



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ ve
TÜRBİN KANAT TASARIMLARININ ANALİZ EDİLMESİ**

İSMAİL HAKKI SERİ

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY
ARALIK - 2016**



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ VE
TÜRBİN KANAT TASARIMLARININ ANALİZ EDİLMESİ**

İSMAİL HAKKI SERİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

ARALIK - 2016

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ ve
TÜRBİN KANAT TASARIMLARININ ANALİZ EDİLMESİ

İSMAİL HAKKI SERİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yrd. Doç. Dr. Semir GÖKPINAR danışmanlığında hazırlanan bu tez **13/01/2017** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Semir GÖKPINAR
Başkan

Prof. Dr. Hakan YAVUZ
Üye

Doç Dr. Selçuk MISTIKOĞLU
Üye

Kod No:36

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Enstitü Müdür V.

Not:Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

13/01/2017

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

İsmail Hakkı SERİ

ÖZET

Rüzgar enerjisinin kullanımı son yıllarda gösterdiği gelişim ile adından sıklıkla söz edilen yenilenebilir bir enerjidir. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren ve ondan faydalı güç elde edilmesini sağlayan rüzgar türbinleridir. Elde edilebilecek enerji miktarına etkiyen en önemli etkenler rüzgar türbini kanat sayısı ve kanat yapısıdır. Rüzgar hızını kullanarak kanat yapısında meydana gelen hız, basınç ve kuvvet bulunmuştur. Ansys Workbench kullanılarak elde edilen maksimum basınç değeri için hem kompozit malzeme için hemde alüminyum alaşım için kanat yapısında meydana gelen gerilme ve toplam deformasyon miktarları bulunmuştur. Malzeme özelliklerinin kanat yapısı için ne kadar önemli olduğu irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, rüzgar türbini, rüzgar türbini kanat yapısı.

ABSTRACT

The name shown in the development of wind energy utilization in recent years is often mentioned renewable energy . Converting wind energy into electrical energy and wind turbines are enabling him to obtain useful power . Obtained the most important factors that influence the amount of energy a wind turbine blade structure and number of blades . The wing structure by using the wind speed in the speed , pressure and force was found . Ansys and the resulting strain and the total deformation amount of the wing structure for both the aluminum alloy composite material for a maximum pressure value were obtained using Workbench . It was discussed how wing structure to be important for the material properties.

Key Words: Wind power , wind turbines , wind turbine blade structure.

TEŐEKKÖR

Bu alıőmamızda değerli katkılarından dolayı ok değerli ve sevgili hocamız Yrd. Do. Dr. Semir GÖKPİNAR ‘a doğumu ile bana gü katan kızım Defne Betül SERİ’ ye, her zaman bana destek olan eőim Özlem SERİ’ ye, çok değerli atam babam Bülent SERİ’ ye, canım annem Güluőan SERİ’ ye, canım ablam Anıő SERİ ve kardeőten öte kardeőim İbrahim SERİ’ ye teőekkürlerimi sunuyorum.

Mak. Müh. İsmail Hakkı SERİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgar Enerjisi	1
1.1.1. Rüzgar Gücü Kronolojisi	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	6
3.1. Materyal.....	6
3.1.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	6
3.1.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	6
3.1.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	7
3.1.2. Rüzgar Türbini Bileşenleri.....	9
3.1.2.1. Kule.....	10
3.1.2.2. Türbin Pervanesi	10
3.1.2.3. Dişli Kutusu	11
3.1.2.4. Jeneratör.....	12
3.1.3. Türbin Kanadı Aerodinamiği ve Rüzgar Yüğü.....	13
3.1.3.1. Sürüklenme ve Kaldırma Kuvveti	13
3.1.3.2. Geliştirilmiş Olan Modeller	14
3.1.3.3. İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti	14
3.1.3.4. Kanat Elemanı Teorisi	15
3.1.4. Kompozit Kanat Yapısı ve Malzemeler	16
3.1.4.1. Kompozit Malzemeler	17
3.1.4.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları	18
3.1.4.3. Kompozit Kanat Yapısı	21
3.1.4.4. Rüzgar Türbini Kanat Üretiminde Kullanılan Temel Malzemeler.....	22
3.1.4.4.1. Epoksi Reçine.....	22
3.1.4.4.2. Cam ve Karbon Kumaşları	23
3.1.4.4.3. Ara (Core) Malzemeler	24
3.1.5. Rüzgar Türbini Kanatlarının Üretim Metodolojisi	27
3.1.5.1. El Yatırması Yöntemi	27
3.1.5.2. Vakum Torbalama ile El Yatırması Yöntemi.....	28
3.1.5.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi	29
3.1.6. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretim Süreci.....	30
3.1.6.1. Malzeme ve Ekipman Tedariği ile Bunların Yerleşimi ve Depolanması	30
3.1.6.2. Hammadde Hazırlığı.....	31
3.1.6.3. Kanat İçinde Kullanılan Önceden Üretilen Parçaların Hazırlanması	31
3.1.6.4. Kanadın Oluşturulması (Kalıplama).....	32
3.1.6.5. Taşlama İşlemi.....	35
3.1.6.6. Delme Kesme İşlemi.....	35

3.1.6.7.Montaj İşlemleri.....	36
3.1.6.8.Üretim Sonu İşlemleri.....	37
3.1.6.9.Balans İşlemleri	38
3.2.Yöntem.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	47
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Türbin tasarımı.....	2
Şekil 1.2.	Petrol platformuna kurulu türbin	3
Şekil 1.3.	Rotor kanadı siyah türbin örneği	4
Şekil 3.1.	Yatay eksenli rüzgar türbinleri(Anonim2008).....	7
Şekil 3.2.	Bazı rotor tipleri ve kullanım yerleri (Anonim, 2012).....	8
Şekil 3.3.	Düşey rotor tipleri (Anonim, 2012)	8
Şekil 3.4.	Rüzgar türbini ön ve yan görünüşleri	9
Şekil 3.5.	Rüzgar türbini detay görünüm (Anonim, 2012)	10
Şekil 3.6.	Rüzgar türbini dişli kutusu (Anonim, 2014).....	11
Şekil 3.7.	Rüzgar türbini enerji aktarım basamakları.....	12
Şekil 3.8.	Kanat profili üzerine gelen kuvvetler (Anonim, 2007).....	13
Şekil 3.9.	Akım tüpü (Anonim, 2014).	15
Şekil 3.10.	Kanat elemanının şematik olarak parçalanmış şekli.....	16
Şekil 3.11.	Kompozit kanat yapısı	21
Şekil 3.12.	Epoksi reçinelerin organik bağ yapısı (Billur, 2009).....	22
Şekil 3.13.	Cam ve karbon liflerinden elde edilmiş iplikler	23
Şekil 3.14.	Çok yönlü dokunmuş cam kuşaklarının iplik açılarından örnekler	24
Şekil 3.15.	Ara malzemelerden köpük örneği	25
Şekil 3.16.	Balsa kütükleri ve kanat içinde balsa görünümünü (Anonim, 2013)	25
Şekil 3.17.	Bal peteği görünümlü malzeme örneği(Anonim, 2013)	26
Şekil 3.18.	Bir sandviç yapı uygulamasında eğilmeye karşı oluşan kuvvetler	26
Şekil 3.19.	El yatırması yöntemi	28
Şekil 3.20.	Vakum torbalama ile el yatırması yöntemi (Anonim, 2013).....	28
Şekil 3.21.	Vakum infüzyon yöntemi	30
Şekil 3.22.	Bir rüzgar türbini kanat kalıbı görünümü	30
Şekil 3.23.	Ana kuşak elemanının kanat kesitindeki görünümü (Anonim, 2014)	32
Şekil 3.24.	Cam kumaşlarının kalıba serilmesi.....	33
Şekil 3.25.	İnfüzyon işlemi öncesi vakumlanmış parça (Anonim, 2014).....	33
Şekil 3.26.	İnfüzyon işlemi bitirilmiş kanat yüzeyi	34
Şekil 3.27.	Kanat kalıbının sökülmesi	34
Şekil 3.28.	Koruyucu donanım ve elbiseler	35
Şekil 3.29.	Delme işlemi (Anonim, 2014)	36
Şekil 3.30.	Yıldırım çarpmış bir rüzgar türbini	37
Şekil 3.31.	Robot kollar ile kanat yüzeyine boya uygulanması	38
Şekil 3.32.	Kanadın taşınması işlemi (Anonim, 2014)	39
Şekil 3.33.	Solidworks'te çizilen NACA 4415 damla yapısı	40
Şekil 3.34.	Hava hacmi modelleme kıstası	41
Şekil 3.35.	Hava hacminin Solidworks'te modellenmiş hali	41
Şekil 3.36.	Ansys Workbench CFX Programında Mesh Edilmiş Hava Hacmi	42
Şekil 3.37.	Sınır şartlarının gösterimi	42
Şekil 3.38.	Ansys Workbench arayüzü	43
Şekil 3.39.	Ansys Workbench Engineering data menüsü	44
Şekil 3.40.	Kanat elemanına etkileyen deformasyon.....	44
Şekil 3.41.	Ansys Workbench Engineering data menüsü	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kompozit malzemenin özellikleri.....	45
---	----

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A : Yüzey alanı (m²)
KW : kilovatt
MW : megavatt
 λ : uç hız oranı
% : yüzde

KISALTMALAR

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics

1.GİRİŞ

Bu çalışmada;rüzgar enerjisinin meydana gelmesi, bu enerjiden nasıl ve ne şekilde faydalanılabileceği, yatay eksenli, 3 kanatlı rüzgar türbini için türbini meydana getiren tüm parçalar ile kanatların tasarımındaki malzeme türleri ve yararlanma biçimleri ile kanatların nasıl ve ne şekilde üretildikleri, yine kanat üzerinde meydana gelen gerilmeler ve deformasyon miktarları üniform alüminyum alaşım ve kompozit malzemeler (E-glass/epoxy) için araştırılması sağlanmıştır. Öncelikle Solidworks programı kullanılarak damla yapısı NACA 4415 için kanat tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu kanat tasarımının akış analizi için meteoroloji verilerinden faydalanarak en yüksek rüzgar hızı araştırılması neticesinde alüminyum alaşımlı kanat ile kompozit malzeme ile üretilen kanatlarda oluşan gerilmeler ve basınç farkları incelenmesi sağlanmıştır.

1.1. Rüzgar Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan ve günümüzde, teknolojisi ve kullanım alanı en hızlı gelişme gösteren ve ekonomisi de konvansiyonel enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale gelen bir enerji türü olarak karşımıza çıkmaktadır rüzgar enerjisi.

Rüzgar, yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketleridir. Rüzgar enerjisi ise, rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisidir (Elibüyük, 2014).

Havanın dünya yüzeyi üzerinde hareket edebilmesini sağlayarak rüzgarı meydana getiren ve rüzgarın hızına etki eden atmosfer içindeki belli başlı kuvvetler ise; basınç gradyan kuvveti, coriolis kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürtünme kuvvetidir.

Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eden kuvvettir. Coriolis kuvveti ise, yer dönmesinin saptırıcı kuvveti olarak bilinmektedir (Özdamar, 1999).

Rüzgarlar, genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin neticesi olarak da, kendilerini dolanım merkezlerinden uzaklaştırmak isteyen bir kuvvet etkisi altında bulunurlar. Bu kuvvete, merkezkaç kuvveti denilmektedir. Rüzgarın meydana

getirilmesinde etkili olmayan, rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışan kuvvete ise sürtünme kuvveti denir. Bu kuvvet, yer yakınında en büyüktür ve türbülanslar tarafından yukarıya taşınır. Rüzgarın sürtünmesinden doğan bu kuvvet, yer üstünde 450 ila 600 m yüksekliğe kadar rüzgarı yavaşlatmaktadır. Havanın bu kuvvetlerin etkisi altında kalmasıyla oluşan rüzgar enerjisinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Özdamar, 1999). Rüzgarın gücünden yararlanılmaya başlanması çok eski dönemlere dayanır ve günümüzde de hala bu teknolojiyi geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

1.1.1. Rüzgar Gücü Kronolojisi

- M.Ö. 2800: Mısırlılar tarafından ticari amaçlı yelkenlilerde kullanılmıştır.
- IX. yy: Persler tarafından yel değirmeni olarak kullanılmıştır.
- XI. yy: Avrupa’da yel değirmeni olarak kullanılmıştır.
- XVI. yy: Danimarka, Hollanda, Almanya’da yel değirmenlerinde kullanılmıştır.
- 1846-1908: ilk modern rüzgar türbinlerini Paul La Cour tasarlamıştır.
- 1918: Danimarka’da toplam kurulu güç 3 MW olmuştur.
- 1920-1930: Danimarka’da toplam 3000 türbin bulunmaktadır.
- 1932: ABD’de 15 m/s rüzgar hızında 20 MW’lık bir türbin tasarlanmıştır. (Şekil 1.1.) tasarım sadece kağıt üzerinde kalmıştır.



Şekil 1.1. Türbin Tasarımı

- 1942: Günümüzün modern rüzgar teknolojisinin başlangıç tarihi.

- 1941-1945: Smith/Putnam tarafından 1250 kW'lık türbin ABD'de kurulmuştur. 1942 yılında bir fırtınada zarar görmüştür. 1945'de kapanmıştır.
- 1956-1957: J. Juul, Danimarka'da 200 kW'lık Gedser rüzgar türbini.
- 1958: Honnef tezine göre 10 kW'lık deniz üstü türbin bir petrol platformuna Ulzich Hütter tarafından kurulmuştur (Şekil 1.2.)



Şekil 1.2. Petrol Platformuna Kurulu Türbin

- 1974: İsveç'te toplam kurulu güç 1 MW olmuştur.
- 1980-1981: Endüstriyel ve teknolojik sıçrama ile modern türbinlerin gelişimi başlamıştır.
- 1985: 1000'den fazla türbinden oluşan California rüzgar çiftliği kurulmuştur.

- 1983-1987: Kuzey Denizi kıyısında 300 kW'lık Voith-Hütter türbini kurulmuştur.
- 1990: Almanya'da 4 tane MAN'in yaptığı Growian II tipi rüzgar türbini kurulmuştur.
- 1991: Baltık Denizi'nde Danimarka'da deniz üstüne (11x450 kW) rüzgar çiftliği kurulmuştur.
- 1995: 1500 kW'lık Neg Micon türbinleri tasarlanmıştır.
- 1996: 1500 kW ve 3650 kW'lık Vestas türbinleri tasarlanmıştır.
- 1997: Buzlu ve soğuk yerler için rotor kanadı siyah yapılmıştır. (Şekil 1.3.)



Şekil 1.3. Rotor Kanadı Siyah Türbin Örneği

- 1998: 1,5 MW'lık Enercon E66 rüzgar türbinlerinden oluşan Almanya'da Avrupa'nın en büyük rüzgar çiftliği (52,5 MW) kurulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

AYGUN, 1989. “Güneş enerjisi nedir, nasıl faydalanılır?”. tübitak bilim ve teknik dergisi, TÜRKİYE. İsimli çalışmasında belirtilen ve Tübitak bilim ve teknik dergisinde yayınlanan yayının incelenmesi neticesinde güneş enerjisinin kullanımı ve faydaları konusunda çalışmaların gerçekleştirildiği görülmüş ve irdelenmiştir.

ÇOLAK, 2000. Değişken rüzgar hızlarına uygun bir türbin modeli geliştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Isparta isimli tez çalışması incelenmiş, bir rüzgar türbini modelinin geliştirilmesi esnasında hangi hususlara dikkat edilmesi gerektiği konusunda çalışmaların gerçekleştirildiği görülmüş ve irdelenmiştir.

AVCI, 2012. Rüzgar türbini kanat tasarımı ve analizi, bitirme tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, İzmir isimli tez çalışması incelenmiş, bir rüzgar türbini tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar ile tasarım aşamasındaki bir türbinin sonuç odaklı analiz parametreleri verilerinden yararlanılması konusunda çalışmaların gerçekleştirildiği görülmüş ve irdelenmiştir.

DAVUT, 2013. Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi, yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Sakarya isimli tez çalışması ile bir rüzgar türbininin tasarımının hangi basamaklardan oluştuğu ve bu basamaklar sonrası oluşturulan bir türbinin geliştirilmesi yönünde ne tür verilerden yararlanılması konusunda çalışmaların gerçekleştirildiği görülmüş ve irdelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Günümüzde mevcut halde çalışan rüzgar türbinlerinin incelenmesi sağlanması hedeflenmiş ve rüzgar alan bölgelere göre oluşan rüzgar hızları ilgili meteorolojik verilere dayandırılarak mevcut haldeki rüzgar türbinlerinin uygunluğu hakkında veri toplanması hedeflenmiştir. Araştırılan ve elde edilen veriler ışığında mevcut tüm rüzgar türbin türleri ve bu türbinlerin üretim metodları irdelenmek suretiyle NACA 4415 tip kanat türünün belirli rüzgar girdilerine karşın alüminyum alaşım ve kompozit alaşım rüzgar yük analizi irdelenmiş ve tasarım uygulanabilirliği incelenmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

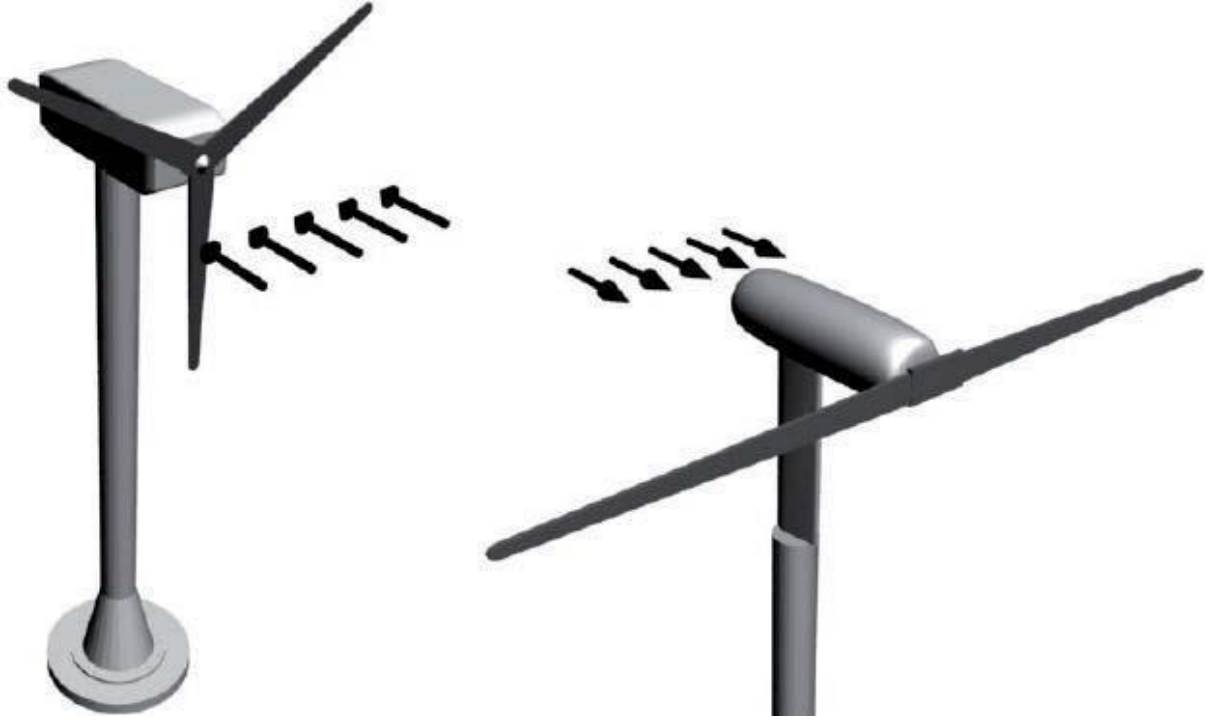
Günümüzde rüzgar türbinlerinin sınıflandırılmasında en çok kullanılan sınıflandırma biçimi, rotor ekseninin yeryüzüne göre konumunu dikkate alır.

Buna göre rüzgar türbinleri;

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri
- Eğik eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere üçe ayrılır (Elibüyük, 2014; Üçgül, 2014).

3.1.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip rüzgar türbinleri, dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel, kanatları ise rüzgarın esme yönüne dik olarak çalışırlar. Kanatların rüzgarın esme yönüne dik olması ile türbin rotoru maksimum enerjiyi tutabilmektedir. Kanatlardaki kaldırma kuvveti rotorun dönmesini sağlar. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin, rüzgarı önden ve arkadan alan tasarımlar olmak üzere iki tipi mevcuttur. Yatay eksenli türbinlerin kule üzerinde yatay eksen yönündeki hareketi, motorlar (rüzgar veya elektrik), rüzgara yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgarı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açı ile sağlanır (Elibüyük, 2014; Üçgül, 2014).

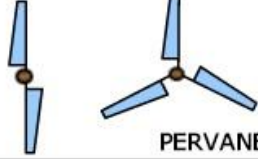

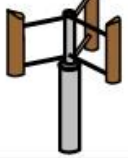



Şekil 3.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (Anonim, 2008)

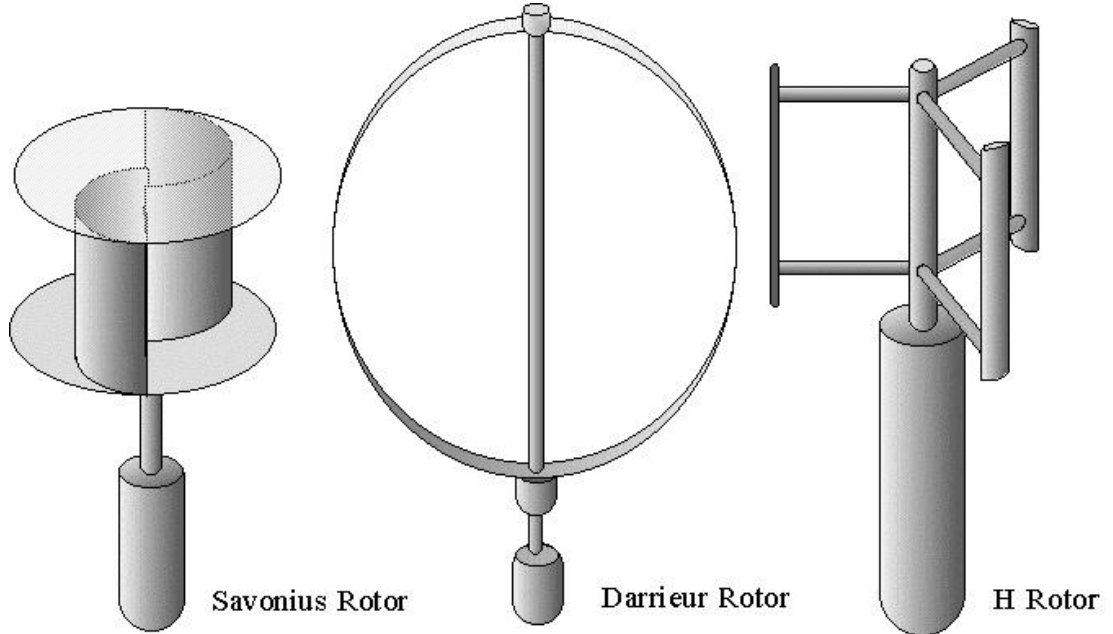
Rüzgarı arkadan alan türbinlerin kullanımını az olmasına karşın rüzgarı önden alan rüzgar türbinlerinin kullanımını günümüzde hayli fazladır.

3.1.1.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini

Bu türbinlerin dönme eksenleri düşeydir. Düşey eksenli türbinlerde, kanatların iç bükey ve dış bükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşmaktadır. Çalışma basitliğinden dolayı kullanılan en eski rüzgâr türbini çeşididir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşük verime sahiptir (Elibüyük, 2014; Üçgül, 2014).

Rotor Tipleri	λ Uç hız oranı	C_p Güç katsayısı	RPM Devir Sayısı	Tork	Kullanım Yeri
 PERVANE TİPİ	6	10 0,42	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
 DARRIEUS TİPİ	5	6 0,40	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
 CYCLOGIRO TİPİ	3	4 0,45	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su pompalama
 ÇOK KANATLI TİPİ	3	4 0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su pompalama 3

Şekil 3.2. Bazı Rotor Tipleri ve Kullanım Yerleri (Anonim, 2012)

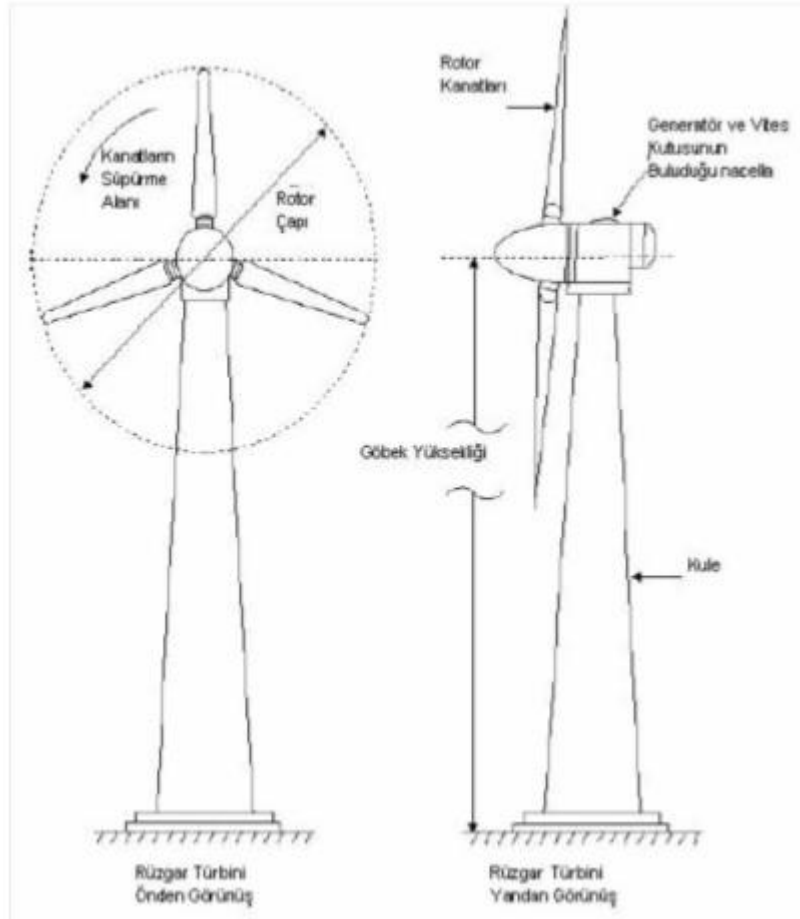


Şekil 3.3. Düşey Rotor Tipleri (Anonim, 2012)

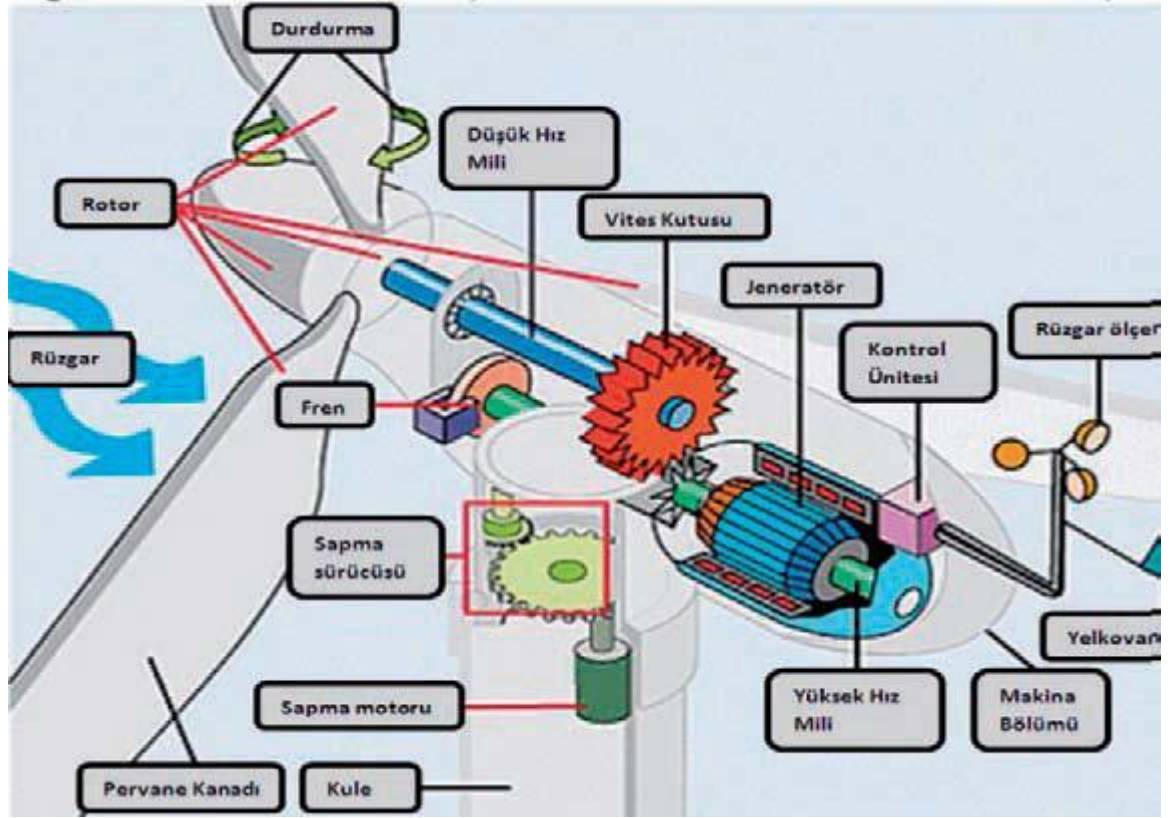
3.1.2. Rüzgar Türbini Bileşenleri

- Göbek yüksekliği: Göbeğin yerden yüksekliğini ifade eder.
- Süpürme alanı: Rotor diskinin dönerken taradığı alan olarak ifade edilir.
- Uç hız oranı: Kanat ucu hızının, rüzgar hızına oranıdır.
- Güç derecesi: Elektriksel kullanımlarda devamlı olarak elde edilen çıkış gücüdür.

Elektrik üretiminde kullanılan rüzgar türbinlerinin ana parçaları; rotor kanatları, fren sistemi, yaw (döndürme) sistemi, iletim sistemi, jeneratör ve kuledir. Büyük parçalar dış muhafaza kısmı içerisine yerleştirilir. Söz konusu dış kısmının kuleyle birleşim yerinde yaw (döndürme) sistemi mevcuttur (Şentürk, 2007).



Şekil 3.4. Rüzgar Türbini Ön ve Yan Görünüşleri



Şekil 3.5. Rüzgar Türbini Detay Görünüm (Anonim, 2012)

3.1.2.1. Kule

Kule malzemesi, çelik veya beton malzemeden üretilmektedir. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yüksekteki rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artan kule maliyeti arasındaki optimum çözümlerle belirlenir. Kule boyutlandırılmasındaki bir diğer parametre de, eğilme doğal frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 20' sine yakını kule imalatına aittir (Elibüyük, 2014; Üçgöl, 2014).

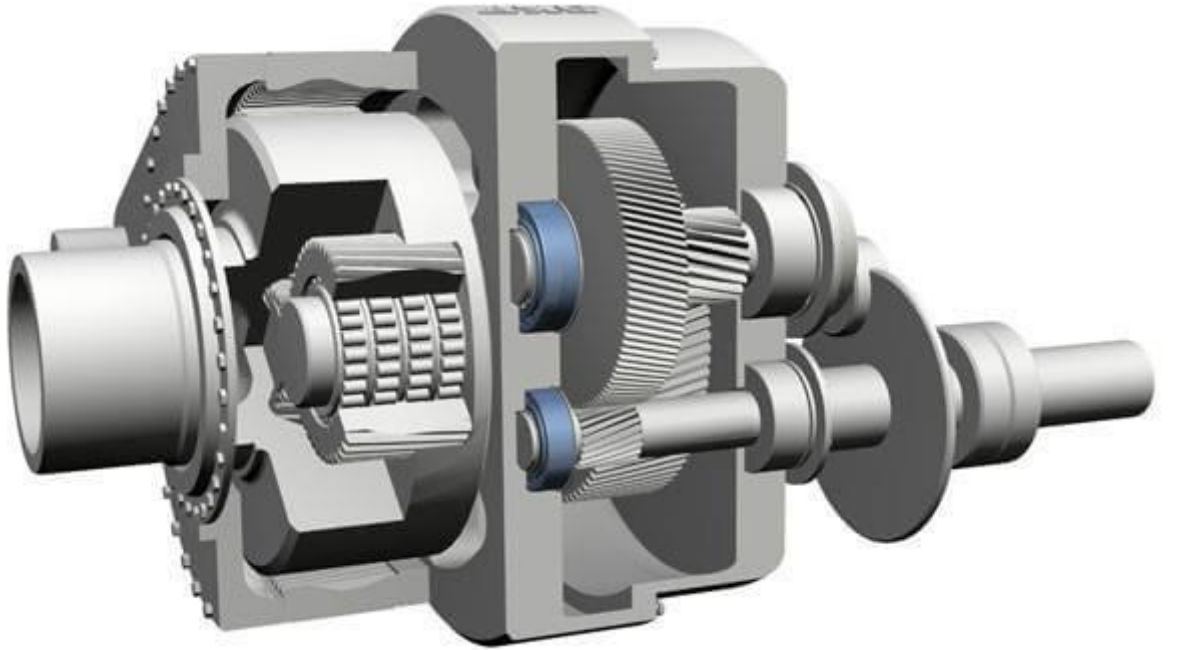
3.1.2.2. Türbin Pervanesi

Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı çok iyidir. Fakat, yorulma dayanımları

ve korozyon sorunu yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır (Elibüyük, 2014; Üçgül, 2014).

3.1.2.3. Dişli Kutusu

Rotor açısız hızı ω genellikle ihtiyaç duyulan elektriksel frekans değerini üretmek için jeneratörü hareket ettirmede yeterli kadar hızlı değildir. Dişli takımları dönme sistemleri için hızlarda mekanik olarak bir artış ve azalış sağlayabilirler. Rüzgar türbinlerini dikkate aldığımızda dişli takımları düşük hızlı milin açısız hızını jeneratöre bağlanan yüksek hızlı mil hareketine dönüştürmede kullanılırlar. Pek çok uygulama için dişli takımları karşılıklı iki dişli arasındaki boşluktan kaynaklanan şiddetli tepki gösterirler. Sürücü dişli karşı dişli ile temas yapmadan önce bir açı boyunca döner, giriş dişlinin açısız dönüşü gerçekleşene kadar çıkış dişlisinin açısız dönüşü gerçekleşmez. Dişli kutusu için giriş parametreleri rotoru dişli kutusuna bağlayan düşük hızlı mil için açısız hız ve torktur. Çıkış parametreleri ise, dişli kutusunun Jeneratöre bağlayan yüksek hızlı mil için açısız hız ve torktur.



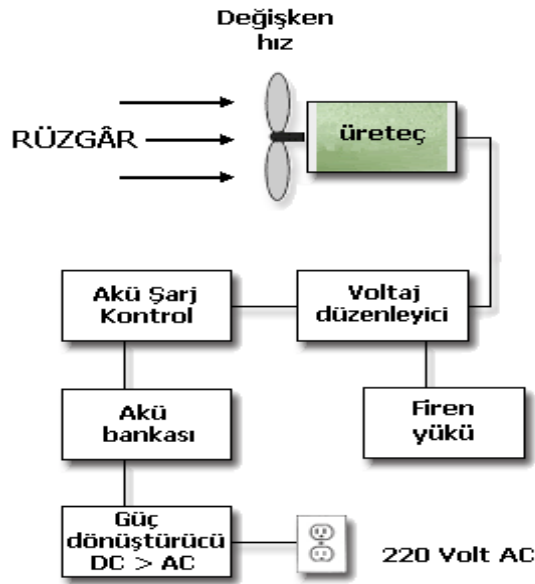
Şekil 3.6. Rüzgar Türbini Dişli Kutusu (Anonim, 2014)

3.1.2.4. Jeneratör

Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir.

Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha pahalı olmasıdır. Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgar enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır. Dişlideki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır.. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.

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



Şekil 3.7. Rüzgar Türbini Enerji Aktarım Basamakları

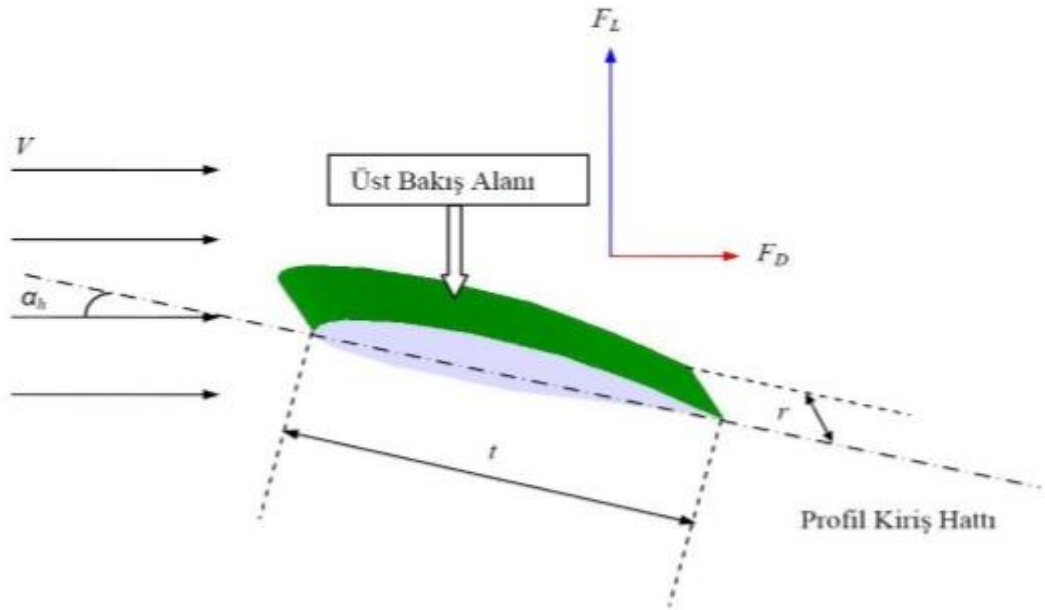
3.1.3. Türbin Kanadı Aerodinamiği ve Rüzgar Yükü

3.1.3.1. Sürüklenme ve Kaldırma Kuvveti

Modern rüzgar türbinlerinin kanat kesitleri, akış esnasında kanat üzerinde meydana gelen yüklerden optimum gücün elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan özel profillerden (airfoil) seçilmektedir. Bu özel profillerin geliştirilmesinde amaç, meydana gelen kaldırma kuvvetinin iyileştirilmesidir.

En genel haliyle, profiller, bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 adet özel eğrinin birleşiminden oluşur. Üst eğrinin, alt eğriye göre daha kambur bir forma sahip olması, her iki tarafta farklı akışkan hızları oluşturur. Bu yüzden bir basınç farkı meydana gelir ve yüksek basınç tarafından alçak basınç yönüne doğru bir kaldırma kuvveti doğar. Bir serbest akım içerisinde yer alan, sahip olduğu kiriş hattı ile akışkan hızı ile arasındaki hücum açısı α olan örnek bir profil ve üzerine gelen kuvvetler ise şekilde görülmektedir (Özdamar, 1999).

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



Şekil 3.8. Kanat Profili Üzerine Gelen Kuvvetler (Anonim, 2007)

3.1.3.2. Geliştirilmiş Olan Modeller

Rüzgâr türbini üretimi için geliştirilen modeller güç tahmini için önem taşımaktadır.

İdeal disk teorisi geliştirilmiş olan ilk teorilerdendir. Bu teoride koşullar ideal olarak düşünülmüştür. Bu teorinin temelinde sonsuz sayıda kanada sahip ve sıfır kalınlıkta bir rotor bulunmaktadır (Güneş, 2006).

Kanat Elemanı Momentum Teorisi ise İdeal Disk Teorisi ve Kanat Elemanı Teorisinin birleşimidir. Kanat Elemanı Teorisi ile kanatların şekli tanımlanabilir ve kanattaki diferansiyel (eğrisel) kısmın analizi yapılabilir (Güneş, 2006).

Glauert ise akım tüpü analizini kullanarak tek boyutlu momentum teorisi ve Kanat Elemanı Teorisini kullanarak kendi modelini geliştirmiştir. Yukarıda bahsedilen teorilerde 2 boyutlu akış olduğu kabul edilerek analizler yapılmıştır (Güneş, 2006).

Prandtl ise kanatlar için “Kaldırma Çizgisi Teorisini” geliştirmiştir. Bu model ile yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin performans tahmininde yeni bir boyut ortaya çıkmıştır (Güneş, 2006).

Kaldırma Çizgisi teorisi, kanat üzerindeki kaldırmanın dağılımının hesaplanması için geliştirilmiş yoldur. “Kaldırma yüzeyleri metodu” ise karmaşık kanat şekilleri için yararlı bir hesaplama değildir. Değişik serbest rüzgâr hızları için yapılan diğer bir çalışma ise “Girdap Teorisi” dir (Güneş, 2006).

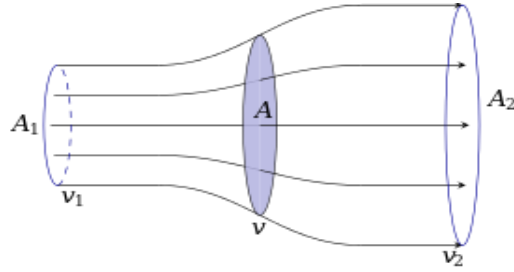
3.1.3.3.İdeal Disk Teorisi ve Betz Limiti

Rüzgârdan enerji elde etmek için kurulacak türbinin boyutları aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem ne kadar ideal olursa olsun rüzgârdan elde edilecek enerjinin bir üst limiti vardır.

Betz tarafından 1919–1926 yılında belirlenen bu limite Betz limiti denir. Betz söz konusu teoriyi hesaplarken hareketli diskin önünde, üzerinde ve gerisindeki hava akımları için enerjinin korunumu kanunlarını kullanmıştır. Betz’in ideal disk teorisine göre;

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

İdeal disk teorisinin analizi, kontrol hacmi alınarak yapılır. Burada kontrol hacminin sınırları şekilde gösterildiği gibi akım tüpünün sınırları ve akım tüpünün iki ucudur.



Şekil 3.9. Akım Tüpü (Anonim, 2014)

3.1.3.4. Kanat Elemanı Teorisi

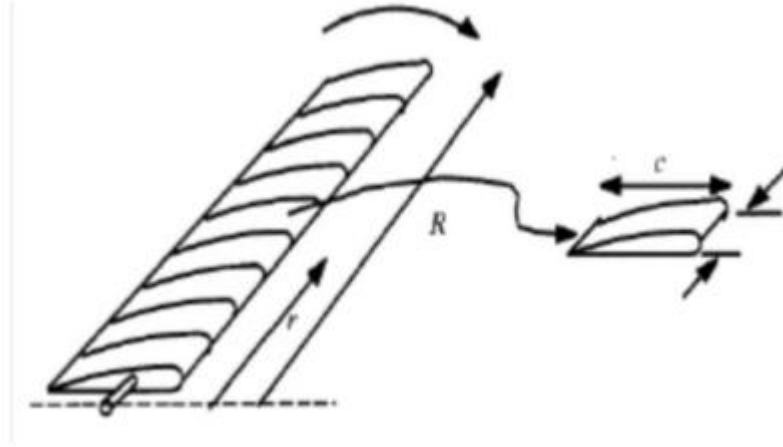
Rüzgardan maksimum derecede güç çekilebilmesi için rüzgar türbinin kanat yapısının optimum düzeyde tasarlanması gereklidir. Glauert çalışmalarında Betz'den farklı olarak, rotor sonrasında oluşan girdaplı akımı da hesaba katmıştır. Böylece teori optimum kanat tasarımı da önem kazanmıştır. Glauert'in teorisine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

- Hava akımı homojen, türbülanssız ve sürekli,dir,
- Rotorun gerisinde silindirik bir iz meydana gelmektedir.
- Kanadın her bir elemanı bir sonraki kanat elemanından bağımsız hareket etmektedir.
- Uygulamada kullanılacak olan profilin karakteristikleri her bir elemana adapte edilmiştir.

Kanat elemanı teorisi iki ana esasa dayanır. Kanat elemanına etki eden kuvvet ve momentler; kanat profilindeki kaldırma ve sürükleme kuvvetlerine bağlıdır. Her bir

kanat elemanının bağımsız hareket etmesi kabulünden dolayı her bir kanat elemanı üzerine gelen kuvvetler, bölgesel rüzgâr hızları ile hesaplanır.

Kanat elemanı teorisi, hava içindeki hareketinden dolayı kanatların davranışını analiz eden alternatif bir yöntemdir. Bu analizde şekilde gösterildiği gibi, kanadın N tane parçaya veya elemana bölüdüğü kabul edilmektedir ve her bir kanat elemanı için kabul edilen aerodinamik kuvvet, kanat elemanları için adapte edilen aynı kesitin uygun kanat profilindeki kuvvetler olarak düşünülmektedir. Her bir elemanın davranışı, aynı kanadın bitişik elemanları tarafından etkilenmez, kanat ucundaki kuvvet kanat boyunca tüm elemanlarındaki kuvvetlerin birbirine eklenmesiyle bulunabilir. Kanat elemanı şematik görünüşü şekilde verilmiştir.



Şekil 3.10. Kanat Elemanının Şematik Olarak Parçalanmış Şekli

3.1.4. Kompozit Kanat Yapısı ve Malzemeler

Sektördeki tüm firmaların ürettiği türbinlerin alt standartları teknolojik gelişimin hızlı ilerleyişi ile iyice yükselmiş ve önemli bir unsur olarak kanatların dizaynı, malzemesi ve üretim şekli önem kazanır olmuştur.

Artık günümüzde rüzgâr türbini kanatlarının, türbin verimliliğinde ciddi oranda etkisi olduğu kabul edildiği bilindiğinden dolayı mühendislik ve teknoloji olarak önemli yatırımlar yapılmakta ve sürekli gelişim/değişim yaşanmaktadır (Billur, 2009).

Rüzgâr Türbini Kanatlarından en büyük beklenti; uzun süre boyunca dayanıklılığını koruması, aerodinamik olarak türbinin enerji verimliliğine ilave katkı sağlaması, tüm dış etkenlere karşı bütünlüğünü ve yüzey kalitesini kaybetmemesi gibi özelliklerdir. Bu özelliklerin sağlamak için de yapılan tüm çalışmalar ve denemeler sonucunda Rüzgâr Türbinleri Kanatları'nın kompozit teknolojisi ile üretilmesinin en uygun yöntem olduğu ve kullanılan malzemelerde de günden güne gelişim yaşanması ile bunun desteklendiği yapılan uygulamalara bağlı olarak görülmüştür.

Rüzgar türbinlerinin yapımında çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinden yüksek verim elde edilmesi, her birim için uygun malzemenin seçilmesiyle mümkündür. Bu nedenle, tüm koşullarda malzeme gelişim ve davranışları incelenmektedir.

Genellikle tüm durumlarda malzeme seçimi için beş metod tercih edilmektedir. Bu metodlar:

- ekonomik ve performans karakteristikleri,
- özellik ölçüm değerleri,
- değerlerin analizi,
- hasar analizi,
- ekonomik ve fayda analizi olarak adlandırılır (Billur, 2009).

3.1.4.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; yeni bulunan bir malzeme olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle farklı özelliklere sahip malzemelerin değişik şekillerde (taneli, lifli, tabakalı vb.) birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Tanım olarak iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde bileşimi olarak söylenebilir (Billur, 2009). Amaç malzemelerin kompozit yapı öncesinde sahip olmadığı özelliklerinin bu malzemelerin bir araya getirilerek sağlanabilmesidir. Bu özellikler içinde; mukavemet, yaşlanma dayanımı, aşınma dayanımı, kırılma tokluğu, termal özellikler, iletkenlik, ağırlık, korozyon direnci vb. sıralanabilir.

Teknolojik olarak bakıldığında 1940'lı yıllardan sonra bu malzemelerin havacılık sektöründe kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Burada amaç, çelik ve

alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerine daha düşük ağırlıkta ancak daha mukavemetli, sertlik değeri, aşınma dayanımı ve kırılma tokluğu yüksek malzemelerin geliştirilmesidir.

Öte yandan tıpkı havacılık sektöründe olduğu gibi rüzgar türbini rotor kanat yapısı için malzeme seçiminde; önemli bir kriter olan mekanik özelliğin yoğunluğa oranını ifade eden, özgül mekanik özellik değerleri açısından da kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere oranla önemli oranda üstünlükleri olduğu da söylenebilir. İşte bu durum, türbin konstrüksiyonlarında özellikle de rotor kanat tasarımında kompozit kullanımının ön plana çıkmasına yol açmıştır.

Rüzgar türbini rotor kanatlarında, cam takviyeli plastik malzemeler en çok tercih edilen kompozit malzeme türüdür. Bu kompozit malzemeler, türbin kanatlarında hafiflik sağlaması, dayanımlarının ve korozyon dirençlerinin yüksek ve üretimlerinin diğer fiber takviyeli plastiklere oranla kolay ve ekonomik olması nedeniyle tercih edilmektedirler.

Karbon fiber takviyeli plastiklerin de rotor kanatlarında sınırlı da olsa kullanımı vardır ve bu kompozit malzemelerin cam takviyeli plastiklere göre daha yüksek dayanım ve hafiflik sağlamalarına rağmen maliyetlerinin yüksek oluşu dezavantajdır.

3.1.4.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Dayanıklılığı ve Sağlamlığı: Lifli kompozit malzemelerin, geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında en önemli avantajı yüksek dayanım ve sağlamlığıdır. Bu özellikler mühendislik uygulamalarının tasarımında çok önemli olan performansın iyileştirilmesini ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Optimal Tasarım: Üretilen kompozit malzemeler, her uygulamanın belirli taleplerini karşılamak için projelendirilebilirler. Mümkün olan tasarım seçenekleri; malzeme (fiber ve matris), işleme yöntemi ve tabaka tipi (tek yönlü veya dokuma) seçimini, tabaka konumlarının, verilen doğrultudaki tabaka sayısının ve tabakaların kalınlığının değiştirilmesini içermektedir.

Kompozitler için tasarım değişiklerinin bu geniş aralığı, geleneksel mühendislik malzemelerine göre karşıt bir durumdur. Bu malzemelerin tasarımlarındaki bu geniş çeşitlilik, daha az malzemenin artık olarak atılmasıyla üretilen verimli yapıların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca çeşitlilikteki bu büyük imkan, kompozit yapıların üretilmesinde bilgisayarlar, optimizasyon, uzman sistemler ve yapay zeka kullanılmasını ve tasarımların geliştirilmesini sağlamaktadır.

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

Ölçüsel Kararlılık: Sıcaklık değişimiyle ilgili gerilmeler, boyut veya şekilde değişikliklerle, sürtünmenin artmasıyla ve termal gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı uygulamalarda bu termal etkiler kritik olabilmektedir. Hareketli parçalar (örneğin, motorda) arasında sürtünmenin artması, aşırı ısınmadan dolayı hatalara ve hasarlara neden olabilir.

Uydulardaki küçük şekil değişiklikleri işlev görmemesine yol açabilmektedir. Karayolları ve çatı sistemlerinde de ısı genleşme hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıfır veya sıfıra yakın ısı genleşme katsayısına sahip malzemelerin kullanılmasının gerekli olduğu birçok uygulama vardır.

Uygun tasarım sayesinde, sıfır ısı genleşme katsayısına sahip kompozit malzemeler elde etmek veya termal gerilimi ve uygunsuzluğu minimuma indirmek amacıyla diğer bileşenlerin ısı genleşme katsayısı ile eşleştirmek için kompozitin ısı genleşme katsayısını dizayn etmek mümkündür.

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

Etkin Üretim: Kompozit yapılar; filaman sargısı, püskürtme ve şerit katman gibi otomatikleştirilmiş metodların kullanılmasıyla etkili bir şekilde üretilebilmektedir.

Üretimdeki verim, kompozit malzemelerin çok az artık malzeme çıkaracak şekilde üretilmesini de sağlamaktadır. Bu, son ürünün elde edilmesine kadar büyük miktarlarda talaşın artık olarak oluştuğu metal malzemelerle karşılaştırıldığında kompozit malzemelerin avantajıdır.

Üretim maliyetleri de doğrudan yapıdaki parçaların sayısı ile ilgilidir ve kompozit malzemeler son şekli bir kerede üretebilme yeteneğine sahip olmasından ve perçin bağlantılarından daha etkili birleşme sağlamasından dolayı bu parça sayılarını önemli şekilde azaltabilmektedir. Örnek olarak; uçak gövdesinin iki kesiti, alüminyum bileşenlerin perçinlenmesiyle ve kompozit bileşenlerin yapıştırılarak bağlanmasıyla yapılmaktadır. Alüminyum yapı yaklaşık 11000 parçadan, aksine kompozit yapı yaklaşık 1000 parçadan oluşmaktadır. Parça sayısındaki bu azalma, bileşen ve montaj maliyetinde kayda değer tasarruflar sunmaktadır.

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

Tüm Maliyetlerin Hesaba Katılması: Kompozit malzemelerden yapılan yapıların maliyet değerlendirmesi, ürün toplam ömür maliyetini içermelidir. Kompozitler, genellikle geleneksel malzemelerden daha pahalıdır. Fakat, tüm diğer faktörler maliyet karşılaştırılmasında hesaba katılmalıdır.

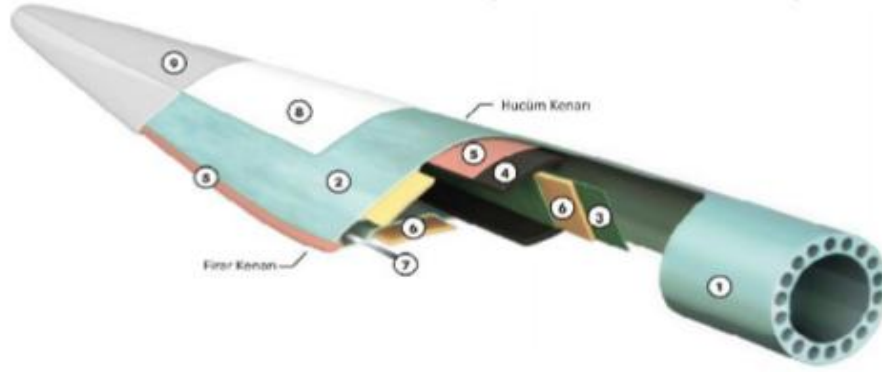
İlk olarak, kompozit malzemeler daha yüksek dayanım ve sağlamlığa sahiptir.

İkinci olarak, üretimde otomasyona gidilmesi kompozit malzeme maliyetini düşürmektedir.

Üçüncü, taşıma ve kurma maliyetleri kompozit yapılar için genellikle daha düşüktür.

Son olarak, kompozit yapılar geleneksel malzemelere göre daha uzun ömürlüdürler ve kullanım ömür süresinde daha az bakım gerektirirler.

3.1.4.3. Kompozit Kanat Yapısı



Şekil 3.11. Kompozit Kanat Yapısı

Rüzgar türbin kanat kesitlerine bakıldığında çok farklı parçalardan oluşmuş olduğunu görebiliriz. Bunun başlıca nedeni toplam kanat ağırlığını minimumda tutmak için hangi bölüm hangi kuvvete maruz kalacaksa sadece o kuvvete karşı koyabilecek (yön, açı ve vektörel büyüklük) dayanıma sahip tasarlandığı içindir. (Billur, 2009).

Monolit Laminat

1 Kök İnfüzyon

2 Kabuk Reçine Reçine: Epoksi, Poliester veya Vinilester

3 Kesme Ağı Takviye: Cam, Karbon veya Aramid Elyaf

Sandviç Laminat

4 Ana Kiriş Takviye: Tek Eksenli Cam veya Karbon Elyaf

5 Birleşimler Yapısal yapıştırıcı

6 Kor Malzemesi Köpük, Balsa veya Bal peteği

7 Yıldırım Koruması Metal profil veya iletken tel

Yüzey

8 Astar

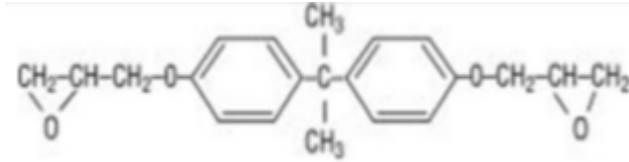
9 Son kat Poliüretan boya, Jelkot veya Epoksi Jelkot

3.1.4.4. Rüzgâr Türbini Kanat Üretiminde Kullanılan Temel Malzemeler

3.1.4.4.1. Epoksi Reçine

Bir kompozit yapı olan kanatların üretiminde, kompozit teknolojisinden bahsedilirken anlatıldığı gibi genel olarak polimer yapıda termoset reçineler kullanılır. Bunların içinde de Epoksi Reçineler özellikle hacimsel çekme dayanımlarının ve boyutsal stabilite değerlerinin diğer termoset reçinelere oranla yüksek olması nedeniyle kullanılması tercih edilir (Billur, 2009).

Genel olarak Epoksi Reçinelerin organik yapıları aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.12. Epoksi Reçinelerin Organik Bağ Yapısı (Billur, 2009)

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

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

Epoksi reçineler, herhangi bir kompozit elemanı oluşturmak için takviye malzemeleri ile birleşmeden önce, üreticiler tarafından belirtilen oranlarda ve uygun yapıda bir sertleştirici ile karıştırılmalıdır. Bunlar da seri üretim tesislerinde genel olarak dozajlama makinaları ile elde edilirler.

3.1.4.4.2. Cam ve Karbon Kumaşları

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

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

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



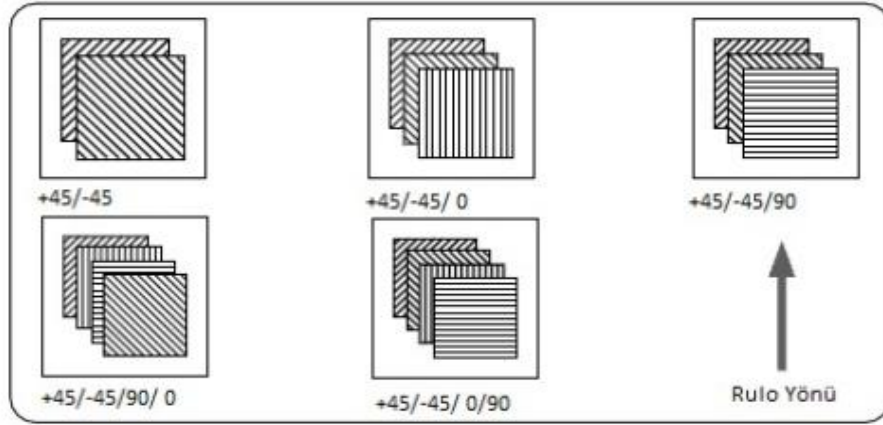
Şekil 3.13. Cam ve Karbon Liflerinden Elde Edilmiş İplikler

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

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

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

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



Şekil 3.14. Çok Yönlü Dokunmuş Cam Kumaşlarının İplik Açılarında Örnekler (Anonim, 2010)

3.1.4.4.3 Ara (Core) Malzemeler

Ara malzemeler, sandviç yapıdaki kompozit ürünlerde kullanılan dolgu malzemeleridir. Özellikle eğilme dayanımını arttırmaları, kompozit ürünlerin kullanım yerlerinin artmalarına sebep olmuştur. Ara malzeme kullanımı nedeniyle, yaklaşık %3 oranında bir ağırlık artışı ile, eğilme dayanımının 3,5 kat, rijitliğin ise 7 kat dolaylarında artırılması mümkündür (Karabağ, 2011).

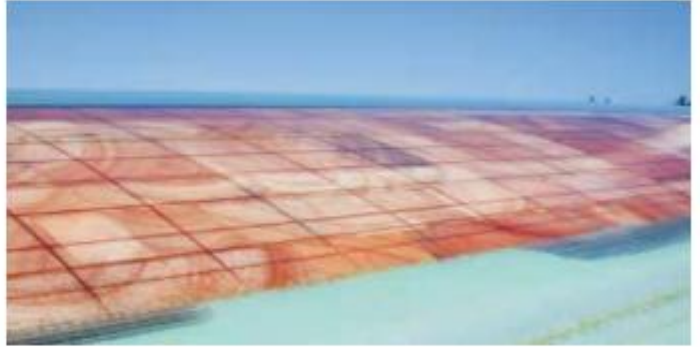
Kompozit malzemelerin üretiminde ara malzeme olarak genel olarak şu ürünler kullanılmaktadır:

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



Şekil 3.15. Ara Malzemelerden Köpük Örneği

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



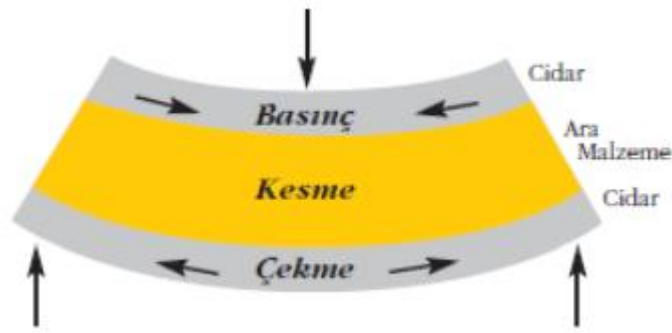
Şekil 3.16. Balsa Kütükleri ve Kanat İçinde Balsa Görünümü (Anonim, 2013)

Bal Peteği Görünümlü Malzemeler: Kraft kağıdı, alüminyum, çelik, aramid, karbon, poliüretan, polyester, polietilen, polipropilen ve seramik gibi hammaddelerden üretilen malzemeler,



Şekil 3.17. Bal Peteği Görünümlü Malzeme Örneği (Anonim, 2013)

Rüzgâr Türbini Kanatlarında, ara malzeme olarak yaygın şekilde PVC, PET köpük ve balsa ağacından yapılmış çeşitli kalınlıklardaki (5-50 mm arasında) levhalar kullanılmaktadır (Karabağ, 2011).



Şekil 3.18. Bir Sandviç Yapı Uygulamasında Eğilmeye Karşı Oluşan Kuvvetler (Anonim, 2013)

Yukarıda şekilde şematik olarak gösterildiği gibi bir sandviç yapıyı kirişlere benzetebiliriz. Kirişin yapısındaki sandviç ürünlerde, cidarlardan birine yük uygulandığında, yük kirişi oluşturan ara malzeme içinden kesme gerilmesi aracılığıyla geçerek, üst ve alt cidarlar arasında bağlantı oluşturmaktadır. Tasarım esnasında, kesme yükünün ara malzeme ve yapıştırıcının dayanım değerini aşmadığından emin olmak gerekmektedir.

3.1.5. Rüzgar Türbini Kanatlarının Üretim Metodolojisi

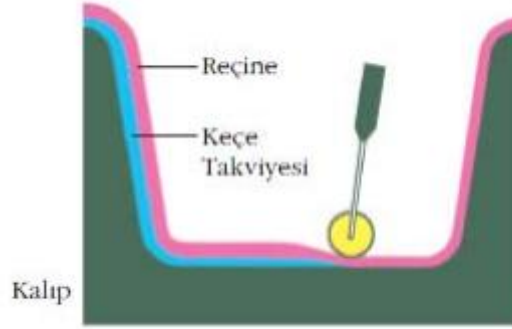
Rüzgar Türbini Kanatları kompozit yapıda ürünler olduğuna göre, üretim yöntemlerinde de büyük kompozit üretimlerin yapıldığı yöntemlerden biri ile yapılır. Yakın geçmişte “El Yatırması Yöntemi”, daha sonra geliştirilerek “Vakum Torbalama ile El Yatırması Yöntemi” ve günümüzde yaygın olarak “İnfüzyon Yöntemi” olarak adlandırılan yöntemlerle kanatların üretimi yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir.

3.1.5.1. El Yatırması Yöntemi

El yatırması yöntemi genel olarak takviye malzemelerinin kalıplara yatırılıp, açık kalıp üzerinde sıvı reçine uygulanması temel esasına dayanır. Düşük üretim düzeylerinde yaygın kullanımı olan bu kalıplama yöntemi, ilk zamanlardan beri endüstride sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden biri olmuştur. Bir çok uygulama alanı vardır. Rüzgar türbini kanadı ve tekne gövdesi gibi yüksek mukavemet gerektiren büyük parçaların üretiminde rahatlıkla kullanılabilir.

Kompozit endüstrisi kalıplama yöntemleri arasında temel ve evrensel olarak en uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu proseste sıvı reçine, takviye malzemesi ile (genellikle cam elyafı veya kumaşı) beraberce açık kalıba uygulanır. Reçinede meydana gelen kimyasal reaksiyonlar malzemeyi yüksek dayanımlı ve hafif ürünler elde edilebilecek şekilde sertleştirir.

Beton matris içinde çelik çubukların takviye malzemesi görevi görmesi gibi, reçine, elyaf takviyeleri için matris görevindedir. Üretimin başlangıç aşamasında, pigment katkılı jelkotlar kalıp yüzeyine spreyleyici tabancası, fırça ya da rulo ile uygulanır. Jelkot yeterli derecede sertleştiğinde, takviye malzemesi tabakaları jelkot’un üzerine yerleştirilir ve reçine rulo ile uygulanır. Takviye malzemesi üzerine tatbik edilen reçine sertleşene kadar rulolama işleminin yapılması faydalıdır. Rulolama sayesinde laminat tabakaları arasında kalan hava kabarcıkları mümkün olduğunca giderilmeye çalışılır. Bu rulolama işlemi, aralıklı olarak her kat takviye malzemesi uygulamasının ardından tekrarlanmaktadır. Takviye malzemesinin kalınlığı ve çeşidi için tasarımda belirlenen değerler kullanılır.

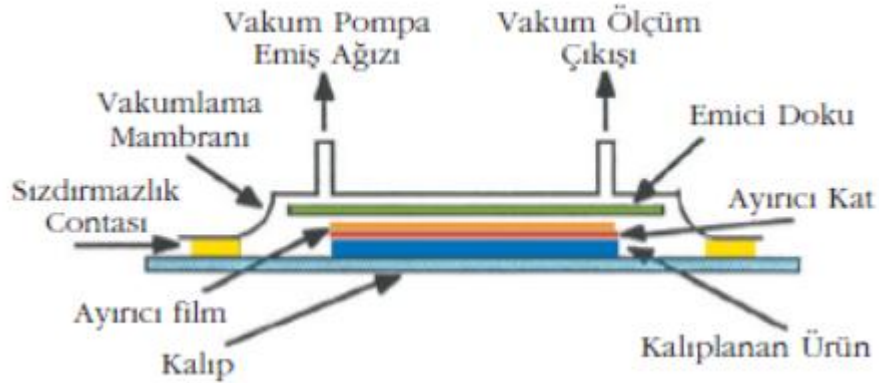


Şekil 3.19. El Yatırması Yöntemi

3.1.5.2. Vakum Torbalama ile El Yatırması Yöntemi

Bu yöntemin el yatırması yönteminden farkı; ürün yukarıda bahsedildiği şekilde el yatırması yöntemi ile yapıldıktan sonra reçine reaksiyonu hızlanıp jelleşme kıvamına gelmeden önce tüm kalıp içine sıcaklığa ve basınca dayanıklı plastik folyo ile kapatılıp, sızdırmazlığın sağlanmasından sonra sisteme vakum uygulanmasıdır.

Vakum uygulanmasının en önemli sebebi, mamulün içinde rulolama ile alınamayan hava kabarcıklarının vakum sayesinde ürünün içinden uzaklaştırılması ve bu alanların da reçine ile dolmasının sağlanmasıdır. Bu şekilde üretilen ürünlerin yapılan çekme, basınç ve burkulma testlerinde serbest şekilde yapılan el yatırmasına göre çok daha iyi sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır



Şekil 3.20. Vakum Torbalama ile El Yatırması Yöntemi (Anonim, 2013)

Yukarıdaki şekilde de görüleceği gibi bu yöntemde, ayrıca yardımcı malzemelerin de kullanımına ihtiyaç vardır.

El Yatırma Yöntemi ile bitirilen ürünün üzerine ayırıcı delikli film katmanı koyulur. Burdaki amaç, üzerine koyulacak olan fazla reçineleri emme görevindeki emme kumaşının ürünün üzerine yapışmasını engellemektir. Aksi takdirde emme kumaşının ürünün üzerinden sökülmesi çok zor hale gelir.

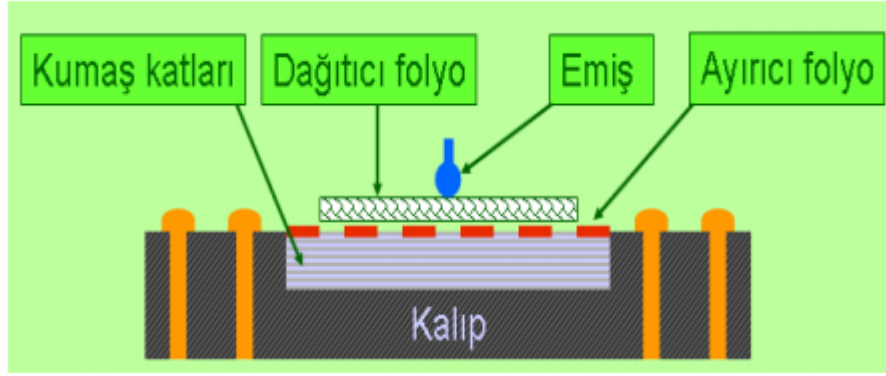
Vakum uygulaması için mutlaka ısı ve basınca dayanıklı bir vakum folyosu (membran) kullanılmalıdır. Bu folyo el yatırması ile yapılan ürünün tamamını kaplayacak şekilde ve kalıp kenarlarına uygulanacak sızdırmazlık sağlayan conta ya da bandlara yapıştırılarak yerleştirilir. Kalıp içindeki ürün tamamen sertleşene kadar vakum kesilmemelidir. Dışarıdan ısı verilerek reaksiyon hızlanması sağlanabilir.

3.1.5.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Bu yöntemin temel prensibi, vakum altına alınmış kuru takviye ve dolgu malzemelerinin basınç farkından yararlanılarak reçinenin ilerlemesi ile tamamen doyurulmasıdır.

Büyük ölçekli ürünlerde en iyi cam/reçine oranı bu yöntem ile sağlanabilmektedir ki bu da dayanımı çok daha yüksek ve daha hafif ürünler elde edilmesini sağlamaktadır. Reçine kendi başına oldukça kırılğan bir yapıdadır ve bu yöntem çoğunlukla serbest reçinenin üründe kalmasına engel teşkil eder.

Diğer yöntemlere göre maliyetleri daha fazla olmasına rağmen iş güvenliği ve işçi sağlığı açısından riskleri daha azdır. Bu yöntemin rüzgâr türbini kanatlarında kullanılmaya başlanması ile birlikte özellikle kalıp yapım teknolojileri de oldukça gelişmiş, kendinden ısıtmalı (su ya da elektrik ile), vakum girişleri hazır, izolasyonları yapılarak ısı kayıplarının en aza indirildiği kalıplar üretilerek ürün kalitesinin daha da artması sağlanmıştır.



Şekil 3.21. Vakum İnfüzyon Yöntemi

3.1.6. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretim Süreci

Rüzgâr Türbin Kanatlarının üretiminden önce tasarım ile ilgili tüm detayların önceden çözülmüş olması ve yazılı hale getirilmesi ile süreç başlamış olur. Bundan sonra uygun büyüklükte kapalı alan, tüm alt yapısı ile birlikte üretime hazır hale getirildikten sonra ana hatları ile aşağıda belirtilen aşamalar sırasıyla yerine getirilir (Uysal, 2008).

3.1.6.1. Malzeme ve Ekipman Tedariği ile Bunların Yerleşimi ve Depolanması

Üretim sürecinin her aşamasında kullanılacak ham ve sarf malzemelerin, kullanılacak el aleti ve ekipmanlar ile ürünlerin yapılacağı kalıpların önceden planlanarak temin edilmesi gerekmektedir. Bunlar için ayrılacak yerlerin özenle belirlenmesi, sonradan doğacak ihtiyaçların önceden tespiti ve tüm ekipmanların yerleşimi oldukça önemle düşünülüp planlanması gereken kısımlardır. Başlangıç kısmındaki iyi planlama, sonrasında çok daha verimli ve hızlı bir üretimin anahtarıdır.



Şekil 3.22. Bir Rüzgar Türbini Kanat Kalıbı Görünümü

3.1.6.2. Hammadde Hazırlığı

Rüzgâr türbini kanatlarının üretiminde kullanılacak takviye malzemeleri (cam ve/veya karbon kumaşları) ve ara malzemeler (köpük ve balsa levhaları) genel olarak tedarikçilerden belli ambalajlarda ve ölçülerde gelmektedir.

Bunların önceden kullanılacak kalıplara göre uygun hale getirilmesi, hazırlanması gerekir. Aksi takdirde üretim süreci ciddi olarak uzar ve işin tamamlanması oldukça fazla zaman alır.

Cam ve/veya karbon kumaşları ya otomatik kumaş kesme makinaları ile, ya da el makasları ile kalıplara uygun halde kesilerek hazırlanması en önemli ön hazırlık safhasıdır.

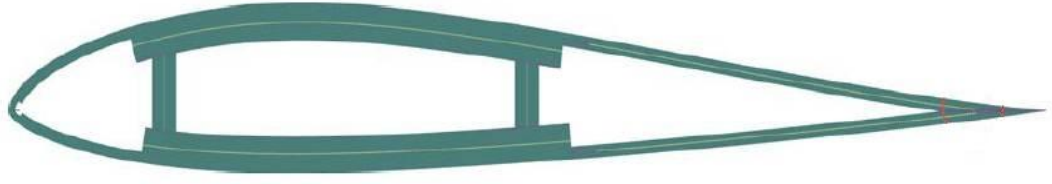
Otomatik kesme makinaları, seri üretimde çok hızlı üretim yapılmasını sağlamanın yanı sıra, uygun çizim programları ile çalıştırılarak kumaşların en az fire ile kullanılmasını sağlarlar. Benzer şekilde hazır halde tedarik edilemiyorsa, planlara göre önceden hazırlanmış köpük ve balsa levhaları da yine sürecin hızlı yürütülebilmesi için gerekli hazırlıklardır.

Reçine ve sertleştiricilerin uygun dozajlama makinaları kullanılarak elde edilmesi de yine malzeme hazırlıkları içinde olması gereken unsurdur (Uysal, 2008).

3.1.6.3. Kanat İçinde Kullanılan Önceden Üretilen Parçaların Hazırlanması

Rüzgâr türbini kanatlarında, yapıları gereği bazı parçalarının önceden hazırlanması gerekir. Bu parçaların en önemlileri kabaca şu şekilde sıralayabiliriz;

- Son derece rijit ve dayanıklı bir ürün olan, her iki yüzeyin orta bölgesine yerleştirilen ve omurga dediğimiz parçaların yüzeylere yapıştığı yere denk gelen Ana Kuşak diye tabir edebileceğimiz bir parça (Spar cap, main belt),



Şekil 3.23. Ana Kuşak Elemanının Kanat Kesitindeki Görünümü (Anonim, 2014)

- İki yüzey arasında kuvvet aktarımına yarayan ve Omurga adı verilen parçalar,
- İki yüzeyin birleşimi/yapıştırılmasında kullanılan ve bölgelerin güçlendirilmesini de sağlayan Birleşim Kepleri denilen parçalardır. Bu parçalar ve tasarıma göre değişebilen daha farklı parçalar önceden üretimi yapıлып, kullanıma hazır hale getirilir.

3.1.6.4. Kanadın Oluşturulması (Kalıplama)

Kanadın iki yüzeyden (kabuk) oluştuğundan bahsetmiştik. Bu sebeple, her iki yüzey için iki farklı kalıp bulunmaktadır.

Bu kalıplarda ayrı ayrı yüzeylerin kompozit imalatı yapıldıktan sonra ara perde şeklinde “Omurgalar” yapıştırılır ve bu iki kabuk yukarıda belirtilen “Yapıştırma Kepleri” de kullanılarak hamur kıvamındaki epoksi reçine karışımı ile bir araya getirilerek dışarıdan ısı verilerek kürlenir.

Kanadın hem Emme, hem de Basınç Yüzeyleri üretilmeye başlanmadan önce kalıpların yüzeylerine, “Kalıp Ayırıcı” denilen kimyasallar uygulanır.

Bu uygulamanın amacı; yüzeyler birleşip kanat haline geldikten sonra kalıbın sökülmesi sırasında yapışmayı engellemektir. Bu bütün üretilen parçaların kalıp yüzeylerine uygulanır. Sonrasında önceden set halinde hazırlanmış cam kumaşları (kullanılıyorsa karbon kumaşları), kuru halde planlarına göre sırasıyla serilir, Ana Kuşak parçası yerleştirilir ve sonrasında dolgunluk ve eğilme rijitliği veren köpük ve/veya balsa plakları yerleştirilir. Tekrar üzerleri plandaki kumaşların uygulanması ile kumaş serme işlemi bitirilir.



Şekil 3.24. Cam Kumaşların Kalıba Serilmesi

Bundan sonrasında, infüzyon ile üretilen kanatlarda, reçinenin akışını sağlayan yardımcı malzemeler, vakumun homojen yayılması için gerekli malzemeler yerleştirildikten sonra vakum folyosu çekilerek vakum altına alınma işlemi gerçekleştirilir. Gerekli testlerin olumlu olması ile infüzyon işlemi reçine hortumlarının açılması ile başlar.



Şekil 3.25. Infüzyon İşlemi Öncesi Vakumlanmış Parça (Anonim, 2014)

Kabuklar tamamen reçine ile ıslanıp, doyurulana kadar reçine takviyesi yapılır ve işlem kesilmez. Ardından kalıbın ısıtma sistemi çalıştırılarak ürünün sertleşmesi beklenir.

Sertleşmiş ürün, üzerindeki yardımcı malzemeler sökülüp temizlendikten sonra Omurga dediğimiz parçalar yüzeylerden birine yapıştırılır ve yine kullanılan reçinenin

kürlenmesi beklenir. Bu sırada diğer yüzeyde işlemler tamamlanmaya çalışılır ve iki yüzeyin birbirine yapıştırılması için gerekli hazırlıklar yapılır.



Şekil 3.26. İnfüzyon İşlemi Bitirilmiş Kanat Yüzeyi

Yapıştırma Keplerinin de hazırlanması ile iki yüzey hamur kıvamındaki epoksi reçine ile bir araya getirilir. Bu bir araya getirilme sırasında ya hidrolik kalıp sistemi ile bir yüzey kalıbı diğerinin üzerine kapatılır ya da bu işlem için köprülü vinçler kullanılarak bir yüzey kalıbı ters çevrilerek üst üste getirilir. Ardından yine ısıtma sistemleri ile reçinenin reaksiyonu hızlandırılıp kalıbın uygun zamanda sökülmesi sağlanır (Uysal, 2008).



Şekil 3.27. Kanat Kalıbının Sökülmesi

3.1.6.5. Taşlama İşlemi

Kanadın kalıptan çıkartılmasından sonra, kanadın yüzeylerinin birleşim noktalarında oluşan reçine artıklarının temizlenmesi gerekir (Şekil 3.28.'de kanadın kenarlarındaki reçine taşmaları görünmektedir).

Bu işlem genelde kesme taşları kullanılan el aletleri ile yapılırken ortama yüksek miktarda toz ve gaz çıkışı olur. Başlama işlemi bu işi için yapılmış çoğunlukla emiş sistemi olan kabinlerde yapılmaktadır.



Şekil 3.28. Koruyucu Donanım ve Elbiseler

Burada çalışan kişiler vücutlarını tozdan koruyan giysilerle birlikte tam yüz maskeleri kullanarak çıkan gaz ve tozların zararlardan korunmalıdır.

Kanat üretiminde, işçi sağlığının en çok etkilendiği kısım olarak bu bölgenin söylenmesi yanlış olmaz. Taşlama kabininde benzer şekilde kanadın içinde kullanılan tüm kompozit parçaların kesilmesi işlemleri de yapılır. Bunun yanında, parçalarda ya da kanat yüzeylerinde yapılan kontrollerde görülen herhangi bir infüzyon ya da yapışma hatası burada taşlama işlemi yapılarak tamir yapılmaya hazır hale getirilir (Uysal, 2008).

3.1.6.6. Delme-Kesme İşlemi

Rüzgâr türbini kanatları taşlama kabinindeki işleri bitirildikten sonra kök bölgesinin flanş yüzeyinin ölçüsüne göre kesilmesi ve buraya bağlanacak civata ve somunlar için deliklerinin açılması işlerini yapan özel makinalara yerleştirilir.



Şekil 3.29. Delme İşlemi (Anonim, 2014)

Otomatik program vasıtasıyla çalışan büyük kesme taşları ve matkap uçları ile sırasıyla kesim ve delim işleri tamamlanır. Sonrasında mutlaka ölçüm kriterlerine uyup uymadığı kontrol edilmelidir. Sorun olmadığı tespit edilirse kullanılıyorsa flanş parçası ve somun civata bağlantıları yapılır.

3.1.6.7. Montaj İşlemleri

Kanadın flanş ve civata–somun bağlantılarından sonra özellikle bazı ilave el yatırma ile yapılacak kumaş serimleri, eğer varsa arızalı bölgelerin tamir edilmesi ve en önemlisi olarak da yıldırımsavar bağlantılarının montajı yapılmaktadır.

Yıldırımsavar bağlantıları ve montajı kanadın üretiminde en önemli ve kritik işlerden biridir. Teknik verilere ve tasarım kriterlerine uygun olmadan yapılan yıldırımsavar bağlantıları telafisi imkansız sonuçlara neden olabilmektedir (Şekil 3.30.). Bazı kanat üreticileri soğuk iklimlere dikilecek türbin kanatlarına, buzlanmayı önleyici, ısıtma sistemleri monte etmektedirler. Eğer kanat ısıtma sistemi ile üretilecekse bu aşamada o işlemler de tamamlanabilir



Şekil 3.30. Yıldırım Çarpmış Bir Rüzgâr Türbini

3.1.6.8. Üretim Sonu İşlemleri

Kanadın üzerine eklenecek parçalar ve kompozit üretimlerin tamamı bitirildikten sonra kanadın dış etkenlerden korunmasını sağlayan kaplama sistemlerinin ve yüzey pürüzlülüğünü azaltan boya sistemlerinin uygulaması yapılmaktadır. Bu işlemler kanadın üzerine yapılacak son işlemlerdir.

Kaplama sistemi dendiğinde; Kanadı güneşin zararlı ışınlarından (UV), rüzgârın, yağmurun ve karın yıpratmasından, havadaki toz, gaz ve asitlerin aşındırıcı etkilerden kullanım süresi boyunca koruyan kaplama malzemelerinin uygulanması anlaşılmaktadır. Bu malzemeler genel olarak Jelkot adı ile anılan Polyüretan esaslı kimyasal malzemelerdir.

Kanadın yüzeyine uygulanacak jelkot malzemesinin iyi tutunması için mutlaka yüzey aşındırıcılar ile zımpara işlemi yapılmaktadır. En son olarak da kanadın verimliliğine de etki eden yüzey kalitesini yakalamak için yine genelde polyüretan esaslı olan boya uygulaması yapılmaktadır. Önceleri rulo ile yapılan uygulamalar, daha sonra yerini sprey uygulamalarına ve son olarak günümüzde özel tasarlanan robot kollar

ile yapılmaktadır. Bu gelişme, boyanın kanadın her her bölgesinde homojen bir kalınlık ile uygulanmasını ve yüzey pürüzlülüğünün en alt seviyeye indirilmesini sağlamıştır. Bu da türbinin enerji üretme verimliliğine etki eden bir faktördür (Uysal, 2008).



Şekil 3.31. Robot Kollar İle Kanat Yüzeyine Boya Uygulanması

3.1.6.9. Balans İşlemleri

Yaygın olarak rüzgâr türbini kanatları, her türbine üç adet bağlanarak çalışan sistemlerdir. Yukarıda bahsedilen süreçte üretimi gerçekleştirilen kanatlar, üçerli gruplar halinde set yapılarak son aşaması tamamlanmaktadır. Bu da kanatların kendi içinde yaklaşık eşit ağırlığa getirilmesi ile gerçekleşir ki bu işleme “Balans İşlemi” adı verilir (Karabağ, 2011).

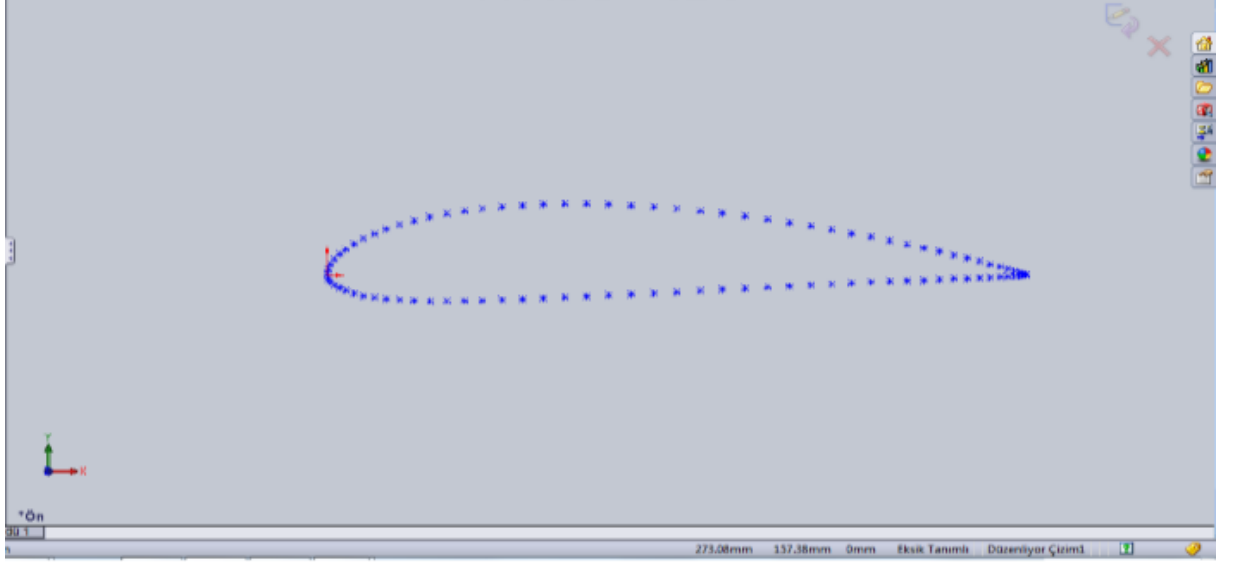
Bu işlemde büyük ölçekli tartılar ile her bir kanadın ağırlıkları tespit edilir ve ağır olan kanada göre diğer kanatların hali hazırda montajı üretim aşamasında yapılmış boş kutusuna kurşun bilye ve reçine karışımı ilave edilerek ağırlıkları artırılmaya çalışılır. Bu işlemden sonra kanatların aynı türbine takılması gerektiğini gösteren etiketleme ve numaralandırma sistemi uygulanarak stok sahasına gönderilir ve oradan da büyük dorseli taşıma araçları ile sevkiyatı yapılır.



Şekil 3.32. Kanadın Taşınması İşlemi (Anonim, 2014)

Rüzgar türbini kanadı modellemesi bilgisayarda Solidworks programı kullanarak yapılmıştır. Çizim sırasında yapılan işlemler sırasıyla gösterilmiştir. Çizim sırasında kullanılan boyutlar rüzgar türbini kanadının prototip boyutlarıdır. İlk olarak damla (airfoil) modelinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu aşamada yaptığımız araştırmalar sonucunda uç hız oranındaki artış ve günümüzde kullanımı en sık olan National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) tarafından belirlenmiş damla (airfoil) modellerinden NACA 4415 tipi seçilmiştir. Bizde bu kanat modelinin tasarımındaki uygunluğunu araştırmaya karar verdik. Damla şeklinin oluşması için birim uzunluktaki damla modelinin koordinat sistemindeki noktalarından yararlanılmıştır.



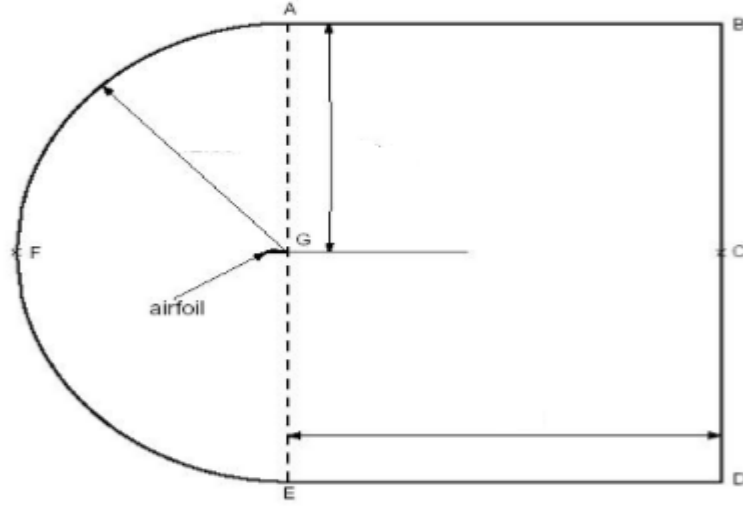
Şekil 3.33. Solidworks'te Çizilen NACA 4415 Damla Yapısı (www.airfoiltools.com)

Daha sonra 2m boyunca düzlemler atayarak her düzlem için farklı kort uzunluklara sahip olan damla modelleri çizilmiş ve bunlar Loft komutuyla et kalınlığı girilerek kanat şekli oluşturulmuştur.

Kanada destek profili eklemek için düzlem atıp bu düzlemde destek profili Sketchi çizilir ve ayırım çizgisi ekle komutuyla iç yüzeylere çizilen destek profili Sketchi atılır. Sınır birleştirmeyele birleştirilir ve böylece kanat destek profili oluşturulmuş olur.

Daha sonra referans düzlem eklenerek rotor bağlantı elemanının Sketchi çizilir ve Loft komutuyla kanat profiliyle birleştirilir böylelikle rüzgar türbini tasarımı tamamlanmış olur.

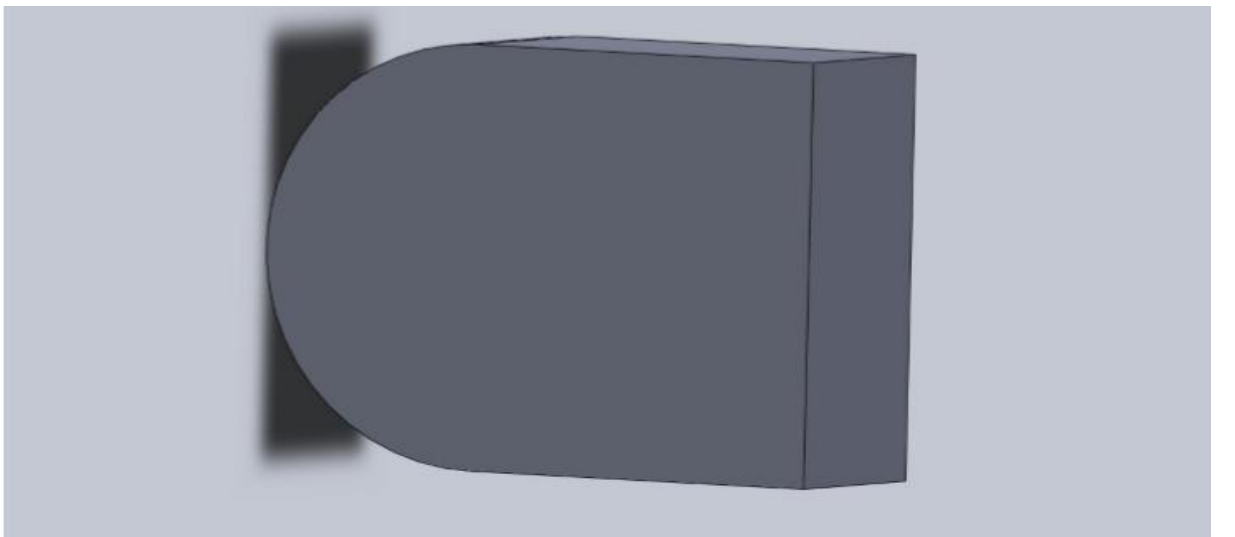
3.2.Yöntem



Şekil 3.34. Hava Hacmi Modelleme Kistası

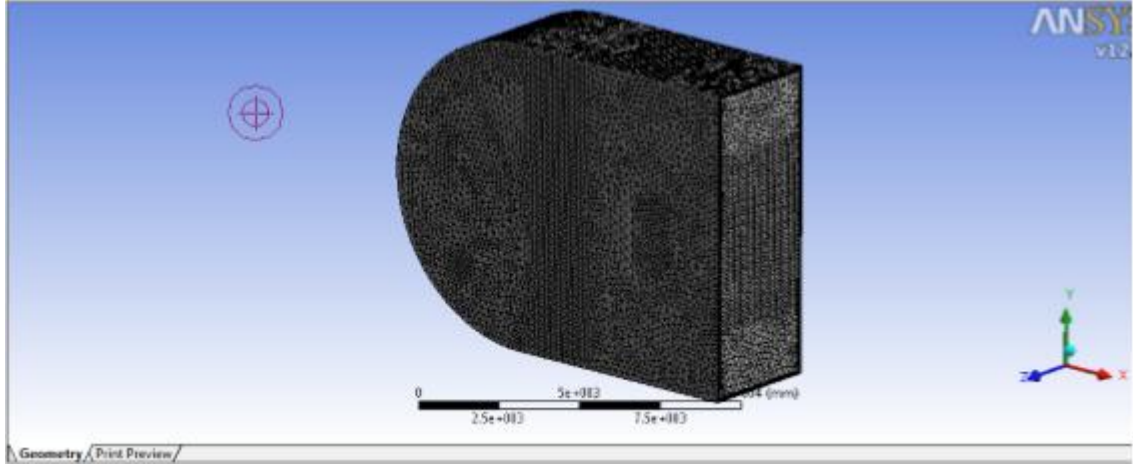
Rüzgar türbini kanadının içinde bulunduğu hava hacmi modellenir. Bu modelleme şekil 3.34.'de gösterildiği gibi yapılır. G noktasına damla modeli şeklindeki rüzgar türbin kanadı yerleştirilir. G noktası kistas olarak alındığında modelleme parametreleri şekil üzerinde gösterildiği gibi yapılır.

Hava hacminin şekil 3.34.'deki parametreler kistas alınarak ölçülendirilmiş 3 boyutlu çizimi solidworks programında yapılmıştır. Aşağıda şekil 3.35.'de bu modelleme gösterilmiştir.



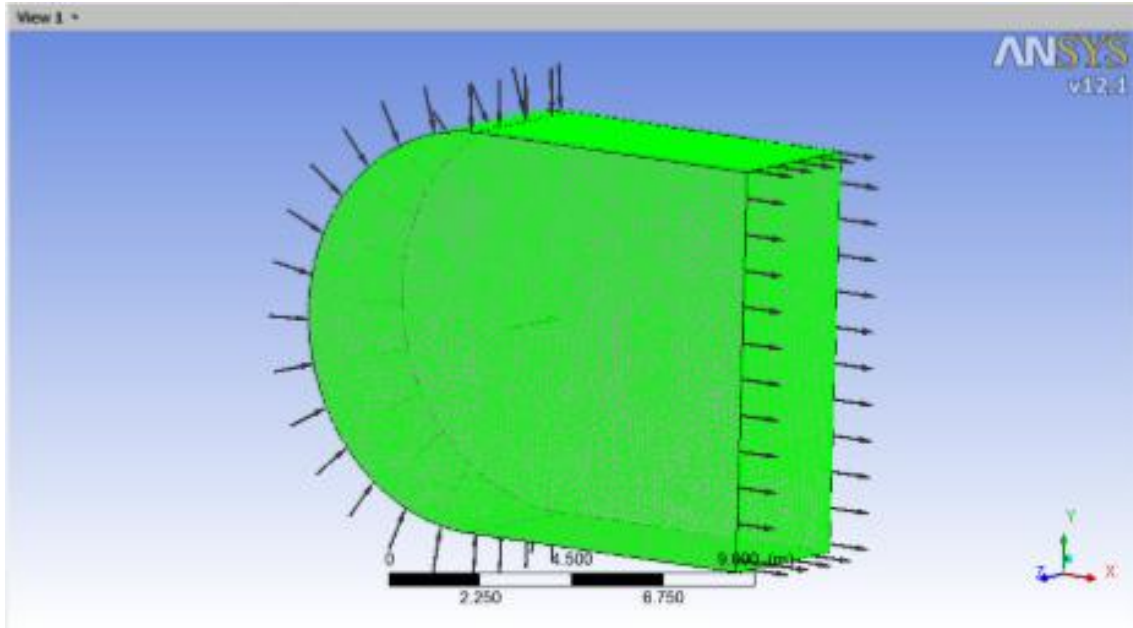
Şekil 3.35. Hava Hacminin Solidworks'te Modellenmiş Hali

Yukarıda şekil kıstas alınarak G noktasında rüzgar türbin kanadı konumlandırılarak modelleme yapılmıştır.



Şekil 3.36. Ansys Workbench CFX Programında Mesh Edilmiş Hava Hacmi

Sınır şartları aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Girişte 33 m/s rüzgar hızı, çıkışta 0 Pa ve geri kalan kısımlar kapalı hacim olarak sınır şartları tanımlanmıştır.



Şekil 3.37. Sınır Şartlarının Gösterimi

Giriş rüzgar hızı meteoroloji müdürlüğünün arşivinden alınan, geçmiş yıllara ait verileri göz önüne alarak maksimum değer olan 33 m/s hız kabul edilmiştir

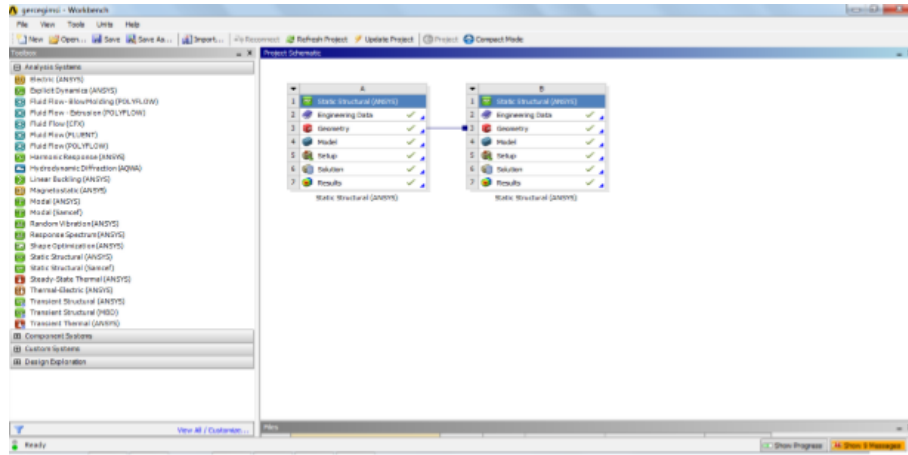
Burada amaç bu maksimum rüzgar hızı değerinde maksimum basıncı elde etmektir.

Sonraki aşamada rüzgar türbini kanadında meydana gelen basıncın Ansys programında belirlenmesi oldu.

Bu kısımda rüzgarın kanat üzerinde oluşturduğu maksimum basınç bulundu.

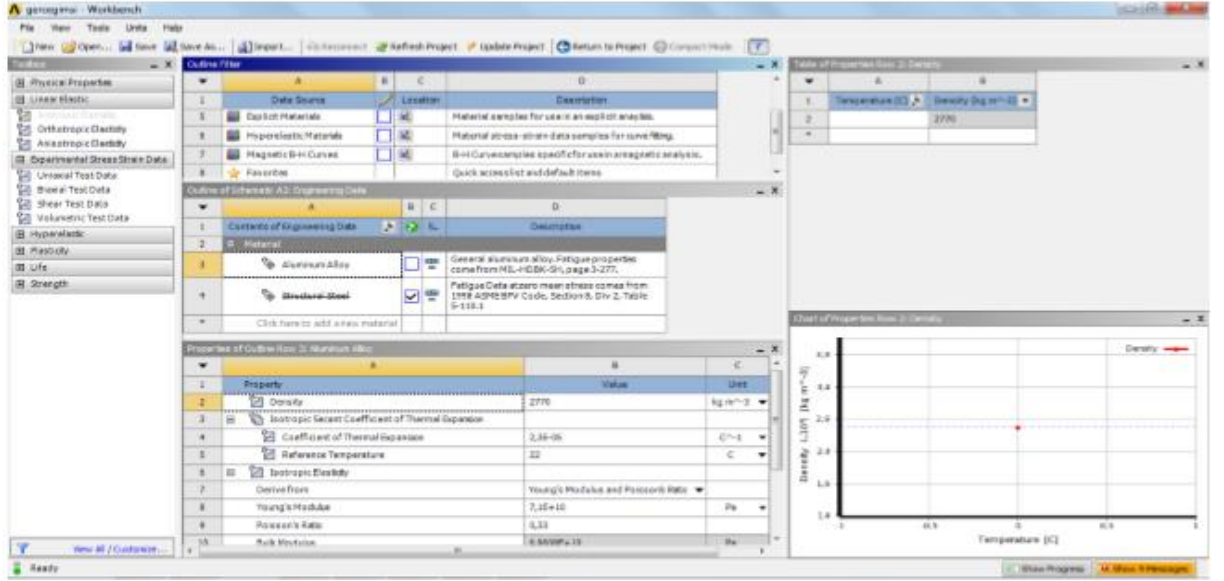
Bu değer 3.53 Mpa olarak programdan okunmuştur.

Kanadın statik analizi bilgisayarda Ansys programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.38. Ansys Workbench Arayüzü

İlk olarak programda kullanılacak malzemeye ait özellikler tanımlanması gerekmektedir. Kompozit malzeme özellikleri atamadan önce malzeme özellikleri homojen olarak dağılmış Alüminyum alaşım kullanılarak analiz yapılır ve meydana gelen gerilme büyüklüklerine bakılır. Alüminyum alaşımın malzeme özellikleri Engineering Data sekmesindeki program kendi değerleridir.

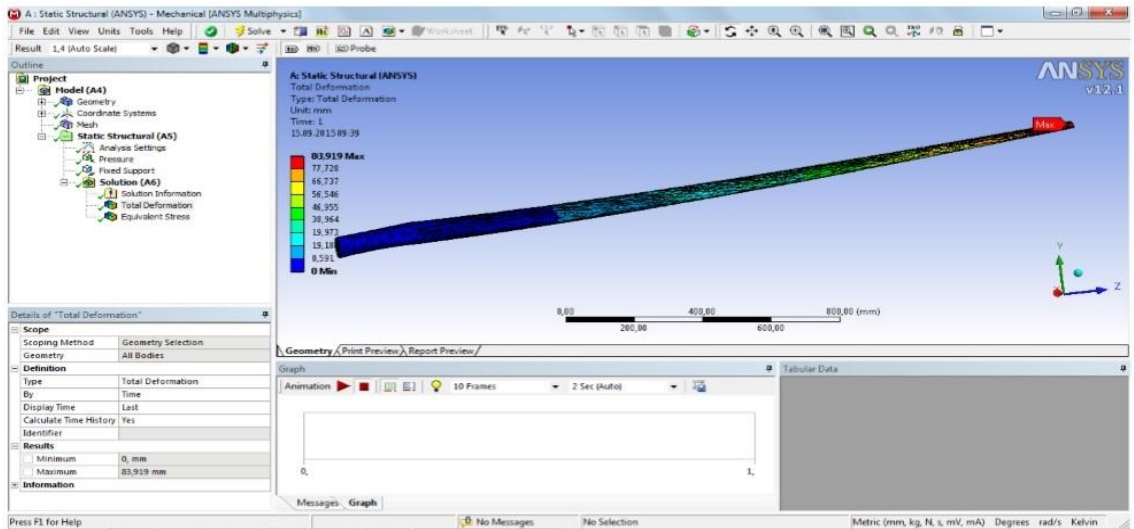


Şekil 3.39. Ansys Workbench Engineering Data Menüsü

Kanat analizi yaparken daha sonra Solidworkste tasarlanan kanat modeli workbenchte Geometry import edilir.

Kanatta uygulanan kaldırma ve sürüklenme basınçları uygulanır ve mafsal fixed support seçilir.

Araştırması istenen sonuçlar toplam deformasyon olarak seçilmiştir. Toplam deformasyon miktarı maksimum 83,919mm olarak saptanmıştır.



Şekil 3.40. Kanat elemanına etkiyen deformasyon

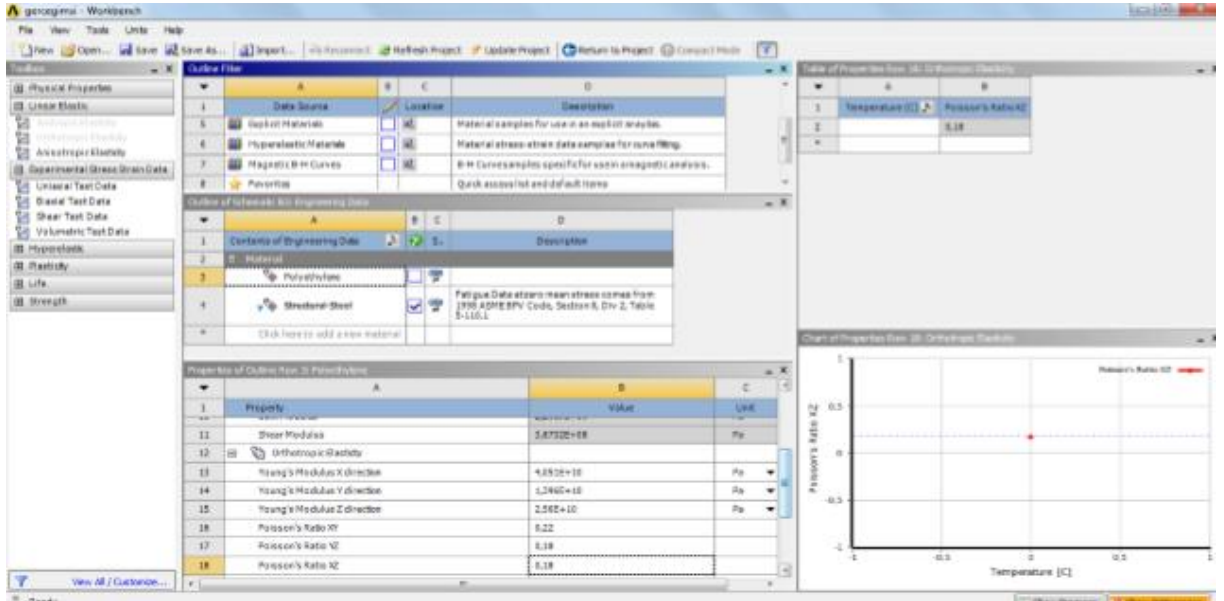
Kanatta meydana gelen maksimum gerilme 372,38 MPa olarak bulunmuştur

Daha sonra kompozit özellikleri için e-glass epoxy karışımı özellikleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Kompozit malzemenin özellikleri çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Kompozit Malzemenin Özellikleri

property	E-glass/epoxy
Fiber volume ratio (%)	65.00
Denity	1.84
Longitudinal modulus E1	39.91 (Gpa)
Transverse modulus E2	12.98 (Gpa)
In-plane shear modulus	3.09 (Gpa)
Poisson's ratio	0.20
Longitudinal tensile strength	779,30 (Mpa)
Transverse tensile strength	63,00 (Mpa)
Longitudinal compressive strength	296,00 (Mpa)
Transverse compressive strength	123,00 (Mpa)
In-plane shear strength	68,00 (Mpa)
Interlaminar shear strength	37,00 (Mpa)

Engineering Datada Orthotropic Elasticity özellikleri tablodaki veriler girilerek malzeme tanımlanmıştır.



Şekil 3.41. Ansys Workbench Engineering Data Menüsü

Toplam deformasyon 282,50 mm olarak bulunmuştur.

Kanattaki maksimum gerilme 422,39 MPa olarak bulunmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Rüzgar türbininde yapılan araştırma bulguları değerlendirilmekle birlikte türbinin en önemli ve işlevsel eleman olarak görülen parçasının kanat elemanı olduğunun görüldüğü, kanadın üretilmesi, modellenmesi, malzeme seçimi ve diğer birçok dikkat edilmesi gereken özelliklerinin olduğunun gözlemlendiği, yine yapılan araştırma ışığında rüzgar türbinlerinin ilk zamanlarda işlenmesi ve bulunması kolay olması nedeni ile ağaç veya sertleştirilmiş talaş vb. malzemelerden yapılmış olduğunun görüldüğü, ancak bu malzemelerin rüzgar gücünü enerjiye çevirmesinde yüksek düzeylerde verim kaybına meydan verdiği, yine bu malzemelerin ömürleri konusunda çok ciddi kayıpların olduğu yönünde bulgulara rastlanıldığı, bununla birlikte günümüzde fazlasıyla epoksi reçine ve benzeri kimyevi ve plastik malzeme karışımlarından elde edilen malzemelerin kullanıldığı, bu tür malzemelerin kanadın dayanımını ağaç ve benzeri malzemelere göre çok daha fazla dayanım ve ömür imkanı sunduğunun gözlemlendiği, yine bu gözlemler ve hesaplamalar ışığında alüminyum ve kompozit malzeme deformasyonları Ansys programında tasarlanan ve sınır şartları belirtilen akış analizi ve hava akım alanları ile optimum şartlar sağlanması amaçlanan bilgiler ışığında mukayese edilmiş, bu sonuç ışığında alüminyum alaşımlı kanat tasarımı sonucunda toplam deformasyonun 83,92 mm, kompozit malzeme ise bu değer 288,46 mm olarak bulunduğu görülmüş, kanattaki maksimum gerilmenin hesaplamalar sonucunda alüminyum alaşımlı malzeme bu değer 372,38 Mpa, kompozit malzeme ise 421,26 MPa olarak bulunmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yükleme şartları alüminyum alaşımında olduğu gibi tanımlanıp analiz başlatılır elde edilen sonuçlar;

Toplam deformasyon 83,92 mm olarak bulunmuştur.

Kanattaki maksimum gerilme 372,38 MPa olarak bulunmuştur.

Yükleme şartları tanımlanan kompozit malzemede ise tanımlanıp analiz başlatıldığında elde edilen sonuçlar;

Toplam deformasyon 288,46 mm olarak bulunmuştur.

Kanattaki maksimum gerilme 421,26 MPa olarak bulunmuştur.

Tanımlanan kompozit malzemenin fiber/reçine oranının düşük olması veya takviye elemanının istenilen dayanıma sahip olmaması kanatta meydana gelen gerilmeleri arttırdığı düşünülmektedir. Bununla beraber daha iyi bir cam elyaf türü ve elyafın çeşitli örgü yapılarıyla kullanılmasıyla oluşturulması sağlanılan malzemelerin kullanılması, oluşan bu gerilmeleri giderebileceği kanaatini oluşturmuştur.

Tanımlı alüminyum malzemedeki deformasyon ve gerilmeler dikkate alındığında tanımlı kompozit malzemeye oranla daha güvenli ve kararlı bir yapıda olduğunun görüldüğü ancak tasarım, üretim ve maliyet kriterleri göz önüne alındığında kompozit malzemelerin uygun şekilde bir araya getirilmesi halinde günümüz koşullarında beklenen ucuzluğu, dayanımı ve hafifliği sağlamada çok faydalı olacağı kanaati hasıl olmuştur.

Bu çalışmamızın devam ettirilmesi aşamasında; NACA kanat tiplerinin diğerleri için modellenen yeni kompozit yapıların oluşturulması ile yeni sayısal çalışmalar yapılabilir, oluşturulan modelin desteklenmesi için küçük boyutlarda bir model oluşturularak deneysel çalışmalar da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Uysal, Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul, 2008
- [2] Billur E., Çevik E., Parnas L., Balya B., Şenel F., Rüzgar Türbinleri Rotor Kanatlarının Üretimi ve Belgeleştirilmesi, Ankara, 2009
- [3] Önder M., Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı, Ankara, 2006
- [4] Güneş İ.İ., Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simulasyonu ve Kontrolü, Gebze, 2006
- [5] Şentürk U., Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik olarak İncelenmesi, İzmir, 2007
- [6] ÖZDAMAR, A.: “Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı Üzerine Bir Araştırma”, Güneş Günü Sempozyumu, S. 151-160, TÜBİTAK ve MMO Kayseri Şubesi Yayını, Kayseri, 1999
- [7] Karabağ S. İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi’, Rüzgar Türbini Kanadı İmalatı, İzmir, 2011
- [8] Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Yekarum e-Dergi, 2014
- [9] Karlı V.M., 11kW Yatay Eksen Rüzgar Türbini Tasarım ve İmalatı, Gaziantep, 2005
- [10] Hepperle M., Airfoil Polars for NACA 4415, 2009

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İzmir’de doğdu. İlkokul ve Ortaokul eğitimini İstanbul’ da, Lise eğitimini Adana’ da tamamladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’ nden geçiş yaptı. Üniversiteden 2013 yılında mezun oldu. Mezuniyet sonrasında kendi firması olan Seri Proje Mühendislik firmasında Makine Mühendisi olarak iş hayatına devam etmektedir.