromill’lerin diğer DERT’lere göre daha verimli olmasının temel nedenidir.



Şekil 2.2 Örnek kanat profili

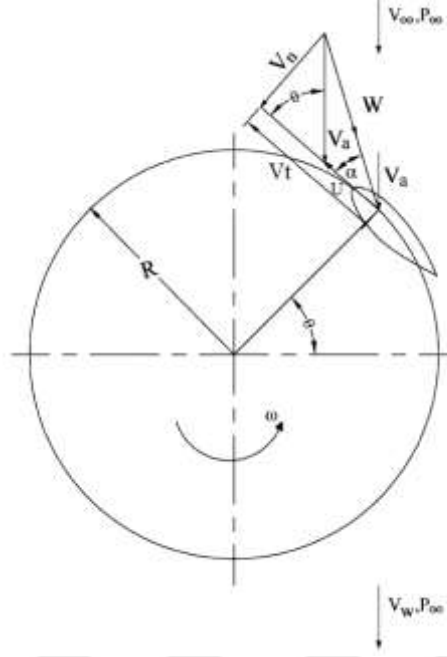
Sabit bir rüzgar akışında kanada etkiyen rüzgar hızının bileşenlerinin modifiye edilmiş gösterimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Islam, Ting, Fartaj, 2006). Kanada etki eden akış doğrultusundaki rüzgar hızı V_a , iki bileşene ayrılır. Bunlar; bağıl hız W ve çevresel hız U 'dur. Bağıl hız W , teğetsel hız U ve etkiyen rüzgar hızı V_a 'ya bağlıdır. Buna göre bağıl hız formül (2.1)'de verilmiştir.

$$\vec{W} = \vec{V}_a - \vec{U} \quad (2.1)$$

$$V_n = V_a \sin\theta \quad (2.2)$$

$$V_t = U + V_a \cos\theta = V_t = R\omega + V_a \cos\theta \quad (2.3)$$

Burada, kanada etkiyen rüzgar hızı (V_a), teğetsel hız (V_t), normal hız (V_n), kanadın konumundan dolayı oluşan açı değeri (θ), türbin rotor yarı çapı (R) ve açısal hız (ω) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.16 Kanat üzerine etkiyen rüzgar hız bileşenlerinin gösterimi (Islam, Ting ve Fartaj, 2006)

Şekil 2.3 incelendiğinde formül (2.4)'deki ifade yazılabilir.

$$\tan \alpha = \frac{V_n}{V_t}, \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_n}{V_t}\right) \quad (2.4)$$

Buradan α kanat hücum açısıdır.

V_n ve V_t değerleri formül içerisine yazıldığında ise ifade formül (2.5)'de ki gibi olur.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_a \sin \theta}{R\omega + V_a \cos \theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{\frac{R\omega}{V_a} + \cos \theta}\right) \quad (2.5)$$

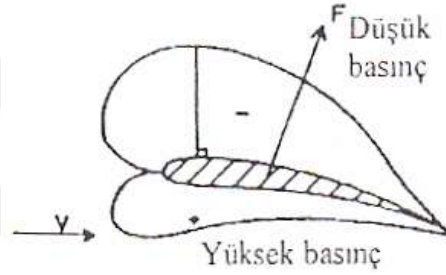
Bağıl hız W , teğetsel hız V_t 'ye ve normal hız V_n 'ne bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

$$W = \sqrt{V_t^2 + V_n^2} \quad (2.6)$$

V_t ve V_n hız denklemleri yukarıdaki denklemde yerine yazıldığında ve düzenlendiğinde ifade formül (2.7)'deki gibi olur.

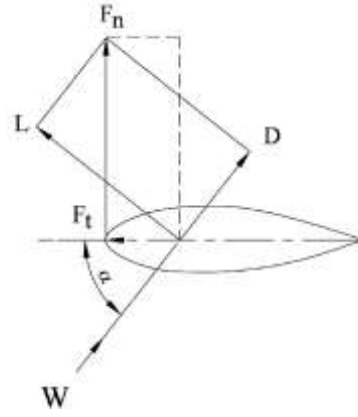
$$\frac{W}{V_a} = \sqrt{\lambda^2 + 2 \lambda \cos\theta + 1} \quad , \quad \lambda = \frac{R\omega}{V_a} \quad (2.7)$$

“Kanat profilinin şekline ve hücum 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 edilse de basınç alanını her şeyden önce hücum açısı α ve profilin şekli ile tayin edilir” (Atlıhan, 2006, s.28). Kanat üzerindeki basınç dağılımları Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4 Kanat profilindeki basınç alanları (Atlıhan, 2006)

Bu basınç farkından dolayı kanat üzerine etkiyen kuvvetler oluşmaktadır. Bunlar F_l (lift) kaldırma kuvveti F_d (drag) sürükleme kuvvetidir. Bu kuvvetlerin bileşkesi F kuvvetidir. F kuvveti de F_t teğetsel kuvvet, F_n normal kuvvet olarak iki kuvvete ayrılabilir. Kanadın dönme hareketini veren F_t kuvvetidir. Şekil 2.5’de kanat üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Kanat üzerinde oluşan kuvvetler (Islam, Ting, Fartaj, 2006)

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_r \cdot S \cdot W^2 \quad (2.8)$$

Burada, havanın yoğunluğu ρ , rüzgar hızı W kanat veter uzunluğu (c) ile kanat boyu (H) nin çarpımıyla bulunan tarama alanı S , toplam aerodinamik katsayısı da C_r olarak tanımlanmaktadır.

$$F^2 = Fd^2 + Fl^2 \quad (2.9)$$

F kuvveti iki kuvvetin birleşiminden oluşur.

Birincisi hız vektörüne (W) paralel, sürüklenme (veya direnç) kuvveti (Fd)

İkincisi ise hız vektörüne (W) dik, kaldırma kuvveti (Fl) dir.

Sürüklenme kuvveti cismin üzerinde akış yönünde meydana gelen kuvvettir. Düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti, hava akısının cismin üzerine 90o'lik açı ile geldiği durumda meydana gelir. Minimum sürüklenme kuvveti de hava akısı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir.

$$Fd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot S \cdot W^2 \quad (2.10)$$

Burada, havanın yoğunluğu (ρ), rüzgar hızı (W), kanat veter uzunluğu (c) ile kanat boyu (H)'nin çarpımıyla bulunan tarama alanı (S), sürüklenme katsayısı (C_d) olarak tanımlanmaktadır.

Kaldırma kuvveti akışa dik olarak etki etmektedir. Uçakların yerden havalanması da bu kuvvet sayesinde olmaktadır. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış hızının artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Dolayısıyla hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça da basınç artar, bu olaya “Bernoulli Etkisi” denir.

$$Fl = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cl \cdot S \cdot W^2 \quad (2.11)$$

Burada, havanın yoğunluğu (ρ), rüzgar hızı (W), kanat veter uzunluğu (c) ile kanat boyu (H)’ nin çarpımıyla bulunan tarama alanı (S) , kaldırma katsayısı (Cl) olarak tanımlanmaktadır.

Burada kanadın performans karakteristiğini belirten Cl ve Cd değerleri sırasıyla kaldırma , sürüklenme katsayıları, deneysel veya sayısal olarak elde edilmektedirler. Buradan, toplam aerodinamik katsayı Cr şu şekilde yazılabilir.

$$Cr^2 = Cd^2 + Cl^2 \quad (2.12)$$

Deneysel çalışmalarla:

- Taşıma ve yunuslama için basınç dağılımı ölçümü
- Sürüklenme için iz taraması

Teorik çalışmalarla:

- Potansiyel akım çözümleri
- Potansiyel akım + sınır tabaka etkileşim yöntemleri
- N/S çözümleri ile kanat performansı belirlenebilir (Yükselen, 2006).

Şekil 2.5’te gösterilen kanat kirişine paralel F_t kuvveti ve kanat kirişine dik F_n kuvveti şu şekilde yazılabilir.

$$Ft = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_t \cdot S \cdot W^2 \quad (2.13)$$

$$Fn = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_n \cdot S \cdot W^2 \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde C_t ve C_n olarak verilen katsayılarının C_d ve C_l sırasıyla sürüklenme ve kaldırma katsayıları türünden yazılışı formül (2.15) ve (2.16)'de verilmiştir.

$$C_t = C_l \cdot \sin\alpha - C_d \cdot \cos\alpha \quad (2.15)$$

$$C_n = C_l \cdot \cos\alpha + C_d \cdot \sin\alpha \quad (2.16)$$

Burada α olarak tanımlanan açı hücum açısıdır. Rüzgar akışı ile kanat üzerinde oluşan kuvvetlerden F_t kuvveti kanadın dönmesini sağlayan kuvvet olup toplam tork T 'nin oluşmasını sağlar.

$$T = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot R \cdot N}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t \cdot W^2 d\theta \quad (2.17)$$

Burada, R türbin rotor yarı çapını, N ise kanat sayısını belirtmektedir. C_p olarak belirtilen güç katsayısı üretilen gücün, maksimum güce oranı ile bulunmaktadır.

$$C_p = \frac{P}{P_{max}} \quad (2.18)$$

Bu durumda rüzgar türbininden elde edilebilecek güç formül (2.19)'da ifade edilmiştir.

$$P = T \cdot \omega = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot R \cdot N \cdot \omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t \cdot W^2 d\theta \quad (2.19)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_a^3 \quad (2.20)$$

Burada, P_{max} rüzgar enerjisinden elde edilebilecek maksimum gücü, ρ havanın yoğunluğunu, A rüzgar türbininin rotor çapı ve kanat yükseklik değerlerinin çarpılmasıyla bulunan taeama alanını, V_a rüzgar hızını ifade etmektedir.

Betz Limiti'ne göre rüzgâr türbininin, rüzgârın kinetik enerjisinin ancak %59'unu mekanik enerjiye çevirebildiği bilinmektedir. Ancak bu durum ideal koşullar ve ideal türbinler için geçerlidir. Bunların dışında da aerodinamik kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar da hesaba katıldığında rüzgâr türbininin mekanik enerjiye dönüştürebileceği rüzgâr gücü belirlenir. Rüzgâr türbininin gücünü hesaplamada yine Betz Kanunundaki formül kullanılır. Ancak Betz Kanunu'ndaki 16/27 çarpanı ideal bir rüzgâr türbinini için geçerli olduğundan, gerçek rüzgâr türbininde bu çarpan yerine türbinin toplam verimi gelecektir ve türbinin toplam verimi Betz Limiti'nden daha küçüktür

C_p güç eğrileri Reynold sayısına göre değişiklik göstermektedir. Reynold sayısı değeri büyüdükçe türbin performansı artar. Reynolds sayısı arttıkça, kanadın kaldırma katsayısı yükselir ve sürüklenme katsayıları azalır böylece daha fazla tork sağlanır (Brusca, Lanzafame, Messina, 2014).

$$Re = \frac{c.W}{\nu} \quad (2.21)$$

Burada, kanat veter uzunluğu c , bağıl hız W , kinematik hava viskozitesi ν olarak ifade edilmiştir.

$$\omega.R = V_a.\lambda \quad (2.22)$$

Basit bir matematiksel yaklaşım benimsenerek W bağıl hız $\omega.R$ çizgisel hız olarak yazılabilir. Böylece Reynold sayısı sürekli değişen θ konum açısından bağımsız hale gelir. Formül (2.22), (2.21)'deki denkleme içerisine yerleştirilirse formül (2.23) elde edilir. Böylece Reynold sayısı dönüş açısından bağımsız olur.

$$Re = \frac{c.V_a.\lambda}{\nu} \quad (2.23)$$

BÖLÜM ÜÇ

RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM KRİTERLERİ

Bir çok farklı değişken bulunduğu için rüzgar türbini tasarımı yapmak oldukça karmaşıktır. Bu nedenle tasarıma başlarken bazı kabuller ve referans değer alınması gerekmektedir.

Tasarım sürecinde değiştirilebilen parametreler aşağıda listelenmiştir.

- Türbin Yarıçapı (m)
- Kanat Sayısı
- Kanat Uzunluğu (m)
- Kanat veter uzunluğu (m)
- Kanat Profili tipi
- Sabit kanat eğim açısı (derece)
- Türbin dönüş hızı (rad/s, rpm)
- Türbin tarama alanı

Yukarıdaki parametreler sayesinde bazı boyutsuz sayılar oluşturmak mümkündür.

- Türbin katılık değeri (N_c/R)
- Kanat uç hız oranı (λ) (TSR)
- Kanat boyu veter uzunluğu oranı (H/c)
- Türbin yarı çapı veter uzunluğu oranı (R/c)

Burada N kanat sayısını, c veter uzunluğunu, R türbin yarıçapını ve H kanat uzunluğunu ifade etmektedir (Wahl, 2007).

Yukarıdaki listede de görüldüğü gibi türbin tasarımında bir çok değişken bulunmaktadır. Bazı parametreler detaylı olarak ileriki bölümlerde incelenmiştir.

3.1 Kanat Uç Hız Oranı

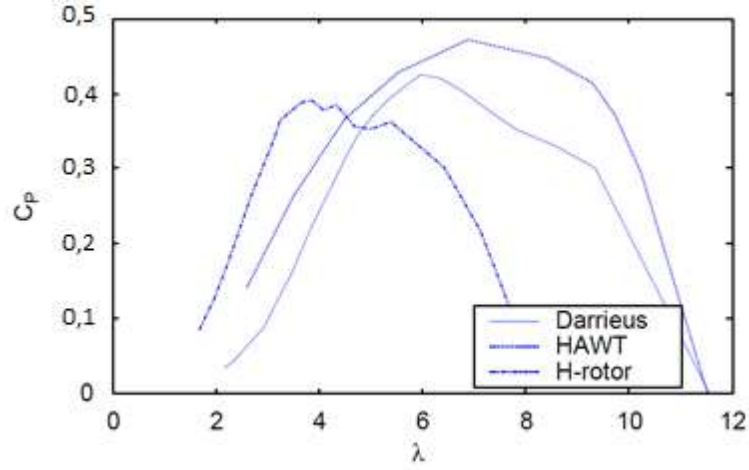
Güç katsayısı ile kanat uç hız oranı birbirine oldukça bağlıdır. Kanat uç hız oranı, kanadın teğetsel hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir değerdir. Genellikle λ sembolü ile gösterilmekte olup, İngilizce metinlerde (Tip Speed Ratio) ifadesinin kısaltması olan TSR sıklıkla kullanılmaktadır

$$\lambda = \frac{\text{Kanatın teğetsel hızı}}{\text{Rüzgar hızı}} = \frac{R \cdot \omega}{V_a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{60 \cdot V_a} \quad (3.1)$$

Burada, ω açısal hızı [rad/s], R rotor yarı çapını, n devir sayısını ve V_a da rüzgar hızını ifade etmektedir. Kanat uç hız oranı özellikle C_p güç katsayısı eğrilerinde parameter olarak kullanılmaktadır.

3.2 Güç Katsayısı

Rüzgar türbininden elde edilecek gücün ve güç katsayısının hesaplanması formül (2.18), (2.19), (2.20)'de açıklanmıştır. Teorik hesaplarda her bir kanat uç hız oranı için kanat üzerine etki eden kuvvetler bulunur ve buradan tork değerlerinin hesaplanması sağlanır. Tork değerleri belirlenen açısal hızlar ile çarpıldığında o anki üretilebilecek güç değerleri hesaplanmış olacaktır. Elde edilen bu değerler aynı koşullardaki maksimum güç değerlerine bölüldüğünde C_p olarak adlandırılan güç katsayısı elde edilmiş olur. Tüm C_p güç katsayıları kanat uç hız ranlarına göre yerleştirildiğinde ve bir diyagrama dönüştürüldüğünde Şekil 3.1'deki gibi güç eğrileri oluşturulur.



Şekil 3.17 Üç farklı tip rüzgar türbininin kanat uç hız oranı ve verim eğrileri (Eriksson, Bernhoff ve Leijon, 2008)

Şekil 3.1'de Eriksson ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma sonucu elde edilen bir diyagram bulunmaktadır (Eriksson, Bernhoff, Leijon, 2008). Diyagram incelendiğinde farklı tip rüzgar türbinlerinin birbirleriyle karşılaştırılması bulunmaktadır. Eriksson ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada aktif olarak kullanılan 3 farklı rüzgar türbininin verilerini kullanmıştır. Görüldüğü üzere rüzgar türbinleri farklı kanat uç hız oranlarında farklı verim değerleri vermektedir. Rüzgar türbinlerinde sabit bir verim değeri yoktur. Gerçekte verim rüzgar hızı ve dönüş hızına bağlı olarak bu eğri üzerinde sağa yada sola sürekli hareket etmektedir.

3.3 Türbin Tarama Alanı ve R/H Oranı

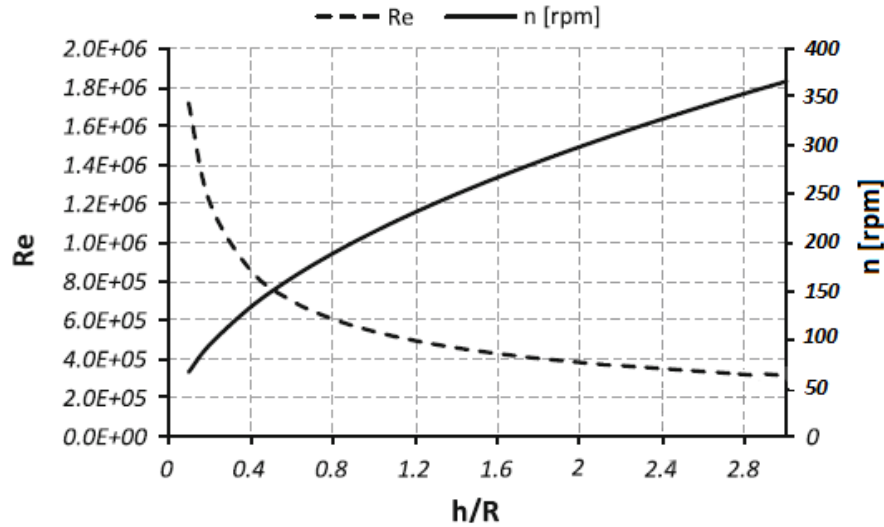
Rüzgar türbinlerinin tarama alanı güç değerine bire bir oranında etki etmektedir. Türbin tarama alanı yatay rüzgar türbinlerinde dairesel, dikey rüzgar türbinlerinde dikdörtgen şeklindedir. Formül (2.20)'de belirtildiği üzere A tarama alanı türbin rotor çapı ve kanat yüksekliğinin çarpımından elde edilir.

Tasarım yapılırken kanat yüksekliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Belirli bir rüzgar hızına ve üretim gücüne göre tarama alanı hesaplanabilir. Hesaplanırken bazı değerler sabit olarak alınması gerekmektedir. Bunlar P, C_p , V_a ve ρ değerleridir. Rüzgar hızı olan V_a hangi rüzgar hızında ne kadarlık bir güç üretilmek istendiğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir ve güç rüzgar hızının kübüyle orantılı

olarak değişir. Belirli V_a hızındaki P güç değeri de sabit alınmalıdır. C_p değeri, tasarım aşamasında oluşan kanat uç hız oranındaki verim değerine göre çeşitli diyagramlardan referans olarak alınabilir.

Kanat uç hız oranı rotor çapına ve türbinin açısal hızına bağlı olduğu için öncelikle tasarımı yapılan türbinin rotor çapı belirlenmelidir. Ardından bu rotor çapına göre açısal hız kabul yapılabilir. Böylece teorik kanat uç hız oranı hesaplanmış olacaktır. Havanın yoğunluğu olan ρ değeri sabit olarak alınır. Tüm bu değerler formülde yerine yazıldığında A kesit alanı hesaplanabilir. Kesit alanının değeri rotor çapına bölünerek türbinin kanat yksekligi bulunur.

H/R kanat yksekligi rotor yarı çapına olan oranıdır. Bu oran rüzgar türbininin devir sayısına etki etmektedir. Şekil 3.2'deki diyagramda h/R oranı arttıķa devir sayısında arttığı görülmektedir. Devir sayısı azaldıkça türbin daha yavaş ancak daha torklu olarak dönmektedir



Şekil 3.18 h/R oranının türbin performansına olan etkisi (Brusca, Lanzafame ve Messina, 2014)

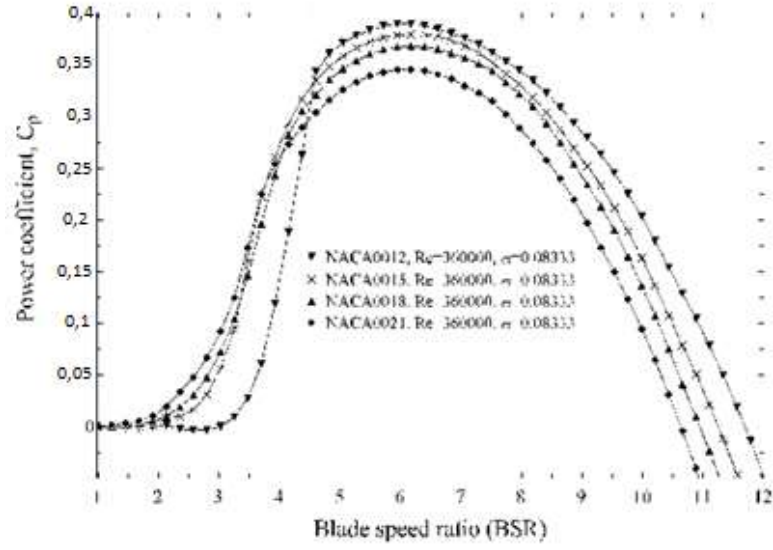
3.4 Kanat Şekli ve Veter Uzunluğu

Rüzgar türbinlerinin performansını belirleyen en önemli tasarım kriterlerinden biri kanat şekli ve veter uzunluğudur. Veter uzunluğu kanadın bombe olan kısmı ile keskin olan ucu arasındaki mesafedir. Şekil 2.2’de veter uzunluğu gösterilmiştir.

Yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı Darrieus çarklarında en çok NACA 00XX simetrik kanat profilleri kullanılmıştır. Bu tip kanatlarda XX olarak tanımlanan kısım kanadın maksimum kalınlığının veter uzunluğuna olan oranı ile ilişkilidir. Örneğin 100 mm veter uzunluğuna sahip bir kanadın maksimum kalınlık değeri 15 mm ise NACA0015 olarak ifade edilir. İnce kanat profilleri daha yüksek hızlarda dönüş sağlar. Bu nedenle NACA 0012 ve NACA 0015 profilleri yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak imalat ve dayanıklılık açısından değerlendirildiğinde birçok imalatçı NACA0018 tipi kanat profilini tercih etmektedir.

Şekil 3.3’ de gösterilen diyagram incelendiğinde sabit solidity ve reynold sayısında kanat profili incelidikçe verimin arttığı, ancak düşük kanat uç hız oranlarında kalın kanatların incelere göre daha verimli olduğu görülmektedir. Grafikte BSR (Blade Speed Ratio) olarak adlandırılan ifade kanat uç hız oranıdır. Kanat uç hız oranı 5 ile 12 arasında en düşük verimin NACA0021’e en yüksek verimin NACA0012 ‘ye ait olduğu görülmektedir. Kanat uç hız oranı 1 ile 5 arasında ise en düşük verimin NACA0012’ye en yüksek verimin ise NACA0021 ‘e ait olduğu görülmektedir. Kanat profilinin incelenmesi türbinin kanat uç hız oranının artmasına dolayısıyla devir sayısının artmasına neden olmaktadır.

Darrieus tipi rüzgar türbinlerinin kendiliğinden dönmeye başlamaları Savonius tipi rüzgar türbinlerine kıyasla daha zordur. Kanadın kalınlaşması kendi kendine dönmeye başlama etkisinin oluşmasını sağlamaktadır. Bu nedenle ince kanat profiline sahip rüzgar türbinlerinde ilk dönüş hızını verecek bir düzenek kurulması gerekebilmektedir.



Şekil 3.19 Farklı kanat profillerinin performans karşılaştırması (Roh ve Kang, 2013)

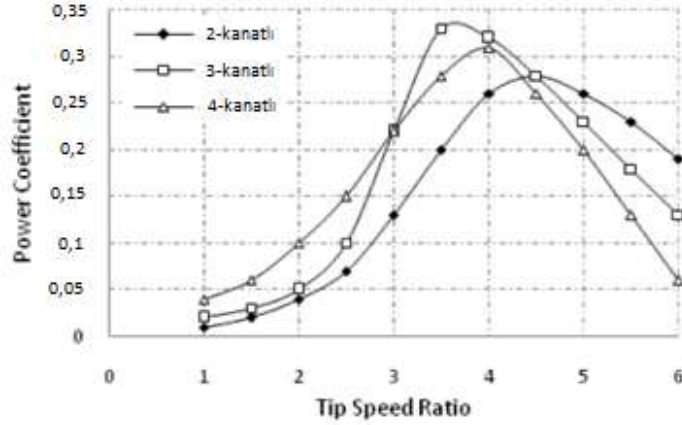
Veter uzunluğunun değişimi de C_p güç değerine etki etmektedir. Veter uzunluğunun artması maksimum C_p değerine daha düşük kanat uç hız oranı değerinde ulaşmasını sağlar. Bunun nedeni tüm kriterler sabit tutulduğunda sadece kanat veter uzunluğu artırıldığında doğrudan boyutsuz bir sayı olan katılık değerinde artmasıdır. Türbin katılığının etkisi bölüm 3.6’da detaylı olarak anlatılmıştır.

Veter uzunluğu ve kanat profil kalınlığı türbinlerin kendiliğinden harekete geçmesini etkiler. Daha yüksek devir sayılarına ve kanat uç hız oranlarına ulaşabilen, küçük veter uzunluğundaki kanatlara sahip, türbinlere dönüş hareketinin başlayabilmesi için ilk dönüş hızını verecek bir düzenek kurulması gerekebilmektedir.

3.5 Kanat Sayısı

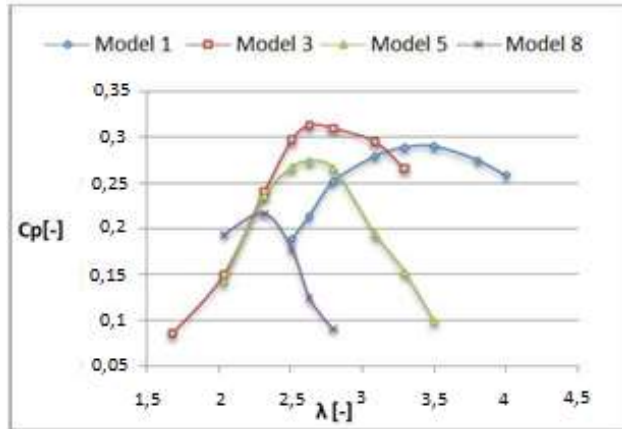
Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde kanat sayısı, sistemin performansına doğrudan etki etmektedir. Çünkü kanat sayısı katılık olarak adlandırılan (solidity) değerini doğrudan etkiler. Türbinin stabil bir dönüşe sahip olması da kanat sayısı ile ilişkilidir.

Şekil 3.4’de kanat sayısının türbin performansına olan etkisi gösterilmektedir. Sabaeifard ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma sonucu farklı kanat sayısındaki H tipi rüzgar türbini güç eğrilerinin kıyaslaması yapılabilmektedir. Şekil 3.4 incelendiğinde 3 kanatlı rüzgar türbinine ait performansın daha iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 3.20 Farklı kanat sayısındaki H tipi rüzgar türbinlerinin güç eğrileri (Sabaeifard, Razzaghi ve Forouzandeh, 2012)

Başka bir çalışmada Castelli ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Şekil 3.5’de bu numerik çalışmayla ilgili sonuç diyagramları verilmiştir. Diyagramda belirtilen Model 1, Model 3, Model 5, Model 8 sırasıyla 2, 3, 4, 6 kanatlı türbinleri ifade etmektedir.



Şekil 3.21 Farklı kanat sayısındaki türbinlerin C_p ve λ eğrileri (Castelli, Betta ve Benini, 2012)

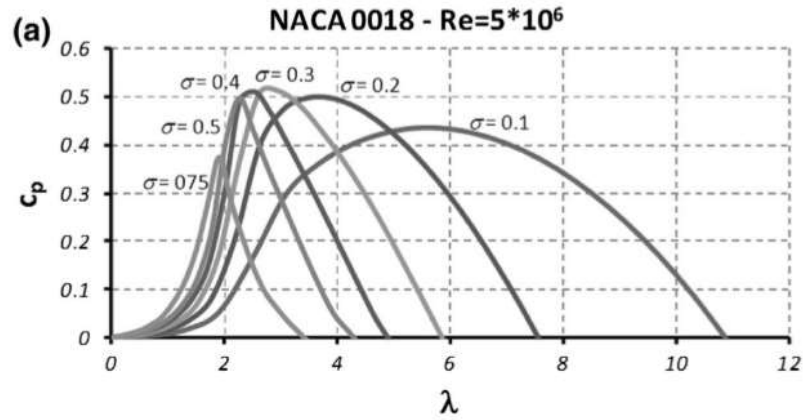
Şekil 3.5 incelendiğinde en iyi performansa sahip türbin 3 kanatlı olandır. Bu nedenle bir çok türbin üreticisi 3 kanatlı rüzgar türbinlerini tercih etmektedir.

3.6 Türbin Katılığı

Türbin katılığı kanat veter uzunluğuna, kanat sayısına ve rotor yarıçapına bağlıdır. Türbin performanslarının analizinde oldukça önemli bir değerdir. Boyutsuz bir sayı olan katılık değerine türbin tasarımlarında çok dikkat edilmesi gerekir. Katılık değerine bağlı olarak maksimum C_p değeri ve kanat uç hız oranları da değişmektedir. Türbin katılığı formül (3.2)'de de ifade edildiği şekilde kanat sayısına, veter uzunluğuna ve rotor yarı çapına bağlıdır. Türbin katılık değerinin artması Şekil 3.6'da diyagramda görüldüğü üzere eğrilerin sola doğru sıkışmasına neden olur. Katılık değeri arttıkça maksimum C_p değerleri daha düşük kanat uç hız oranlarında elde edilir.

$$\sigma = \frac{N.c}{R} \quad (3.2)$$

Burada kanat sayısı N, veter uzunluğu c, türbin yarıçapı R ile gösterilmiştir.



Şekil 3.22 Aynı Reynolds sayısı farklı katılık değerlerindeki türbinlerin güç eğrileri (Brusca, Lanzafame ve Messina, 2014)

BÖLÜM DÖRT

DİKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE ANALİZLERİ

4.1 Teorik Tasarım Hesabı

Rüzgar türbininin gücü aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot 2R \cdot H \cdot C_p \quad (4.1)$$

Burada P rüzgar gücünü, ρ havanın yoğunluğunu, V rüzgar hızını, R rotor yarıçapını, H kanat yüksekliğini, C_p güç katsayısını belirtmektedir. Türbin verimi her rüzgar hızına, kanat uç hız oranına ve Reynolds sayısına göre sürekli değişmektedir. Hesaplanan güç anlık gücü ifade etmektedir.

Rüzgara bağlı oluşabilecek devir sayısının teorik hesaplaması formül (4.2)'de gösterilmiştir. Hesap sonucu çıkan devir sayısı mükemmel koşullarda ulaşılacak bir devirdir. Hava sürtünme, rüzgarın türbülans etkisi, rulmanlarda oluşan aşınma ve sürtünme etkileri nedeniyle gerçekte teorik olarak elde edilen değerden daha düşük devir sayıları oluşmaktadır.

$$\frac{2\pi \cdot N \cdot R}{60} = \lambda \cdot V \quad (4.2)$$

Burada N devir sayısını, R rotor yarı çapını, V rüzgar hızını, λ kanat uç hız oranını belirtmektedir.

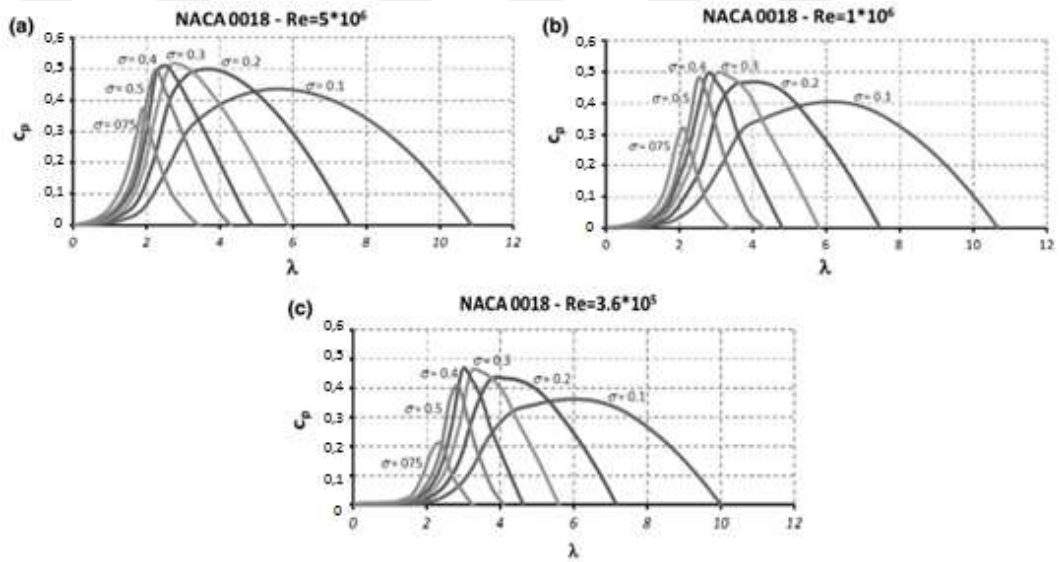
Rüzgar türbinlerinin en önemli kısmı kanatlarıdır. Bu nedenle tasarıma kanat profilinin belirlenmesiyle başlanmalıdır. Türbin kanat profilinin, Bölüm 3.4'de belirtilen nedenlerden dolayı NACA0018 olmasına karar verilmiştir.

Kanadın veter uzunluğu, kanat şekli kadar önemli olup sistemin verimine doğrudan etki etmektedir. Formül 3.2'de belirtilen denklem düzenlendiğinde, formül 4.3'deki

veter uzunluğunun hesaplanmasını sağlayan denklem elde edilmiş olur. Veter uzunluğu katılık değerine, rotor yarı çapına ve türbin kanat sayısına bağlıdır.

$$\sigma = \frac{N.c}{R} \quad \Rightarrow \quad c = \frac{\sigma.R}{N} \quad (4.3)$$

Formül 4.1’de belirtildiği üzere türbin gücünün hesaplanmasında, C_p güç katsayısının ve türbin boyutlarının bilinmesi gerekmektedir. C_p değeri Reynolds sayısına ve kanat uç hız oranına göre değişmektedir. Bu nedenle teorik hesaplamalarda Brusca ve arkadaşlarının hazırlamış olduğu NACA0018 kanat profiline ait C_p diyagramlarından faydalanılmıştır. C_p grafikleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Grafikler kanat uç hız oranı, katılık değeri gibi boyutsuz parametrelerle ifade edilmektedir.



Şekil 4.1 NACA0018 farklı Reynold sayılarındaki verim eğrileri (Brusca, Lanzafame ve Messina, 2014)

Reynolds sayısının etkisi Şekil 4.1’de açıkça görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça maksimum verim değerlerinin arttığı görülmektedir. Reynolds sayısının hesaplanması formül (4.4)’de verilmiştir.

$$Re = \frac{c.V.\lambda}{\nu} \quad (4.4)$$

Rüzgar türbini tasarımının yapılabilmesi için bazı parametrelerin kabul edilmesi gerekmektedir. Tasarım 10 m/s rüzgar hızında 3000 Watt elektrik üretme kapasitesine sahip 3 kanatlı bir türbin için yapılacaktır. İyi rüzgar alan bir bölgede 3000 Watt kapasiteli bir rüzgar türbini bir evin ihtiyacı karşılayabilmektedir. Havanın yoğunluğunu $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, kinematik vizkositeyi $\nu = 1,46 \times 10^{-5}$, kanat uzunluğu 3,6m olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.1'deki grafikler incelendiğinde verim eğrilerinin Reynolds sayısının $Re=5 \times 10^6$ olduğu durumda en yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle ilk hesaplamalar bu grafikteki değerler referans alınarak yapılmıştır. Şekil 4.1a'daki katılık değeri $\sigma = 0,3$ olan eğri incelendiğinde, kanat uç hız oranının $\lambda = 3$ olduğu konumda en yüksek verim değerine, ($C_p=0,51$) ulaşıldığı görülmektedir.

Bu veriler (4.1)'deki formülde yerine yazılıp işlemler yapıldığında rotor yarı çapı 1,36 olarak bulunur.

$$3000 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot 2R \cdot 3,6 \cdot 0,51 \Rightarrow R = 1,36\text{m}$$

Diyagramdan alınan katılık değeri , kanat sayısı ve hesaplanan rotor çapı, formül (4.3)'de yerine yazıldığında olması gereken kanat veter uzunluğu 0,136m olarak bulunur.

$$c = \frac{0,3 \cdot 1,36}{3} = 0,136\text{m}$$

Rüzgar türbininin teorik devir sayısının hesaplanması için formül (4.2) kullanıldığında devir sayısının 210 devir/dakika olarak bulubur.

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot 1,36}{60} = 3 \cdot 10 \Rightarrow N = 210 \text{ dev/dk}$$

Referans olarak kullanılan grafiğin doğru olup olmadığının hesaplamak için Reynolds sayısının hesaplanması gerekmektedir. Değerler formül (4.4)'de yerine

yazıldığında reynold sayısı $2,79 \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan reynold sayısı ile referans oolarak alınan diyagramların Reynolds sayısı birbirine yakın olmadığı için işlemler tekrarlanmalıdır.

$$Re = \frac{0,136 \cdot 10 \cdot 3}{1,46 \times 10^{-5}} = 2,79 \times 10^5$$

Hesaplanan Reynolds sayısı $2,79 \times 10^5$ olarak bulunmuştur. Bu nedenle hesaplanan değere en yakın olan reynold sayısındaki ($Re = 3,6 \times 10^5$) diyagramlar referans kaynak olarak kullanılmalıdır. Şekil 4.1c'deki katılık değeri $\sigma = 0,4$ olan eğri incelendiğinde, kanat uç hız oranının $\lambda = 2,96$ olduğu konumda en yüksek verim değerine, ($C_p = 0,464$) ulaşıldığı görülmektedir. Yukarıdaki işlemler tekrarlandığında rotor yarı çapı $1,496m$ olarak hesaplanmıştır. veter uzunluğu $0,199m$, devir sayısı 189 dev/dk, Reynold sayısı olarak hesaplanmıştır. Reynold sayısı referans reynold sayısına yakın olduğu için sonuçlar kabul edilir. Hesaplanan rotor yarı çapı imalat aşamasında zorluk çıkartmaması açısından $1,5m$ olarak yuvarlanmıştır. Buna bağlı olarak veter uzunluğu $200mm$ olarak kabul edilmiştir. Yapılan işlemler Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 Teorik tasarım kriterleri ve hesaplama sonuçları

	Referans	1. Hesaplama	2. Hesaplama
Güç (kW)	-	3	3
Kanat Profili	-	NACA0018	NACA0018
Rüzgar Hızı (m/s)	-	10	10
Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	-	1,2	1,2
Kinematik viskozite (m ² /s)	-	$1,46 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-5}$
Kanat Sayısı	-	3	3
Seçilen Reynold Sayısı	-	5×10^6	$2,79 \times 10^5$
C_{pmax} ; σ_{cpmax} ; λ_{cpmax}	Şekil 5.1	0,51; 0,3; 3 Şekil 5.1a	0,464; 0,4; 2,96 Şekil 5.1c
Rotor yarıçapı (m)	Formül (5.1)	1,36	1,496
Veter uzunluğu (m)	Formül(5.3)	0,136	0,199
Devir Sayısı (dev/dk)	formül (5.2)	210	189
Reynolds Sayısı	formül (5.4)	$2,79 \times 10^5$	4×10^5

4.2 Yataklama Hesabı

Yataklamaya ilişkin hesaplar yapılmadan önce türbin gövdesinde kullanılacak rulman türü belirlenmelidir. Rüzgar türbinleri hem radyal hem de aksenal kuvvetlere maruz kaldığı için konik makaralı rulman kullanılması ve rulmanların O düzeninde yerleştirilmesi uygun görülmüştür.

Şekil 4.1.c incelendiğinde katılık değeri 0,4 olan rüzgar turbini için en yüksek verimin 2,96 kanat uç hız oranında olduğu görülmektedir. Tasarımın teorik olarak, 10 m/s rüzgar hızında 189 devir/dk da maksimum kapasitesi olan 3000 Watt üretmesi öngörülmektedir. 10 m/s rüzgar hızının üstündeki rüzgar hızlarında da türbin 3000 Watt üretecektir. Bu nedenle aşırı rüzgar hızlarında türbin dönüşünün sabit olması için bir manyetik frenleme olması gerekmektedir. Rüzgar türbinlerinin devir sayısı rüzgar hızına bağlı olarak sürekli değişmektedir. Ancak teorik rulman hesaplamalarında kullanılmak üzere devir sayısı ortalama 200 devir/dk olarak kabul edilmiştir. Rüzgar turbini sürekli 200 devir/dk da dönmeyecek olmasına rağmen, seçilen rulmanların emniyetli olması için hesaplamalarda maksimum devir sayısı kullanılmıştır. Ayrıca çalışma ömrünün ise en az 90000 saat olması uygun görülmüştür.

Bir Rulmanın hesabı ve seçimi;

- Dinamik Yük sayısı (C),
- Eşdeğer Yük (P),
- Nominal Ömür (L)'ye bağlıdır.

Dinamik yük sayısının hesabı formül 6.5'de verilmiştir. Seçilen rulmanın tasarıma uygun olduğunun doğrulanması için hesaplanan dinamik yük sayısı, tablo değerinden küçük olmalıdır.

$$C_{\text{hesap}} = P \cdot \frac{fl}{fn} \leq C_{\text{tablo}} \quad (4.5)$$

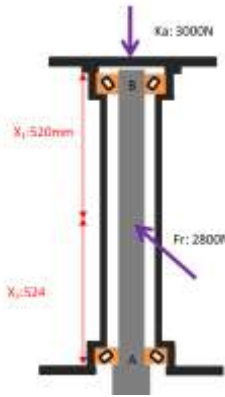
Burada fl dinamik yüklenme endeksi, fn devir hızı faktörü ve P eşdeğer dinamik yüküdür. fl ve fn hesaplanmasını sağlayan formüller sırasıyla formül (4.6) ve (4.7)'de verilmiştir.

$$fl = \sqrt[p]{\frac{Lh}{500}} \quad (4.6)$$

$$fn = \sqrt[p]{\frac{100}{3n}} \quad (4.7)$$

Burada Lh nominal ömrü, n devir sayısını ifade etmekte olup p değeri bilyalı rulmanlar için 3 makaralı rulmanlar için 10/3 olarak alınır.

Hesaplamalara başlamadan önce rulmanlara etkiyen yükler belirlenmelidir. Şekil 4.2'de gövde ve yataklamanın bir modellemesi bulunmakta olup türbin üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Bu kuvvetler türbinin modellenerek maksimum oluşacak yüklerin hesaplanmasıyla belirlenmiştir. F_r radyal kuvvet türbinin gövde merkezine etkilediği kabul edilir. Bu durumda X_1 ve X_2 mesafeleri hesaplanırken seçilen rulmanların etkili yük merkezleri hesaba katılmıştır.



Şekil 4.2 Türbin gövde modellemesi

Şekil 4.2'de bileşke radyal kuvvet ve aksel kuvvet gösterilmiştir. Radyal yük her A ve B ile gösterilen rulmanlar tarafından karşılanmaktadır.

$$M_B = 0 \quad F_r \cdot X_1 = F_{rA} \cdot (X_2 + X_1) \Rightarrow 2800 \cdot 520 = F_{rA} \cdot 1044$$

$$F_{rA}=1395N, F_{A_A}=3000N$$

$$M_A=0 \quad F_r \cdot X_2 = F_{rB} \cdot (X_2 + X_1) \Rightarrow 2800 \cdot 524 = F_{rB} \cdot 1044$$

$$F_{rB}=1405 N, F_{A_B}=0 N$$

Rüzgar türbininin tasarımda seçilen rulmanlara ait özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu rulmanların istenilen kriterlere uygun olup olmadığının belirlenmesi için formül (4.5) uygulanmalıdır. Bu formülün uygulanabilmesi için öncelikle eşdeğer yükün hesaplanması gerekmektedir. Eşdeğer yük rulmanlara etkiyen radyal ve aksel yüklerle bağlı olarak hesaplanır.

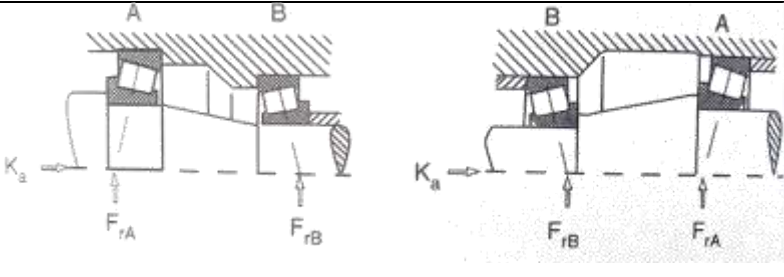
Tablo 4.2 A ve B rulmanlarının teknik özellikleri (FAG Rulman Katoloğu, 2016)

Mil Boyutları		Ağırlık		Yük Sayısı		Limit		Ref. hız		D ₁		D ₂		D ₃			
d	D	B	C	T	M	Din	e	Y	Stat.	Y ₀	Yorulma	Hız	Max	min	min		
mm						C			C ₀		Limit	d/dak.	mm				
						kg	kN		kN		C _u						
B	60	95	27	21	27	0,73	96,5	0,33	1,83	150	1,01	20,9	6700	3800	67	67	85
A	60	100	30	23	30	1,01	116	0,4	1,51	173	0,83	24,3	6300	3800	67	67	88

Konik makaralı rulmanlarda radial yükler açılmal konumundan dolayı aksel yükler oluşturur. Bu nedenle A rulmanına etkiyen toplam aksel yükün bulunması gerekmektedir.

Tablo 4.3’de konik makaralı rulmanlarda aksel kuvvet formülleri verilmiştir. Tablo FAG rulman kataloğundan düzenlenerek eklenmiştir.

Tablo 4.3 Dinamik yükün hesabında kullanılan aksel kuvvetin hesaplanması (FAG Rulman Kataloğu

		
Yük Durumu	Dinamik eşdeğer yükün hesaplanmasında kullanılan FA aksel kuvveti	
	A Rulmanı	B rulmanı
$\frac{Fr_A}{Y_A} \leq \frac{Fr_B}{Y_B}$	$F_a = K_a + 0,5 \cdot \frac{Fr_B}{Y_B}$	-
$\frac{Fr_A}{Y_A} > \frac{Fr_B}{Y_B}$ $K_a > 0,5 \cdot \left(\frac{Fr_A}{Y_A} - \frac{Fr_B}{Y_B} \right)$	$F_a = K_a + 0,5 \cdot \frac{Fr_B}{Y_B}$	-
$\frac{Fr_A}{Y_A} > \frac{Fr_B}{Y_B}$ $K_a < 0,5 \cdot \left(\frac{Fr_A}{Y_A} - \frac{Fr_B}{Y_B} \right)$	-	$F_a = 0,5 \cdot \frac{Fr_B}{Y_B} - K_a$

Tabloda verilen formüllere hesaplanan kuvvet ve katalogtan alınan veriler eklenerek çözüldüğünde;

$$\frac{Fr_A}{Y_A} = \frac{1395}{1,51} = 924 \quad , \quad \frac{Fr_B}{Y_B} = \frac{1405}{1,83} = 768 \quad \Rightarrow \quad \frac{Fr_A}{Y_A} > \frac{Fr_B}{Y_B} \text{ olduğu belirlenir.}$$

$$K_a = F_{A_A} = 3000 \text{ N}$$

$0,5 \cdot \left(\frac{Fr_A}{Y_A} - \frac{Fr_B}{Y_B} \right) = 0,5 \cdot (924 - 768) = 78 \Rightarrow K_a > 78$ olduğu için A rulmanına etkiyen aksel yük 3384N dur.

$$F_a = K_a + 0,5 \cdot \frac{Fr_B}{Y_B} = 3000 + 0,5 \cdot 768 = 3384 \text{ N}$$

Türbin üzerinde oluşan aksenal yükü A rulmanı taşımaktadır. O veya X düzeninde yerleştirilen rulmanlarda eşdeğer dinamik ve statik yük formülleri Tablo 4.4'de verilmektedir. Tabloda Fa ve Fr rulman çiftine etkiyen kuvvetleri verir. Y ve e değerleri tek sıralı rulmanlara ait rulman tablolarından alınır.

Tablo 4.4 Eşdeğer dinamik ve statik yük hesaplama formülleri (Fag Rulman Katoloğu, 2016)

Eşdeğer Dinamik Yük (P)	Eşdeğer Statik Yük (P ₀)
$P = Fr + 1,12 \cdot Y \cdot Fa$ (kN) , $\frac{Fa}{Fr} \leq e$	$P_0 = Fr + 2 \cdot Y_0 \cdot Fa$ (kN)
$P = 0,67 \cdot Fr + 1,68 \cdot Y \cdot Fa$ (kN) , $\frac{Fa}{Fr} > e$	
Eşdeğer Dinamik Yük Sayısı (C) $C = 1,175 \cdot C_{\text{tek rulman}}$ (kN)	Eşdeğer Statik Yük Sayısı (C) $C_0 = 2 \cdot C_{0 \text{ tek rulman}}$ (kN)

A rulmanı için aşağıdaki değerler yazılarak Tablo 4.4 deki formüller uygulandığında, eşdeğer dinamik yük değeri P_A değeri 9,5kN, P_{0A} değeri ise 7kN olarak bulunur.

$$Fr_A = 1395N$$

$$Fa = 3384N$$

$$Y = 1,51$$

$$Y_0 = 0,83$$

$$e = 0,4$$

$\frac{Fa}{Fr} = 2,42$ değerinin e' den büyük olduğu formül uygulandığında eşdeğer dinamik yük ve statik yük sırasıyla;

$$P_A = 0,67 \cdot Fr + 1,68 \cdot Y \cdot Fa \Rightarrow P_A = 0,67 \cdot 1,395 + 1,68 \cdot 1,51 \cdot 3,384 = 9,5 \text{ (kN)}$$

$$P_{0A} = Fr + 2 \cdot Y_0 \cdot Fa \Rightarrow P_{0A} = 1,395 + 2 \cdot 0,83 \cdot 3,384 = 7 \text{ (kN)}$$

B rulmanı için aksel kuvvet sıfır olduğu için eşdeğer dinamik yük radyal yük ile aynı olur.

$$P_B = F_{rB} = 1405N,$$

Bulunan eşdeğer dinamik yük ile hesaplanan $C_{hesaplama}$ değerinin C_{tablo} değerinden küçük olması rulman seçiminin uygun olduğu anlamına gelmektedir.

A rulmanının C_{tablo} değeri 116kN' dır. Dinamik yüklenme endeksi ve devir hızı faktörü değerleri FAG rulman kataloğundan alınmıştır.

f_l dinamik yüklenme endeksi 90000 saat için 4,75 , f_n devir hızı faktörü ise 200 dev/dk için 0,584 olarak alınmıştır.

Dinamik yük sayısının hesaplaması için formül (4.5) uygulandığında,

$C_{hesaplama} = P \cdot \frac{f_l}{f_n} = 95 \cdot \frac{4,75}{0,584} = 77,27kN$ olarak hesaplanır. Bulunan değer tablodan okunan dinamik yük sayısı değeri olan 116 kN değerinden küçük olduğu için rulman seçimi uygundur.

B rulmanının C_{tablo} değeri 96,5kN' dır. Formül (4.5) B rulmanı için uygulandığında,

$C_{hesaplama} = P \cdot \frac{f_l}{f_n} = 1,405 \cdot \frac{4,75}{0,584} = 11,42kN$ olarak hesaplanır. Bulunan değer tablodan okunan dinamik yük sayısı değeri olan 96,5 kN değerinden küçük olduğu için rulman seçimi uygundur.

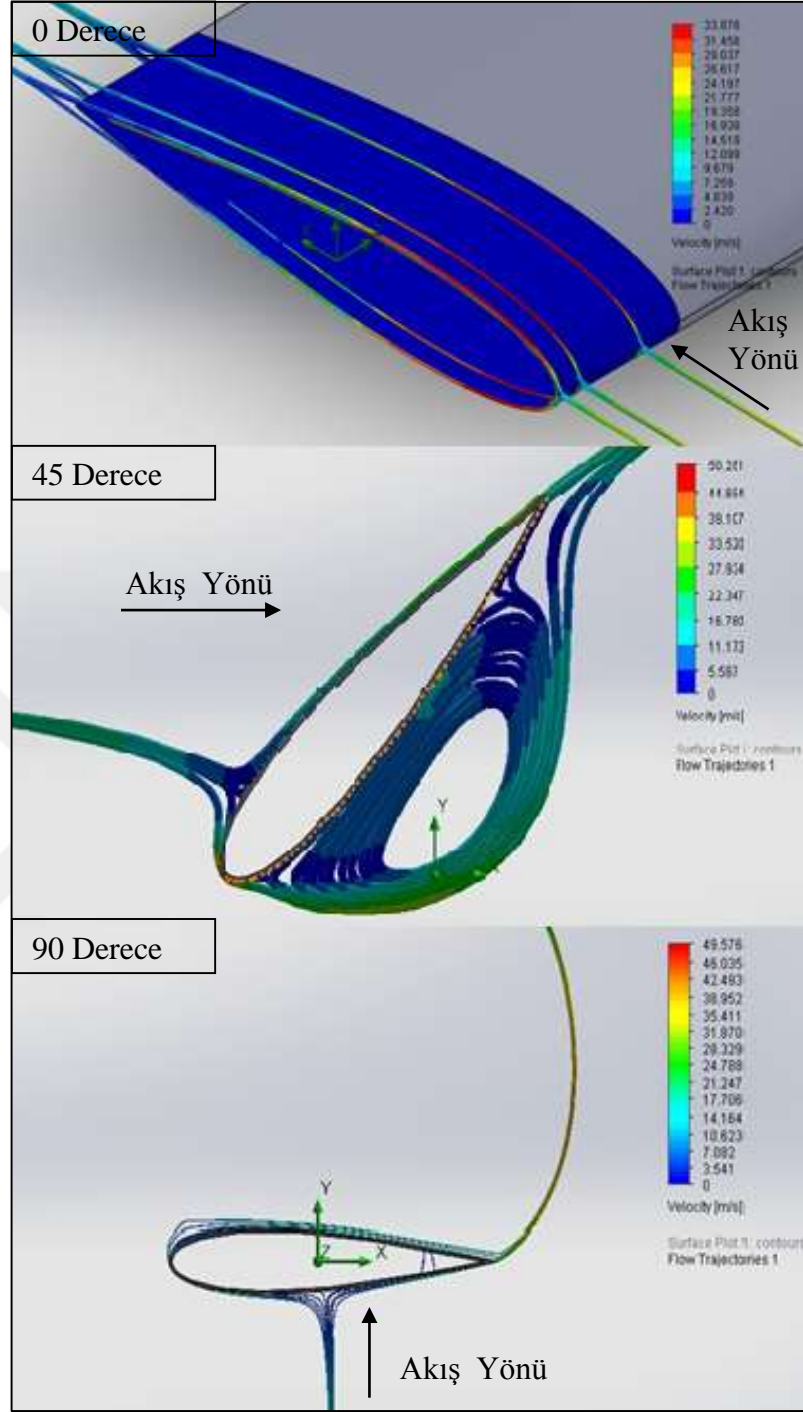
4.3 Kompozit Kanat Analizi ve İmalatı

4.3.1 Kanat Üzerine Etkiyen Basınç Dağılımları

Rüzgar türbinlerinin kanatları hem hafif hem de sert rüzgarlara karşı dayanıklı olmalıdır. Bu nedenle kanat imalatında genellikle kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Yapılan analizde üç farklı kanat pozisyonunda, rüzgarın kanat üzerinde oluşturduğu basınç dağılımları hesaplanmıştır. Dikey rüzgar türbini kanadı solidworks programında çizilmiş olup analizler de bu program ile yapılmıştır. Kanadın veter uzunluğu 200 mm ve yüksekliği 3500mm dir. Çalışma iki aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada türbin kanadı rüzgar akışına göre 0°, 45°, 90° lik açılarda konumlandırılmış ve bir akışa tabi tutularak kanat üzerindeki basınç dağılımları belirlenmiştir.

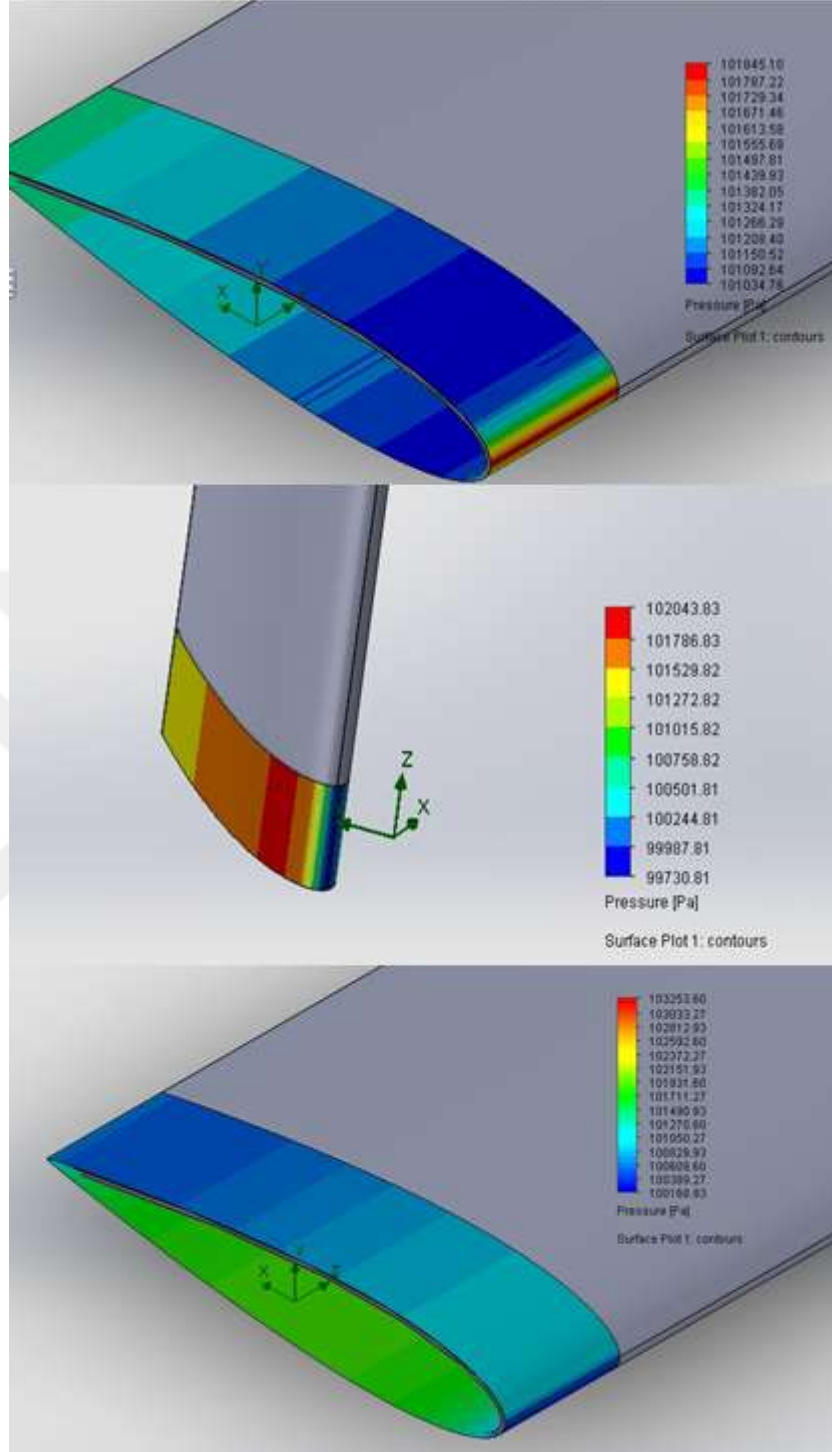
Akışa bağlı olarak elde edilen kanat üzerindeki basınç dağılımlarının kanat yapısına olan etkisi merak edilmiş olup, Solidworks'ün kompozit analizi modülü kullanılarak analizler yapılmıştır.

Akış analizlerinde 15°C lik havanın özellikleri kullanılmıştır ve rüzgar hızı 27 m/s olarak alınmıştır. 27 m/s'lik rüzgar hızı bir fırtına durumunu ifade etmektedir ve bu rüzgar hızında rüzgar türbinleri fren veya kilit sistemleri ile durdurulurlar. Akış analizlerinde hava basıncı 101325 Pa olarak alınmıştır. Kanat 0 konumunda bulunurken en yüksek basınç kanadın uç kısmında oluşur. Kanat 90 ° iken akışa dik konumdadır ve akış önünde duvar etkisi oluşturarak en yüksek direnci oluşturur. Şekil 4.3'de 0°, 45 ° ve 90 ° konumlandırılmış kanat üzerindeki rüzgar akışı görülmektedir.



Şekil 4.3 . 0 ° , 45 ° , 90 ° 'deki akış görünümü

Şekil 4.4'de kanat üzerinde akıştan dolayı oluşan basınç dağılımı gösterilmektedir. Kanat üzerinde oluşan bu basınç farklılıklarından dolayı oluşan kuvvetler kanadın dönme etkisini oluşturur.



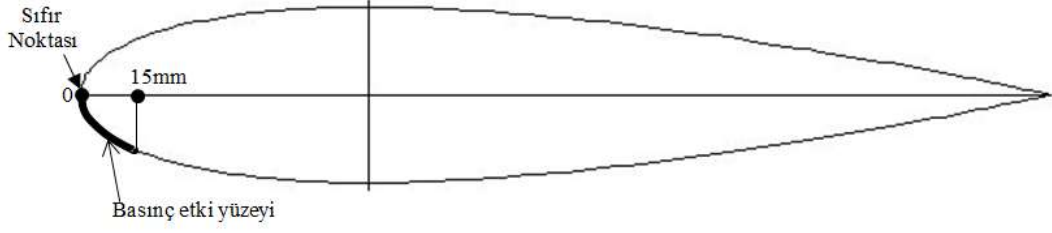
Şekil 4.4 0°, 45° ve 90°deki kanat yüzeyinde oluşan basınç değişimi

Statik analizlerde kullanılan basınç denklemleri akış analizinde elde edilen basınç dağılımı grafiklerinden elde edilmiştir. Tablo 4.5’de tüm konumlar için elde edilen basınç denklemleri bulunmaktadır. Denklemler grafiklerin farklı aralıklara bölünmesi ile tanımlı hale getirilebilmiştir. Örneğin; sıfır derecedeki basınç dağılımı grafiğinden

0 ile 15 mm aralığında geçerli olan denklem $y = -45883x + 439,88$ olarak bulunmuştur. Sıfır derecedeki 0 ile 15 mm aralığındaki verilen örneğin gösterimi Şekil 4.5'de bulunmaktadır.

Tablo 4.5 Basınç diyagramlarından elde edilmiş basınç denklemleri

KONUM	VETER UZUNLUĞU ARALIĞI (mm)	BASINÇ DENKLEMİ (Pa)
0 Derece Her İki Yüzey	X= (0.0 - 15) X= (15 -40) X= (040 - 200)	$y = -45.883x + 439,88$ $y = 170.397x^2 - 12.533x - 21,967$ $y = 1.802,8x - 317,66$
45 Derece Akışkan Temas Yüzeyi	X= (0,0-10) X= (10-170) X= (170-190) X= (190-200)	$y = 24.404x - 129,83$ $y = 2.716,7x + 21,611$ $y = 500$ $y=250$
45 Derece Akışkan Temas Etmeyen Yüzey	X= (0,0-10) X= (10-20) X= (20-80) X= (80-200)	$y= -1.300$ $y=-850$ $y=-800$ $y= 4.841x -1.157$
90 Derece Akışkan Temas Eden Yüzey	X= (0-5) X= (5-25) X= (25-90) X= (90-160) X= (160-200)	$y = -70.527x - 781,18$ $y = 63.804x - 1.504,2$ $y = -177.632x^2 + 29.380x - 606,72$ $y = -34.844x^2 + 7.098,8x + 239,44$ $y = -262.129x^2 + 84.269x - 6.284,5$
90 Derece Akışkan Temas Etmeyen Yüzey	X= (0-10) X= (10-50) X= (50-190) X= (190-200)	$y= -750$ $y= -900$ $y = 3.685,5x - 1.047,2$ $y= -380$



Şekil 4.5 0-15 mm veter uzunluğu arasında oluşan basınç etki yüzeyi

Örnekte açıklandığı üzere 0 ile 15mm veter uzunluğu aralığında, koyu çizgi ile gösterilen basınç etki yüzeyinde veter uzunluğuna bağlı $y = -45.883x + 439,88$ basınç denklemi geçerlidir. Statik analizlerde tüm kanat yüzeyleri Şekil 4.5'deki gibi belirlenen aralıklar için bölünmüş ve Tablo 4.5'deki bağıntılar basınç değeri olarak girilmiştir.

4.3.2 Statik Analizler

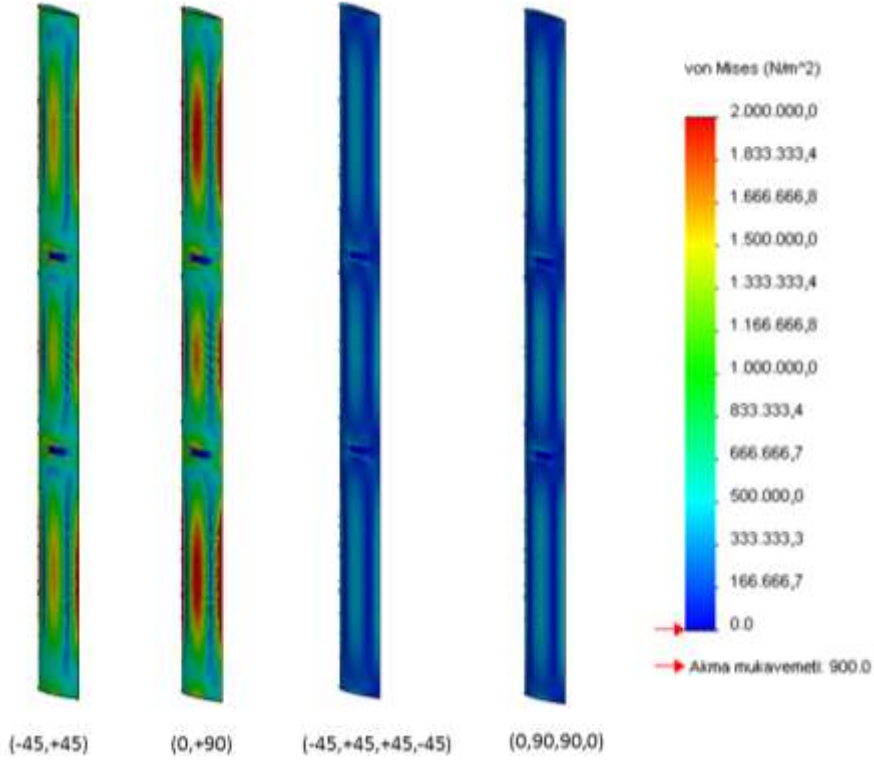
Statik analizlerde malzeme türü kompozit malzeme olan cam elyaf / epoksi olarak seçilmiş ve analizler her açı durumu için (0 °,45 °,90 °) tekrarlanmıştır. Cam elyaf epoksi malzemenin analizlerde kullanılan ortotropik malzemenin özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Farklı açılarda iplik dizilimi olan kumaşların analizleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Tek ve ikili katman kumaş olarak analizler yapılmıştır. Tek katman kumaş analizlerinde (-45/+45) ve (0/90) iplik dizilimine sahip kumaşların yerleşimleri yapılarak analizler tekrarlanmıştır. Çift katman kumaş analizlerinde simetrik yerleşim yapılmış olup (-45/+45,+45/-45) ve (0/90,90/0) olarak analizler tekrarlanmıştır.

Tablo 4.6 Cam elyaf / epoksi malzeme özellikleri (Singh, 2013)

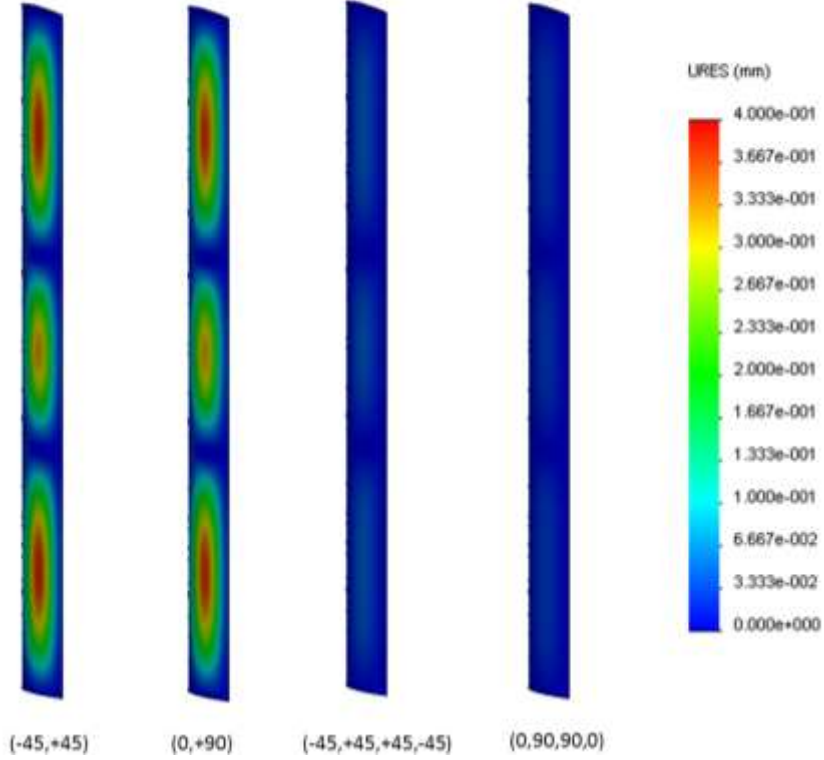
Malzeme Özellikleri	Değerler
Elatisite Modülü E_{xx}	38e3 Mpa
Elatisite Modülü E_{yy}	13e3 Mpa
Elatisite Modülü E_{zz}	13e3 Mpa
Poisson Oranı μ_{xy}	0,31
Poisson Oranı μ_{yz}	0,05
Poisson Oranı μ_{zx}	0,31
Kayma Modülü G_{xy}	1000 Mpa
Kayma Modülü G_{yz}	16 Mpa
Kayma Modülü G_{zx}	60 Mpa
Akma Mukavemeti	900 Mpa
Yoğunluk	1850 kg/m ³

Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8’de sırasıyla 0 °, 45 °, 90 ° konumları için farklı iplik dizilimindeki kumaş tiplerindeki gerilim ve sehim diyagramları verilmiştir. Diyagramlar incelendiğinde en fazla gerilmenin ve sehimin kanadın 90 °’lik konumunda gerçekleştiği görülmektedir. Tasarımlar her zaman en yüksek gerilim değerlerini karşılayabilecek şekilde yapılmalıdır. Bu nedenle Şekil 4.8 incelendiğinde (-45/+45,+45/-45) ve (0/90,90/0) iplik yerleşimlerindeki kompozit kanatların maksimum gerilme ve sehim değerlerinin daha düşük olduğu görülmekte olup (0/90/90/0) dizilimindeki kompozit kanadın sonuçları daha iyidir. Bu nedenle imalatta (0/90/90/0) iplik dizilimindeki cam elyaf kumaş kullanılmıştır.

0 DERECE- GERİLİM

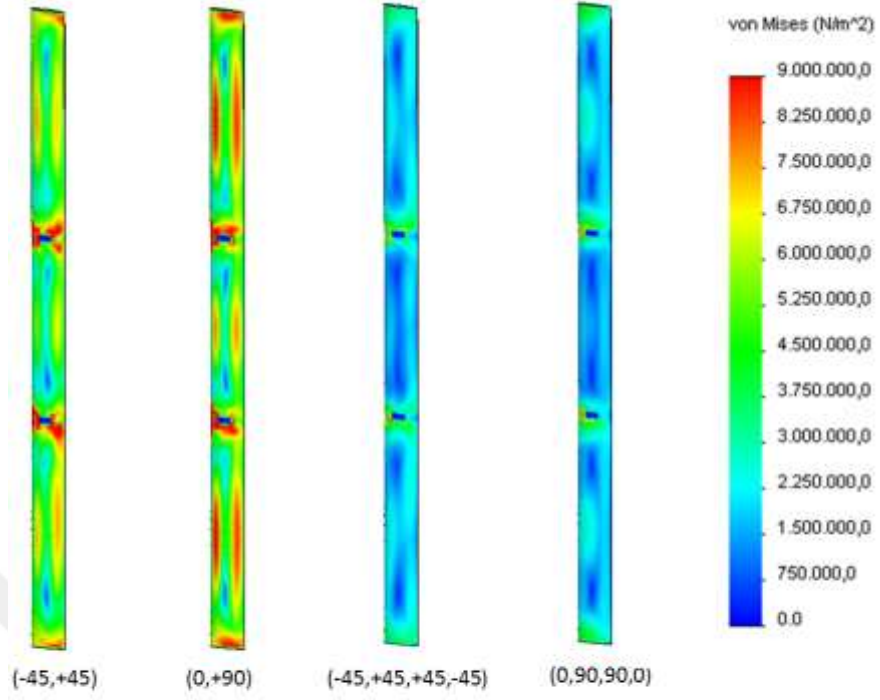


0 DERECE - SEHİM

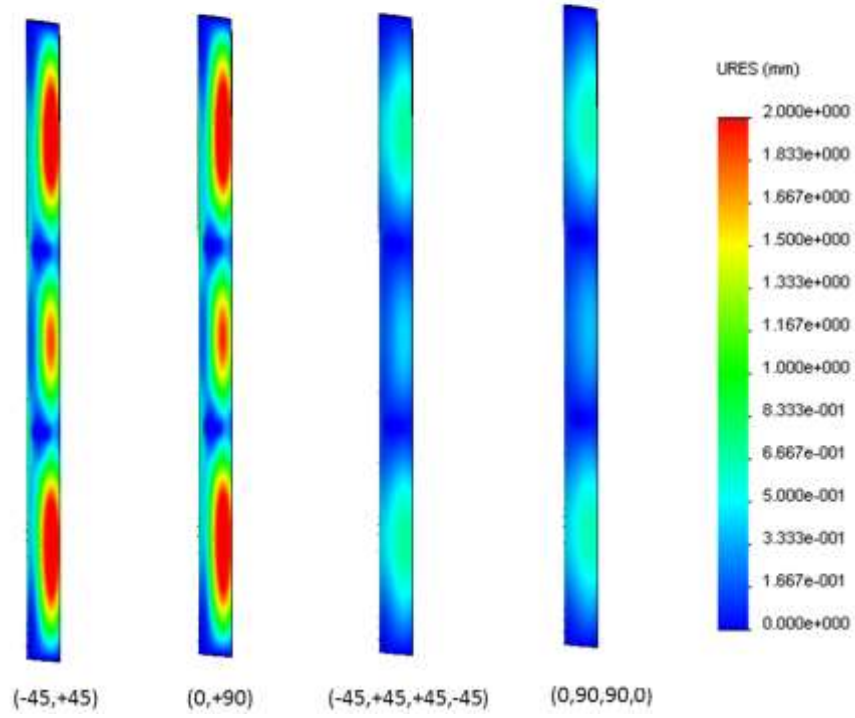


Şekil 4.6 0 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehım grafikleri

45 DERECE- GERİLİM

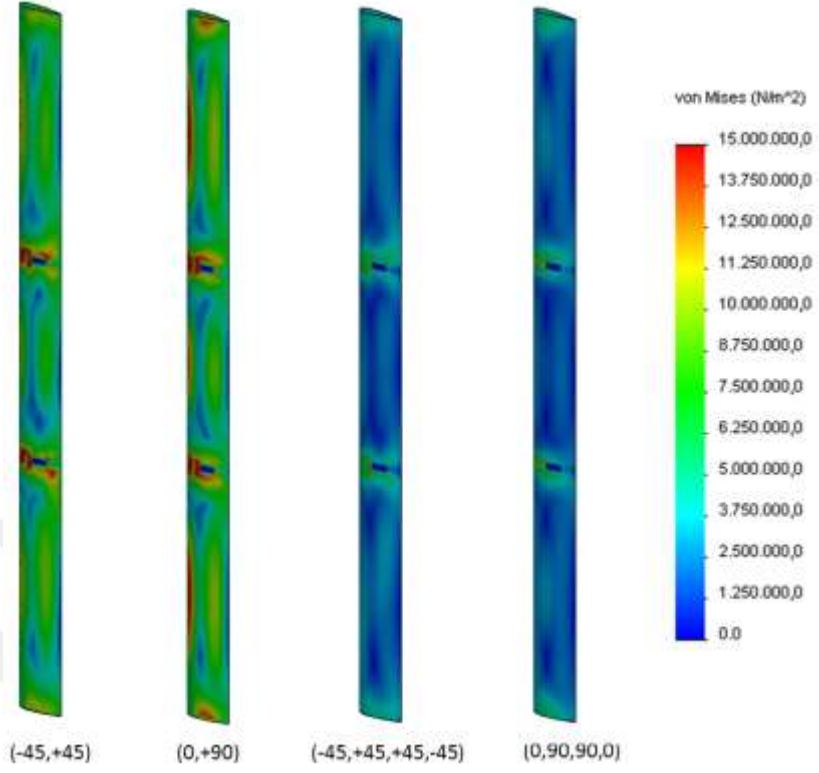


45 DERECE- SEHİM

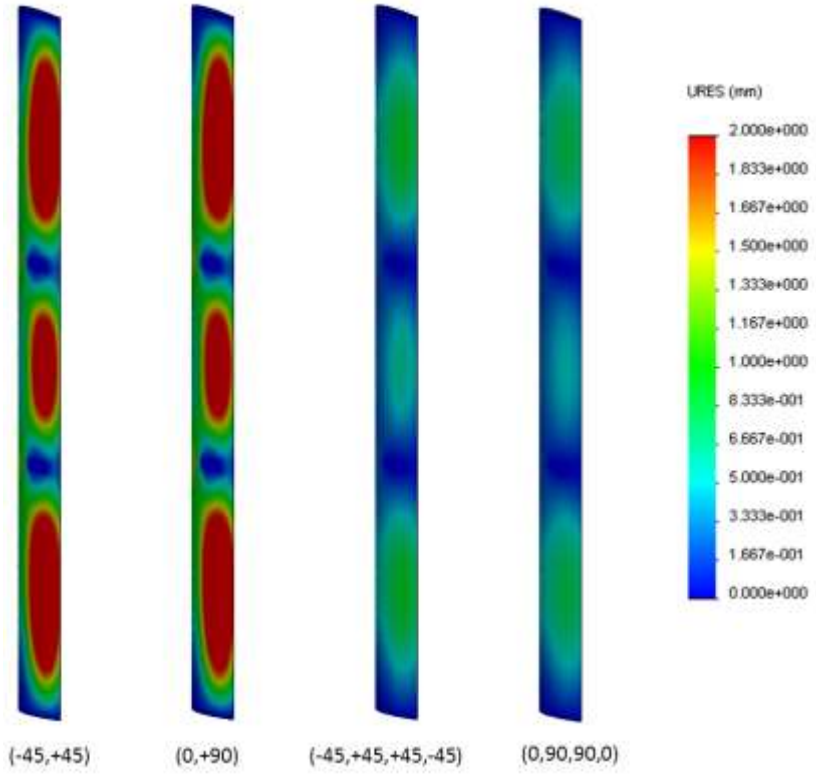


Şekil 4.7 45 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehım grafikleri

90 DERECE- GERİLİM



90 DERECE- SEHİM



Şekil 4.8 90 derece için farklı tip kumaşların gerilim ve sehım grafikleri

Bir kompozit üretimi yapılmadan önce kompozitin dayanması istenilen kuvvetler, yükler belirlenmelidir.

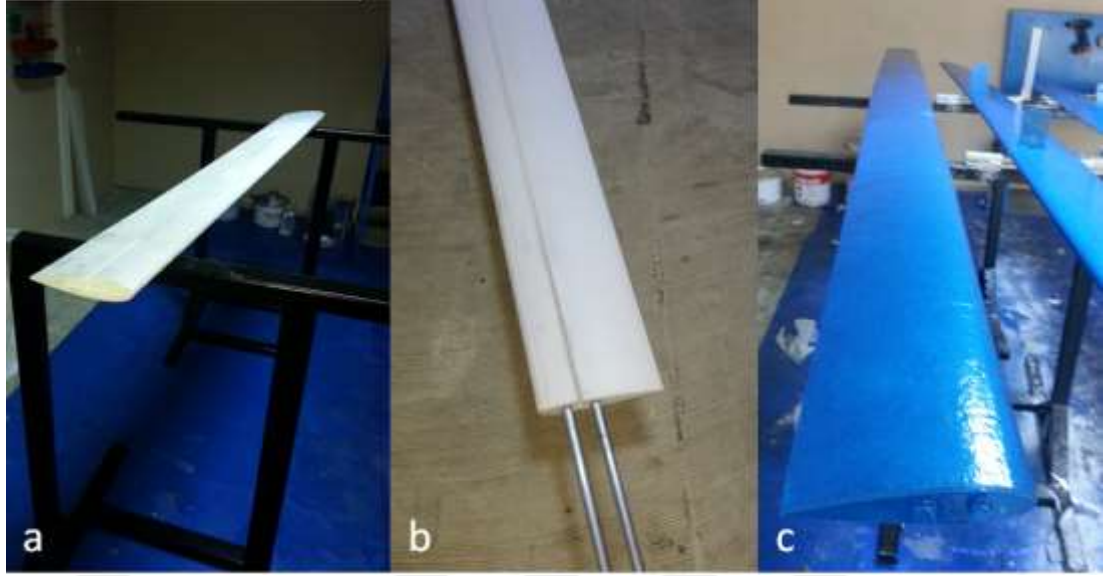
Sonuç olarak her analizde hasar katsayısı (FOS) birin üstünde olduğu için emniyetlidirler ve 27m/s lik rüzgar akışı koşullarına dayanabilirler. Tablo 4.7’de yapılan analiz sonucu çıkan maksimum gerilme ve yerdeğiştirme değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7 Analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Derece	Gerilme (MPa)			Sehim (mm)		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
(-45/45)	13,86	24,6	36,5	1,17	2,9	3,4
(0/90)	11,24	21,3	35,8	1,10	2,78	3,16
(-45/45/45/-45)	4,16	11,1	16,8	0,2	0,57	0,68
(0/90/90/0)	3,97	9	13,9	0,16	0,44	0,54

4.3.3 Türbin İmalatı

Yapılan tasarım hesaplamaları ve analizler doğrultusunda, Darrieus tipi bir rüzgar türbini imalatı gerçekleştirilmiştir. Rüzgar türbininin kanatlarının imalatında kanat formunda kesilmiş XPS köpük, epoksi reçine ve 0,90 iplik dizilimine sahip cam elyaf kullanılmıştır. Kanat formunda kesilen köpük içerisinde alüminyum miller geçirilerek bir konstrüksiyon oluşturulmuştur. Kanatlar türbin bağlantı kollarına bu millerden bağlanmıştır. Böylece kanadın tüm yükü alüminyum miller tarafından taşınmaktadır. Cam elyaf kumaş iki kat olarak (0,90,90,0) diziliminde olacak şekilde köpük üzerine yerleştirilmiş ve el yatırma metodu ile üzerine reçine sürülmüştür. Kanadın kurlenme süresi tamamlandığında, ince bir zımpara ile tüm kanat zımparalanmış ve boyaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.9’da kanat içerisindeki XPS köpük kanat ,alüminyum miller ve boyama işlemi tamamlanmış kompozit türbin kanatları gösterilmiştir. Türbin dövdesi çelikten üretilmiştir. Yataklamada konik makaralı rulmanlar kullanılmıştır. Rüzgar türbininin bitmiş hali Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.923 a) XPS köpük kanat, b) kanat iskeleti, c) boyalı kompozit kanat



Şekil 4.10 Bitmiş rüzgar türbini

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Artan Dünya nüfusuna bağlı olarak, elektrik tüketimi de artmaktadır. Elektrik üretiminin büyük bir kısmı fosil kaynaklardan elde edilmekte olup fosil kaynakların tükeniyor olması elektrik fiyatlarında sürekli bir artışa neden olmaktadır. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin giderek artmasını sağlamaktadır.

Ülkemizin enerji görünümü incelendiğinde her yıl yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımın arttığı görülmektedir. Özellikle, rüzgar potansiyeli bakımından oldukça verimli alanlara sahip olan ülkemizde 2014 yılında 3.762 MW'lık olan kurulu güç değeri 2015 yılı sonu itibariyle 4.718 MW değerine yükselmiştir.

Yapılan rüzgar türbini yatırımları genellikle büyük ölçekli yatay rüzgar türbinleri olup, yerleşim merkezlerinin uzağında sınırlı alanlarda bulunmaktadır. Türkiye rüzgar potansiyeli haritası incelendiğinde şehir merkezlerinde de oldukça yüksek bir rüzgar potansiyeli olduğu görülmektedir. Ancak şehirleşmenin bulunduğu alanlarda rüzgar terminolojisinde pürüzlülük olarak adlandırılan kavram çok yüksektir. Buda rüzgar akışının türbülanslı olmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak çalışma, şehirleşmenin bulunduğu alanlardaki rüzgar potansiyelinden faydalanmak üzere, her yönden gelen rüzgar ile çalışmasını sürdüren ve türbülanslı hava koşullarına karşı yatay eksenlilere göre çok daha dayanıklı olan dikey eksenli rüzgar türbinlerini incelemeyi amaçlamıştır.

Bu çalışmada, öncelikle dikey rüzgar türbinleri çalışma prensiplerine göre sınıflandırılmış ve tasarımları incelenmiştir. Tasarım hesapları yapılmak üzere yaygın olarak piyasada bulunan ve kanat üzerinde oluşan basınç farkından dolayı dönme hareketi yapan Darrieus tipi rüzgar türbini seçilmiştir. Türbin tasarımına geçilmeden önce kanat üzerine etkiyen akış ve oluşan kuvvetler incelenmiş, bu kuvvetlerin oluşturduğu dönme etkisi ve türbin verimlerinin ampirik formülleri detaylı olarak anlatılmıştır.

Rüzgar türbini tasarımlarında birçok belirsiz parametre bulunmaktadır. Kanat sayısı, veter uzunluğu, kanat profili, kanat uç hız oranı ve katılık gibi parametreler türbin tasarımını ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir. İstenilen sonuçlarda bir türbin tasarımı yapılabilmesi için bu çalışmada, öncelikle bu parametreler ve etkileri, yapılmış analizlerin ışığında değerlendirilmiş ve türbin tasarımlarına olan etkileri ortaya konmuştur. Tüm detayları ile türbin tasarım kriterleri anlatılmıştır.

Tasarım kriterleri ve etkilerinin anlaşılmasının ardından, 3kW kapasiteli Darrieus tipi bir rüzgar türbininin hesaplamaları yapılmıştır. Kapasite olarak 3 kW seçilmesinin nedeni boyut olarak bir evin teras çatısına veya bahçesine konabilecek boyutlarda olması ve rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından verimli olan bölgelerde, bir evin ihtiyacını karşılayabilecek büyüklükte olmasıdır.

Kanat profili olarak NACA0018 seçilmiş ve hesaplamalar bu kanat türüne göre yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda, türbin kanat uzunluğu 3600 mm, veter uzunluğu 200 mm ve rotor yarıçapı 1500 mm olarak belirlenmiştir. Ardından, türbinin yataklama tasarımı, rulman hesaplamaları ve konstrüksiyon tasarımı yapılmış, üç boyutu çizim programları ile türbin çizimleri ve imalatına yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

Türbin kanatlarının imalatı yapılmadan önce Solidworks yazılımı ile statik kompozit analizi yapılmış ve maksimum rüzgar hızında kanadın dayanımı incelenmiştir. Analiz sonucunda, kanadın 0, 90, 90, 0 iplik diziliminde olan iki kat cam elyaf ve epoksi reçine ile imal edilmesine karar verilmiştir.

Tasarımın tamamlanmasıyla birlikte, imalat çizimleri hazırlanmış ve türbin üretimi tamamlanmıştır. Çalışma sonucu ortaya çıkan prototip ticari bir değer taşıdığı için tasarım detayları ve imalat resimleri paylaşılacaktır.

Sonuç olarak, hesaplamaları, analizleri ve tasarımı yapılan 3 kW kapasiteli, Darrieus tipi bir rüzgar türbini imal edilmiş olup test çalışmaları için hazır hale getirilmiştir. Bundan sonraki aşamada türbin saha testlerinin yapılarak verimlilik analizlerinin ve ürün iyileştirme çalışmalarının yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Agir, H. ve Kar, M. (2010). Türkiye'de elektrik tüketimi ve ekonomik gelişmişlik düzeyi ilişkisi: yatay kesit analizi/relationship between electricity consumption and level of economic development in Turkey: A cross-section analysis. *Sosyoekonomi*, 149.
- Atlıhan A.B. (2006). *Rüzgar enerjisi ve Darrieus rüzgar çarklarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Brusca, S., Lanzafame, R. ve Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5 (4), 333-340.
- Castelli, M. R., De Betta, S. ve Benini, E. (2012). Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis Darrieus wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 305-3011.
- Deda, B. (2000). *Savonius rüzgar enerjisi ve savonius rüzgar çarklarının performanslarının artırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Elektrik Mühendisleri Odası (2016). *TMMOB Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü*. 20 Haziran 2016,
http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369#.V72EgiiLShc
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2014). *Dünya ve ülkemiz enerji tabii kaynaklar görünümü*. 10 Haziran 2015,
http://www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages/Sayi_06/Sayi_06.html#p=9
- Eriksson, S., Bernhoff, H. ve Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (5), 1419-1434.

Fag rulman katalogu (2016). 10 Mayıs 2016,

http://medias.schaeffler.com/medias/tr!hp.ec/1_R*0*C

Global Wind Energy Coincil (2016). *Global wind statistics*. 15. Nisan.2016,

http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR.pdf

Islam, M., Ting, D. S. K., ve Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (4), 1087-1109.

Le Gourieres, D. (1982). *Wind power plants theory and design*. England: Pergamon Pres Ltd, Headingtan Hill Hall Oxford OX30BW.

Roh, S. C. ve Kang, S. H. (2013). Effects of a blade profile, the Reynolds number, and the solidity on the performance of a straight bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27 (11), 3299-3307.

Sabaeifard, P., Razzaghi, H., ve Forouzandeh, A. (2012). Determination of vertical axis wind turbines optimal configuration through CFD simulations. *International Conference on Future Environment and Energy*, 28, 109-13.

Singh, R. (2013). Stress analysis of orthotropic and isotropic connecting rod using finite element method. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2 (2), 92-100.

Türkiye İstatistik Kurumu (2015). *Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları*. 1 Temmuz 2016, http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1029

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (2016). *Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu*. 12 Ağustos 2016, <http://www.tureb.com.tr/turebsayfa/duyurular/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2016>

Wahl, M. (2007). *Designing an H-rotor type wind turbine for operation on Amundsen-Scott South Pole Station*. 10 Ağustos 2016, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461693/fulltext01.pdf>

Web of Science, (2016). *Darrieus tipi rüzgar türbinleri makale sayısı*. 22 Ağustos 2016, <https://login.webofknowledge.com>

Yükselen, A. (2006). *UCK351 Aerodinamik ders notları*. 10 Haziran 2016, http://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/5-%20Kanat%20profillerinin%20aerodina mi %F0i_PPT.pdf

