

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT MALZEMELERİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Makine Mühendisi Alper UYSAL

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTIMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. RÜZGAR ENERJİSİ.....	3
2.1 RÜZGAR GÜCÜ KRONOLOJİSİ.....	3
2.2 RÜZGAR ENERJİSİNİN AVANTAJLARI.....	5
2.3 RÜZGAR ENERJİSİNİN DEZAVANTAJLARI.....	7
2.4 DÜNYA KURULU RÜZGAR GÜCÜ POTANSİYELİ.....	8
2.5 RÜZGAR ENERJİSİNİN DİĞER ENERJİ KAYNAKLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI.....	10
2.6 RÜZGAR TÜRBİNİ TESİS YERİ SEÇİM KRİTERLERİ.....	11
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ, BİLEŞENLERİ, ŞEBEKEYE BAĞLANMASI VE RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GELECEĞİ.....	14
3.1 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	14
3.1.1 YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	14
3.1.2 DIKEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	15
3.1.3 EĞİK EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	16
3.2 RÜZGAR TÜRBİNİ BİLEŞENLERİ.....	16
3.2.1 ROTOR KANATLARI.....	18
3.2.2 FREN SİSTEMİ.....	18
3.2.3 DÖNDÜRME (YAW) SİSTEMİ.....	19
3.2.4 ELEKTRONİK KONTROL ÜNİTESİ.....	19
3.2.5 ANEMOMETRE VE YELKOVAN.....	19
3.2.6 İLETİM SİSTEMİ.....	20
3.2.7 JENERATÖRLER.....	20
3.2.8 SOĞUTMA ÜNİTESİ.....	22
3.2.9 KULE.....	22
3.3 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE BAĞLANMASI.....	23
3.4 RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ – HIZ İLİŞKİSİ.....	24
3.5 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÖMRÜ.....	27
3.6 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN BAKIMI.....	27

	Sayfa
3.7 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GELECEĞİ.....	28
4. RÜZGAR TÜRBİNİ KONSTRÜKSİYONLARINDA KULLANILAN MALZEMELER....	29
4.1 KOMPOZİT MALZEMELER	32
4.1.1 KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJLARI.....	34
4.1.2 KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANILAN REÇİNELER	36
4.1.2.1 Termoset Reçineler	36
4.1.2.1.1 Doymamış Polyester Reçineler.....	37
4.1.2.1.2 Yoğunlaştırıcı Reçineler	38
4.1.2.1.3 Epoksi Reçineler	39
4.1.2.2 Termoplastik Reçineler	40
4.1.2.3 Termostabil Reçineler.....	41
4.1.3 KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANILAN DOLGU VE KATKILAR	41
4.1.3.1 Dolgu Maddeleri	42
4.1.3.1.1 Takviye Amaçlı Dolgular	42
4.1.3.1.2 Takviye Amaçlı Olmayan Dolgular.....	43
4.1.3.2 Katkı Maddeleri	43
4.1.3.2.1 Kalıp Ayırıcı Katkılar	43
4.1.3.2.2 Boya Maddeleri ve Renklendiriciler.....	44
4.1.3.2.3 Çekme Önleyici Katkılar	44
4.1.3.2.4 UV Işık Dengeleyiciler	44
4.1.4 KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANILAN FİBERLER.....	44
4.1.4.1 Cam Fiberler	44
4.1.4.2 Karbon Fiberler	47
4.1.4.3 Aramid Fiberler.....	48
4.1.4.4 Seramik Fiberler	48
4.1.4.5 Termostabil Sentetik Fiberler	49
4.1.4.6 Diğer Fiberler.....	49
4.1.5 KOMPOZİT MALZEMELERDE RÜZGARIN ÇARPMA ETKİSİ	50
4.2 RÜZGAR TÜRBİNİ ZEMİN YAPILARINDA KULLANILAN MALZEMELER.....	51
4.3 RÜZGAR TÜRBİNİ KULE YAPILARINDA KULLANILAN MALZEMELER	51
4.4 RÜZGAR TÜRBİNİ MOTOR YUVASI (NACELLE) YAPILARINDA KULLANILAN MALZEMELER	52
4.5 RÜZGAR TÜRBİNİ ROTOR KANATLARINDA KULLANILAN MALZEMELER.....	52
5. RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT PROFİLLERİ.....	55
5.1 RÜZGAR TÜRBİNİ ROTOR KANADININ İMALATI.....	63
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	68
6.1 MALZEME.....	68

	Sayfa
6.2 KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ	71
6.3 NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	73
6.4 UYGULANAN DENEYLER	75
6.4.1 ÇEKME DENEYİ	75
6.4.2 MİKROSERTLİK DENEYİ	77
6.4.3 MİKROYAPI İNCELEMESİ	77
6.5 DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	78
6.6 POLYESTER MATRİSLİ CAM FİBER VE Balsa TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMEDEN RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT MODELİNİN ÜRETİLMESİ	87
6.6.1 RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT MODELİNİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER	87
6.6.1.1 Kalıp Malzemesi	87
6.6.1.2 Kanat Modeli Malzemesi	88
6.6.2 RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT MODELİ ÜRETİMİ	88
6.6.2.1 Kanat Kalıbının Tasarım ve İmalatı	88
6.6.2.2 Kompozit Kanat Modeli Üretimi	91
6.6.3 ÜRETİLEN MODELDEN ELDE EDİLEN GÜCÜN HESAPLANMASI	92
7. SONUÇ	94
KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGE LİSTESİ

CO ₂	Karbondioksit
NO _x	Azotoksit
SO ₂	Kükürtdioksit
H ₂ O	Hidrojenioksit
KOH	Potasyum hidroksit
CaCO ₃	Kalsiyumkarbonat
Al ₂ O ₃	Alümina
CaO	Kireç
MgO	Magnezya
B ₂ O ₃	Boroksit
Fe ₂ O ₃	Demiroksit
TiO ₂	Titanyumoksit
Na ₂ O	Sodyumoksit
K ₂ O	Potasyumoksit
B ₄ C	Borkarbür
SiC	Silisyumkarbür
BorSiC	Bor silisyumkarbür
F	Flor
Co	Kobalt
B	Bor
Si	Silisyum
Cu	Bakır
Mn	Mangan
Zn	Çinko
Fe	Demir
Mg	Magnezyum
Cr	Krom
Ti	Titanyum
Ni – Ti	Nikel – Titanyum
Cu – Al – Ni	Bakır – Alüminyum – Nikel
P	Güç
T	Tork
Cp	Güç katsayısı

λ	Uç hız oranı
ρ	Yoğunluk
A	Kanat alanı
V	Hava (rüzgar) hızı
q	Türbin kanat açısı
w_1	Türbin milinin açısal dönüş hızı
r	Türbin yarıçapı
α	Hücum veya geliş açısı
θ	Kaldırma açısı
c	Profil kiriş uzunluğu
D	Sürüklenme kuvveti
L	Kaldırma kuvveti
M	Moment
R	Bileşke kuvvet
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürüklenme katsayısı
E_f	Çekme dayanımı
E_f / ρ	Özgül modül
σ_{fu}	Çekme dayanımı
σ_{fu} / ρ	Özgül dayanım
ε_{fu}	Kritik uzama

KISALTIMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
GRP	Cam Takviyeli Plastik
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Plastik
NACA	Havacılık için Ulusal Danışma Kurulu
CNC	Bilgisayar Kontrollü Takım Tezgahı
PVC	Polivinilklorür
UV	Ultraviyole
HS	Yüksek Dayanımlı
HM	Yüksek Modüllü
UHM	Ultra Yüksek Modüllü
1 K C F + P	1 Kat Cam Fiber + Polyester
1 K C F + V	1 Kat Cam Fiber + Vinilester
2 K C F + P	2 Kat Cam Fiber + Polyester
2 K C F + V	2 Kat Cam Fiber + Vinilester
3 K C F + P	3 Kat Cam Fiber + Polyester
3 K C F + V	3 Kat Cam Fiber + Vinilester
1 K C F + 1 K B + P	1 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Polyester
1 K C F + 1 K B + V	1 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Vinilester
2 K C F + 2 K B + V	2 Kat Cam Fiber + 2 Kat Balsa + Vinilester
2 K C F + 1 K B + V	2 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Vinilester

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 15 m/s Rüzgar Hızında 20 MW Güç Üretmek için Tasarlanan Türbin.....	4
Şekil 2.2 Honnef Tezine Göre Deniz Üzerine Kurulan Rüzgar Türbini	4
Şekil 2.3 Siyah Kanatlı Rüzgar Türbinleri	5
Şekil 3.1 Rüzgarı Önden ve Arkadan Alan Yatay Eksenli Türbin Tasarımları	14
Şekil 3.2 Dikey ve Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
Şekil 3.3 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri a) Savonius Tipi b) Darrieus Tipi	15
Şekil 3.4 Bir Rüzgar Türbini Önden ve Yandan Görünüşü.....	17
Şekil 3.5 Motor Yuvası (Nacelle) İç Yapısı	17
Şekil 3.6 Rotor ve Motor Yuvası (Nacelle).....	18
Şekil 3.7 Rüzgar Türbini Dişli Kutusu	20
Şekil 3.8 Rüzgar Türbini Kule Çeşitleri a) Konik Tüp Kule b) Kafes Yapılı Kule c) Halat Destekli Kule	23
Şekil 3.9 Türbin Güç – Hız ($P - w_1$) Karakteristiği.....	25
Şekil 4.1 Yapılarındaki Malzeme Formuna Göre Kompozit Malzemeler.....	33
Şekil 4.2 Cam Fiber Keçe.....	45
Şekil 4.3 Rüzgar Türbini Zemin Yapısı (Aero A.Ş., İzmir)	51
Şekil 4.4 Enercon E70 Rotor Kanadında Kullanılan Malzemelerin Gösterimi.....	53
Şekil 5.1 Rüzgar Enerji Tesisi Prensi Şeması.....	55
Şekil 5.2 Kanat ve Rotor Kesit Görüntüsü	56
Şekil 5.3 Asimetrik ve Simetrik Kanat Profilleri	56
Şekil 5.4 Kanat Profili Üzerine Etkiyen Kuvvetler	57
Şekil 5.5 Sürüklenme ve Kaldırma Kuvvetleri.....	57
Şekil 5.6 Akış Hatlı Bazı Cisimler	58
Şekil 5.7 Rüzgar Türbinini Etkileyen Temel Kuvvetlerin Gösterimi.....	59
Şekil 5.8 Bazı Rüzgar Türbini NACA Kanat Profilleri.....	60
Şekil 5.9 LS-1 Kanat Profili a) Tam ve b) Uçtan Görünüşü	61
Şekil 5.10 5 m Uzunluğunda LS-1 Profilli 3 Kanatlı Rotorun Değişik Açılardan Görünüşleri.....	61
Şekil 5.11 Kanat Profili	64
Şekil 5.12 Yarı Kalıba Dizilmiş Fiber Malzemelerin Poşetle Kaplanması (Aero A.Ş., İzmir)	64
Şekil 5.13 Yarı Kalıp Kapama Düzeninde Kapama İşlemi Öncesi Beklerken (Aero A.Ş., İzmir).....	65
Şekil 5.14 Sırtlık (Aero A.Ş., İzmir).....	65
Şekil 5.15 Sırtlığın Monte Edilmesi (Aero A.Ş., İzmir).....	65

	Sayfa
Şekil 5.16 Zımparalanan ve Zımparalanmayı Bekleyen Rüzgar Türbini Kanatları	66
Şekil 5.17 Kontrolleri Yapılmış Sevkiyata Hazır Rüzgar Türbini Kanadı (Aero A.Ş., İzmir)	67
Şekil 6.1 Cam Liflerin Bobin Üzerinde Toplanması	69
Şekil 6.2 Cam Fiber Keçe Rulosu	70
Şekil 6.3 Kompozit Malzemelerin Hazırlanmasında Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar	71
Şekil 6.4 Kompozit Malzemeler Üretilirken Kullanılan Kalıp	72
Şekil 6.5 Kalıp İçerisinde Sertleşmekte Olan Kompozit Malzemeler	72
Şekil 6.6 ASTM D 638'e Göre Çekme Numunelerinin Boyutları	73
Şekil 6.7 Hazırlanan Çekme Numunelerine Ait Örnekler	74
Şekil 6.8 Polyester Matrisli Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemenin 100x Büyütme Altında Mikroyapı Fotoğrafları	77
Şekil 6.9 Vinilester Matrisli Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemenin 100x Büyütme Altında Mikroyapı Fotoğrafları	78
Şekil 6.10 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Akma Gerilmelerinin Karşılaştırılması	79
Şekil 6.11 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Çekme Gerilmelerinin Karşılaştırılması	79
Şekil 6.12 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kopma Gerilmelerinin Karşılaştırılması	80
Şekil 6.13 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması	80
Şekil 6.14 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Bir Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması	81
Şekil 6.15 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli İki Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması	82
Şekil 6.16 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Üç Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması	82
Şekil 6.17 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Bir Kat Cam Fiber Keçe ve 1 Kat Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması	83
Şekil 6.18 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Akma Gerilmesine Etkisi	84
Şekil 6.19 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Çekme Gerilmesine Etkisi	84
Şekil 6.20 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Kopma Gerilmesine Etkisi	85
Şekil 6.21 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Gerinme Değerine Etkisi	85

	Sayfa
Şekil 6.22 Üretilen Kompozit Malzemelerin Kalınlıklarının Karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.23 Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikrosertlik Değerlerinin Karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.24 Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Fotoğrafları (100x) a) Polyester Matrisli Yapı, b) Vinilester Matrisli Yapı.....	87
Şekil 6.25 NACA 4415-83 Kanat Profilinin DesignFoil Programında Seçimi.....	89
Şekil 6.26 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Önden Görünümü.....	89
Şekil 6.27 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Soldan Görünümü	90
Şekil 6.28 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Sağdan Görünümü.....	90
Şekil 6.29 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Üstten Görünümü	90
Şekil 6.30 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin İzometrik Görünümü.....	90
Şekil 6.31 Kanat Modelinin Kalıbına Ait Bilgisayar Ortamında Tasarım Resimleri a) Alt Kalıp, b) Üst Kalıp.....	91
Şekil 6.32 Üretilen Kalıp Yarıları	91
Şekil 6.33 Cam Fiber Keçeye Sürülen Polyester Reçinenin Jelleşmesi	91
Şekil 6.34 Her İki Model Yarısının Etüv’de Kurlanmasından Önce Laboratuar Koşullarında Bekletilmesi	92
Şekil 6.35 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olacak Şekilde Üretilen Kanat Modeli	92
Şekil 6.36 Güç Katsayısı C_p ’nin Kanat Uç Hız Oranı λ ’ya Göre Değişimi	93

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Türkiye Enerji Talebi Karşılama Oranları	1
Çizelge 2.1 Dünya Rüzgar Santralleri Kurulu Gücü, 2006	8
Çizelge 2.2 Türkiye’de Kurulu Rüzgar Santralleri, 2006	10
Çizelge 2.3 Enerji Kaynaklarının Elde Edilebilirliği ve Kalan Ömürleri	10
Çizelge 2.4 Enerji Kaynaklarının Maliyet Açısından Karşılaştırılması	11
Çizelge 2.5 Enerji Kaynaklarının Çevresel Etki Bakımından Karşılaştırılması.....	11
Çizelge 3.1 Kullanılmakta Olan Rüzgar Türbin Tipleri ve Bunların Kullanım Yerleri.....	16
Çizelge 3.2 30 m’lik Kulede Ölçüm Yüksekliklerine Göre Ölçülen Parametreler	22
Çizelge 3.3 Rüzgar Türbinlerinde Rotor Çapına Göre Rüzgar Hızı – Güç İlişkisi (Enercon Wind Turbines Product Overview)	26
Çizelge 4.1 Rüzgar Türbini Bileşenlerinde Kullanılan Malzemelerin Yüzde Oranı.....	29
Çizelge 4.2 Rijit Tip Polyester Reçinelerin Karakteristikleri.....	37
Çizelge 4.3 Fenolik Reçinelerin Karakteristikleri.....	38
Çizelge 4.4 Epoksi Reçinelerin Genel Mekaniksel Karakteristikleri.....	39
Çizelge 4.5 Poliamid ve Polipropilen Reçinelere Ait Bazı Karakteristikler	41
Çizelge 4.6 Cam Çeşitleri ve Genel Karakteristikleri	45
Çizelge 4.7 Cam Çeşitlerinin Bileşimleri.....	46
Çizelge 4.8 E- ve R-Cam Fiberlerinin Mekaniksel Karakteristikleri.....	46
Çizelge 4.9 Tek Telden Oluşan ve Tellerden Çekilen E- ve R-Camlarının Çekme Dayanımları	47
Çizelge 4.10 E-Cam Fiberlerle Karşılaştırılarak Karbon Fiberlerin Özellikleri	47
Çizelge 4.11 Aramid Fiberlerin Mekaniksel Özellikleri.....	48
Çizelge 4.12 Bazı Seramik Fiberlerin Mekaniksel Özellikleri.....	49
Çizelge 5.1 Türbinlerde Kullanılan Bazı NACA Profillerinin Özellikleri.....	60
Çizelge 5.2 Uç Hız Oranına Göre Kanat Sayısı.....	62
Çizelge 5.3 Enercon E48 Rüzgar Türbini Rotor Kanatlarının Kontrolünde Hesaplanan Ağırlık ve Moment Aralıkları.....	66
Çizelge 6.1 Polyester ve Vinilester Reçinelerin Sıvı Haldeki Özellikleri.....	68
Çizelge 6.2 Üretilen Kompozit Malzemelerin Kalınlık Değerleri	73
Çizelge 6.3 Polyester Matrisli Üretilen Kompozit Malzemelerin Çekme Deneyi Verileri.....	75
Çizelge 6.4 Vinilester Matrisli Üretilen Kompozit Malzemelerin Çekme Deneyi Verileri	76
Çizelge 6.5 Üretilen Kompozit Malzemelerin Özgül Dayanım ve Özgül Modül Değerleri.....	77
Çizelge 6.6 Hazırlanan Numunelerin Ortalama Mikrosertlik Değerleri	77
Çizelge 6.7 5083 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu	88
Çizelge 6.8 5083 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Karakteristikleri.....	88

ÖNSÖZ

Gelişen teknoloji, sağladığı kolaylıklar yanında, beraberinde getirdiği birçok sorunla insanlığın önüne aşılması zor yeni engeller çıkarmaktadır. Teknolojinin en önemli girdilerinden biri olan enerji için bu durum günümüzde daha da vahim hale gelmektedir. Çevre etkileri, yüksek maliyetler, sınırlı kaynaklar enerjinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Gelişiminin henüz başında olan rüzgar enerjisi, sözü edilen bu negatif faktörlerin neredeyse hepsine yeni bir alternatif oluşturabilecek potansiyel gücü ile, dünya enerji sektörünün (uzun duyarsızlık döneminden sonra) ilgisini çekmeyi başarmıştır. Sınırsız, temiz ve milli bir kaynak olan rüzgar enerjisi son birkaç yıl içerisindeki gelişimi ile geleceğin alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir.

Yüksek lisans çalışmamda, bu konuyu seçmeme yardımcı olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli Hocam, Sayın Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN ve Sayın Prof. Dr. Bülent EKER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmamın başından itibaren her türlü konuda bana yardım eden ve her zaman yanımda olan Arş. Gör. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM'a teşekkür ediyorum.

Rüzgar türbini kanat imalatını birebir görmemi sağlayan ve tüm sorularıma samimiyetle cevap veren Aero A.Ş. mühendislerine ve uygulamalarda kullandığımız malzemelerin temin edilmesinde yardımcı olan Poliya A.Ş.'e teşekkür ederim.

Yıllarca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman bana en büyük katkıyı sağlayan anne ve babama ayrıca şu an vatani görevini yerine getirmekte olan sevgili kardeşim Yusuf UYSAL'a en içten duygularıyla teşekkür ediyorum.

ÖZET

Sınırsız ve temiz bir kaynak olan rüzgar enerjisi, son birkaç yıldaki gelişmelerinden dolayı alternatif enerji kaynakları arasında ilk sırayı almaktadır. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi amacıyla üretilen rüzgar türbinlerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarının her geçen gün artmasının yanında, rüzgar türbini kanatlarının tasarım ve malzemeleri rüzgar türbini konstrüksiyonlarında yoğun bir şekilde gerçekleştirilen araştırmaların başında gelmektedir.

Çalışmada; rüzgar türbini kanat malzemelerinin gerilme – gerinme karakteristiklerinin, mikrosertlik değerlerinin ve mikroyapıları incelemelerinin yapılması amacıyla elle yatırma yöntemi kullanılarak cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli polyester matrisli ve vinilester matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Ayrıca, profil kiriş uzunluğu 400 mm olan bir kanat modeli üretilmiştir.

Cam fiber takviyesinin arttırılmasının, hem polyester matrisli hem de vinilester matrisli kompozit malzemelerin gerilme mukavemetlerini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Vinilester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin, polyester matrisli kompozit malzemelere göre daha üstün olduğu görülmüştür. Ayrıca cam fiber keçe ve balsa takviyeli yapıların gerilme mukavemetlerinin sadece cam fiber keçe takviyeli kompozitlere göre daha düşük olmasına karşın gerinme değerlerinin oldukça yüksek olduğu da gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar türbin kanadı, cam fiber takviyeli plastik, kompozit malzeme

ABSTRACT

Wind energy, which is limitless and clean source, takes first place in alternative energy sources because of its developments last several years. Beside research and development studies of wind turbines produced to transform wind energy to electrical energy increase everyday, design and materials of wind turbine blades lead researches carried out intensively at wind turbine constructions.

In the study, stress – strain characteristics of random short glass fiber mat reinforced polyester matrix and vinylester matrix composite materials produced by using hand lay up molding method were analyzed. Besides micro hardness values and micro structure were observed. Also a blade pattern whose chord length is 400 mm was produced.

Increasing glass fiber reinforcement effected affirmatively tensile strength of polyester matrix composite materials and also vinilyester matrix composite materials. It was comprehend that mechanical properties of vinilyester matrix composite materials are better than polyester matrix composite materials. Also it was observed that stretch values of random short glass fiber mat and balsa reinforced composites were relatively higher than only random short glass fiber mat reinforced composites although tensile strength of glass fiber and balsa reinforced composites are lower than only glass fiber reinforced composites.

Keywords: Wind turbine blade, glass fiber reinforced plastic, composite material

1. GİRİŞ

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık %4-5 oranında artmaktadır. Fakat bu artışı karşılayan fosil-yakıt rezervleri ise, çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser tahminler bile, en geç 2030-2050 yılları arasında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceğini ve ihtiyacı karşılayamayacağını göstermektedir. Kömür ve doğalgaz için de benzer bir durum söz konusudur. Bu nedenle insanoğlu fosil yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır. Kendini sınırsız tekrarlayan güneş, rüzgar, su ve biyokütle vb. yenilenebilir enerji kaynakları çok kısa bir süre içinde önem kazanacaktır. Bu gerçeğin farkında olan dev petrol şirketlerinin (Agip, Shell, BP gibi) araştırma ve geliştirme çalışmaları da tamamen söz konusu teknolojileri geliştirmek üzerine yoğunlaşmaktadır. İlk yatırım maliyetinden sonra, bakım ihtiyacı sifıra yakın olan sistemlerin birim fiyatları dünya genelinde düşmeye başlamıştır. Bunun sonucunda da çok yakın bir gelecekte hem verim hem de maliyet olarak alternatif enerji kaynağı sistemleri, diğer konvansiyonel sistemler ile aynı seviyeye gelecektir (Şen).

Türkiye'nin hedefi gelecekte enerji ihtiyacını karşılamada kendi kendine yetebilmektir. Bu, şu an için ulaşılması güç bir hedeftir. Mevcut enerji üretimimizin yaklaşık olarak %69'unun dışa bağımlı kaynaklardan karşılandığı göz önüne alınırsa bu ibreyi aşağılara çekmek ülkemiz için hiç de kolay değildir. Kömür kaynaklarımızın sınırlı olduğunu da düşündüğümüzde elimizde doğal olarak alternatif enerji kaynakları kalmaktadır. Bunlar da daha çok güneş, rüzgar, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Şu andaki sanayileşme ve büyüme hızıyla enerjideki dışa bağımlılık oranımızı aşağılara çekmek için muazzam yatırımlar yapmak zorunda olduğumuz bir gerçektir. Bunu yaparken bir yandan da mevcut sistemlerimizin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Çizelge 1.1'de Türkiye'nin enerji talebinin yerli ve dışa bağımlı kaynaklar tarafından karşılanma oranları gösterilmektedir.

Çizelge 1.1 Türkiye Enerji Talebi Karşılama Oranları [4]

Yıl	Yerli Kaynaklar	Dışa Bağımlı Kaynaklar
1998	%39	%61
2000	%34	%66
2010	%29	%71
2020	%25	%75

Ülkemizde hidroelektrik santral kurulabilecek her yer değerlendirilmiş veya değerlendirilmektedir. Mevsim şartlarından etkilendiği için kesin garantili bir enerji kaynağı olarak kabul edilemez. Yine doğal gaz santrallerinin gaz sıkıntısı dışı bağımlılığın en güzel örneğidir. Nükleer enerjide ise yeterli uranyum rezervimizin olmamasından dolayı gene bağımlılığımız devam edecektir.

Geriye kalan güneş, rüzgar, jeotermal ve diğer kaynaklarla ise birdenbire bütün ülke ihtiyacına cevap vermek oldukça zor ve pahalı olacaktır. Ancak şu da bir gerçektir ki; tüm bu saydığımız enerji kaynaklarını kullandığımız, enerji çeşitliliği olan bir Türkiye yaratmalıyız. Sadece bir kaynağa yönelmek doğru olmaz. Ama ağırlığımızı temiz enerjiye ve özellikle de rüzgara yöneltmeliyiz. Daha hızlı hareket etmek ve en son teknolojiyi, mümkün olan en büyük güçteki türbinleri getirmeliyiz. Hatta bunları yerli üretme yollarını aramalıyız. Böylece hem yeni iş kolları yaratılmış olur hem de ülke parası dışarı gitmez.

Çalışmada; rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ve rüzgar türbini bileşenlerinden, rüzgar türbinlerinde kullanılan malzemelerden ve rüzgar türbini kanat profillerinden bahsedilmiştir. Ayrıca cam takviyeli plastik (GRP) malzemeden rüzgar türbini kanadının nasıl imal edildiği adım adım açıklanmıştır ve cam fiber keçe takviyeli polyester malzeme kullanılarak 400 mm profil giriş uzunluğuna sahip kanat modeli üretilmiştir. Cam fiber keçe takviyeli polyester matrisli veya vinilester matrisli kompozit malzemelerin çeşitli katlarda (1, 2 ve 3 kat olarak) ve balsa takviyeli olarak hazırlanan numunelerinin gerilme – gerinme davranışları incelenmiştir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Günümüzde, teknolojisi ve kullanımı en hızlı gelişme gösteren ve ekonomisi de konvansiyonel enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale gelen yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri rüzgar enerjisidir.

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.

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.

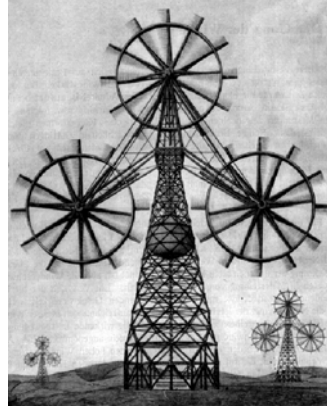
Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eden kuvvettir. Coriolis kuvveti ise, yer dönmesinin sapıtıcı kuvveti olarak bilinmektedir. Rüzgarlar, genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin neticesi olarak da, kendilerini dolanım 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 450-600 m yüksekliğe kadar rüzgarı yavaşlatmaktadır.

Havanın bu kuvvetlerin etkisi altında kalmasıyla oluşan rüzgar enerjisinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Rüzgarın gücünden yararlanılmaya başlanması çok eski dönemlere dayanır ve günümüzde de hala bu teknolojiyi geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

2.1 Rüzgar Gücü Kronolojisi

- Y M.Ö. 2800: Mısırlılar tarafından ticari amaçlı yelkenlilerde kullanılmıştır.
- Y IX. yy: Persler tarafından yel değirmeni olarak kullanılmıştır.
- Y XI. yy: Avrupa'da özellikle Hollanda'da yel değirmeni olarak kullanılmıştır.
- Y XVI. yy: Danimarka, Hollanda, Almanya'da yel değirmenlerinde kullanılmıştır.
- Y 1846-1908: Paul La Cour, ilk modern rüzgar türbinlerini tasarlamıştır.

- Y 1918: Danimarka'da toplam kurulu güç 3 MW olmuştur.
- Y 1920-1930: Danimarka'da toplam 3000 türbin bulunmaktadır.
- Y 1932: ABD'de 15 m/s rüzgar hızında 20 MW'lık bir türbin tasarlanmıştır (Şekil 2.1), tasarım sadece kağıt üzerinde kalmıştır.



Şekil 2.1 15 m/s Rüzgar Hızında 20 MW Güç Üretmek için Tasarlanan Türbin [2]

- Y 1942: Modern rüzgar teknolojisinin başlangıç tarihi.
- Y 1941-1945: Smith/Putnam tarafından 1250 kW'lık türbin ABD'de kurulmuştur. 1942 yılında bir fırtınada zarar görmüştür. 1945'de kapanmıştır.
- Y 1950: Amerika, orta batıda 50.000 küçük türbin.
- Y 1956-1957: J. Juul, Danimarka'da 200 kW'lık Gedser rüzgar türbini.
- Y 1958: Ulzich Hütter, Honnef tezine göre 10 kW'lık deniz üstü türbin Meksika Körfezi'ne bir petrol platformuna kurulmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Honnef Tezine Göre Deniz Üzerine Kurulan Rüzgar Türbini [2]

- Y 1974: İsveç'te toplam kurulu güç 1 MW olmuştur.

- Y 1980-1981: Endüstriyel ve teknolojik sıçrama ile modern türbinlerin gelişimi başlamıştır.
- Y 1985: 1000'den fazla türbinden oluşan California rüzgar çiftliği kurulmuştur.
- Y 1983-1987: Kuzey Denizi kıyısında 300 kW'lık Voith-Hütter türbini kurulmuştur.
- Y 1990: Almanya'da 4 tane MAN' in yaptığı Growian II tipi rüzgar türbini kurulmuştur.
- Y 1991: Baltık Denizi'nde Danimarka'da deniz üstüne (11x450 kW) rüzgar çiftliği kurulmuştur.
- Y 1995: 1500 kW'lık Neg Micon türbinleri tasarlanmıştır.
- Y 1996: 1500 kW ve 3650 kW'lık Vestas türbinleri tasarlanmıştır.
- Y 1997: Buzlu ve soğuk yerler için rotor kanadı siyah yapılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Siyah Kanatlı Rüzgar Türbinleri [2]

- Y 1998: 1,5 MW'lık Enercon E66 rüzgar türbinlerinden oluşan Almanya'da Avrupa'nın en büyük rüzgar çiftliği (52,5 MW) kurulmuştur.
- Y 1999-2003: 2 MW ve 3 MW çalışmaları (Tuncer).
- Y 2006: 4 MW çalışmaları.

2.2 Rüzgar Enerjisinin Avantajları

- Y Temiz, çevreyi kirletmeyen, yakıt gideri olmayan bir enerjidir,
- Y Rüzgar enerjisinde iletim masrafları yoktur. Doğadaki rüzgar direkt olarak kullanılabilir, kullanılabilmektedir,
- Y Sürekli bir enerji kaynağıdır. Dışa bağımlılığı yoktur. Sadece yerel imkanlarla enerji elde edilir,

- Y Özellikle dikkat edilecek başka bir hususta uzun dönem işletme masrafları diğer tüm enerji kaynaklarının içinde en az olanıdır,
- Y Rüzgar türbinleri karmaşık makineler değildir. Gayet basit bir şekilde operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilmektedir. Tamamen otomatik olarak çalışabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ayrıca bu şekilde sadece periyodik bakımların yapılması ile 20-30 yıla kadar çalışabilmektedir,
- Y Hava kirliliği yaratacak emisyon ve atık ısı oluşturmazlar. Rüzgar enerjisinin en büyük avantajı gerek sera etkisi gerekse de hava kirleticisinin (CO₂, SO₂, NO_x gibi) diğer yöntemlere göre az olmasıdır,
- Y Rüzgar enerjisi işgücü ve istihdam demektir, örneğin Danimarka'yı ele alırsak istihdam hacmini gayet iyi anlarız. Yeni iş kollarının yaratılması ile ekonomide canlanma meydana gelecektir. Yine New York'da yapılan bir çalışmaya göre, rüzgar enerjisinden üretilen 10 milyon kWh elektrik enerjisinin yine aynı elektrik miktarını üreten kömür santraline göre %27 daha fazla ve gene doğalgaz kombine çevrim santralinden %66 daha fazla iş imkanı sağlamaktadır (Şen ve Şahin),
- Y Artan petrol fiyatları, yeni çevre düzenlemeleri ve aniden ortaya çıkan başka maliyetleri olmadığı için vergi artırımını olarak vatandaşa yük olmaz,
- Y Çok yer kaplamazlar. Aksi gibi deniz üstü olarak denize kurulabilen cinsleri karadan yer kazanma maksadıyla kullanılabilirler,
- Y Patlama yapmazlar ve radyasyon yaymazlar. Dolayısıyla tehlikeli değildirler,
- Y Rüzgar türbinlerinin bulunduğu yerler başka amaçlara hizmet edebilirler (tarla vb. gibi). Yani, diğer santraller gibi fazla yer işgal etmezler,
- Y Enerji ücretsiz olup taşınma maliyetleri yoktur. Buna ilaveten de bir atık üretimi söz konusu değildir,
- Y Herhangi bir radyoaktif ışınım tahribatı yaratmamaktadır,
- Y Atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısı emisyonları bulunmamaktadır,
- Y Rüzgar türbinleri güvenlik açısından oldukça başarılı bir geçmişe sahiptir. Kullanım sonrasında tasfiye edilmeleri diğer enerji tesislerine göre çok kolaydır,
- Y Rüzgar bir yerli enerji kaynağıdır. Ayrıca dünya enerji pazarlarından büyük ölçüde

bağımsız olma özelliğine sahiptir,

- Y Rüzgar türbinlerinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişme kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir.
- Y Rüzgar türbinleri modüler olup herhangi büyüklükte imal edilebilmekte ve tek olarak ya da gruplar halinde kullanılabilir (Söylemez, 3).

2.3 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları

- Y Enerji üretimi rüzgara bağımlı olduğundan rüzgar kesilmesi veya azalması ile enerji kaybı oluşur,
- Y Rüzgar miktarına bağımlı bir enerji olduğu için sadece yeterli rüzgarın bulunduğu alanlarda kurulabilir,
- Y Türbin ilk yatırım maliyetleri yüksek olabilmektedir ancak gittikçe azalan bir maliyet durumu söz konusudur,
- Y Büyük döner bir makine olduğundan dolayı çevrede kuş ölümlerine neden olabilmektedir,
- Y Rüzgar türbinlerinin kurulacağı alanların durumu önemlidir. Örneğin arazinin engebeli oluşu ya da sit alanlarına yakınlığı mahzur olabilir,
- Y Rüzgar türbinlerinin meydana getirdiği ses şiddeti çevreye gürültü olarak yansır. Bu gürültü, türbinden uzaklaştıkça azalma eğilimi gösterir,
- Y Türbin kanatlarının dönüşü sırasında parça kopması çevreye tehlike arz edebilir,
- Y Türbinler; elektromanyetik dalgaları dağıtabilir veya yön değiştirebilir. Bir türbin radyo, televizyon veya mikrodalga ileticisi ile alıcısı arasına kurulduysa elektromanyetik dalgayı etkileyebilir (Söylemez, 3).

Rüzgar enerjisi sektörü yıllık toplam cirosu 2 milyar dolar olan dev bir sektör haline gelmiştir. Günümüzde kullanılan rüzgar gücü, dünyada toplam elektrik enerjisi üretiminde %'lik bir paya sahip iken, önümüzdeki dönemde bu oranın artacağı tahmin edilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın yaptığı açıklamaya göre, ABD, 2020 yılında elektrik enerjisinin % 5'ini rüzgar gücünden temin etmeyi amaçlamaktadır (Financial Times).

2.4 Dünya Kurulu Rüzgar Gücü Potansiyeli

Çizelge 2.1’de dünya rüzgar santralleri kurulu gücünün kıtalara ve ülkelere göre dağılımı verilmektedir.

Çizelge 2.1 Dünya Rüzgar Santralleri Kurulu Gücü [10, 2006]

Kıtalar / Ülkeler	2005 Ocak	2006 Ocak	Kıtalar / Ülkeler	2005 Ocak	2006 Ocak
AVRUPA	MW	MW	Teksas	1,397	1,990
Almanya	16,628	18,427	Iowa	632	834
İspanya	8,263	10,028	Minnesota	577	744
Danimarka	3,118	3,127	Oklahoma	176	474
İtalya	1,265	1,717	New Mexico	266	406
İngiltere	897	1,342	Washington	244	393
Hollanda	1,078	1,219	Oregon	261	336
Portekiz	523	1,024	Wyoming	284	288
Avusturya	607	819	Kansas	113	263
Fransa	390	770	Colorado	229	229
Yunanistan	466	573	New York	49	186
İrlanda	353	525	Montana	0	136
İsveç	442	492	Pennsylvania	128	128
Norveç	160	281	Illionis	51	107
Belçika	97	118	Kuzey Dakota	66	98
Finlandiya	82	83	Idaho	0	75
Ukrayna	57	70	Nebraska	15	74
Polonya	58	58	Batı Virginia	66	66
Lüksemburg	35	35	Wisconsin	53	53
Estonya	6	32	Güney Dakota	44	44
Çek Cumhuriyeti	17	28	Tennessee	29	29
Litvanya	26	25	Hawaii	2	11
Türkiye	20	20	Ohio	8	8
Macaristan	6	14	New Jersey	0	8

İsviçre	8	12	Vermont	6	6
Rusya	7	7	Michigan	3	3
Letonya	6	6	Alaska	1	1
Arnavutluk	6	6	Massachusetts	1	1
Slovakya	5	5	Utah	0	1
Romanya	1	1	Toplam	6,752	9,142
Bulgaristan	1	1	KANADA	MW	MW
Toplam	34,630	40,865	Kanada	444	684
Toplam AB (25 üyeli)	34,375	40,467	Toplam	444	684
AB dışı Avrupa	255	398	ASYA	MW	MW
PASİFİK BÖLGESİ	MW	MW	Hindistan	2,983	4,434
Japonya	940	1,150	Çin	764	1,260
Avustralya	380	746	Güney Kore	8	119
Yeni Zelanda	170	168	Tayvan	16	106
Filipinler	0	25	Sri Lanka	3	3
Pasifik Adaları	11	15	Bengladeş	0	1
Toplam	1,501	2,104	Toplam	3,774	5,923
ORTADOĞU VE AFRİKA	MW	MW	LATİN AMERİKA	MW	MW
Mısır	145	145	Kosta Rika	71	71
Fas	54	64	Karayipler	55	55
Tunus	20	20	Brezilya	48	48
İran	11	11	Arjantin	26	26
İsrail	8	8	Kolombiya	20	20
Fildişi	3	3	Meksika	5	5
Güney Afrika	3	3	Küba	0	5
Ürdün	2	2	Şili	2	2
Toplam	246	256	Toplam	227	232
ABD	MW	MW	DÜNYA TOPLAMI	47,574	59,206
Kaliforniya	2,051	2,150	2005 dünya artış yüzdesi	-	%24,45

Çizelge 2.2’de Türkiye’de kurulu rüzgar santralleri verilmektedir.

Çizelge 2.2 Türkiye’de Kurulu Rüzgar Santralleri [6, 2006]

Elektrik Üretimine Geçiş Tarihi	Kurulu Güç [MW]	Firma	Yer
Mevcut rüzgar santralleri	20,1		
Şubat 1998	1,5	Demirer	Çeşme-İzmir
Kasım 1998	7,2	Güçbirliği	Çeşme-İzmir
Haziran 2000	10,2	Demirer-Enercon	Bores-Çanakkale
Kasım 2003	1,2	Sunjut-Demirer	Hadımköy-İstanbul

2.5 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması

Enerji üretim metodları ve kullanılacak enerji türü karşılaştırılırken 4 farklı parametre rol oynamaktadır; kaynağın elde edilebilmesi, enerjinin kalan ömrü, maliyetler ve çevre etkisi.

Rüzgar enerjisinin, kaynağın elde edilebilirliği ve kalan ömrü açısından diğer enerji kaynakları ile karşılaştırılması Çizelge 2.3’de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi rüzgar enerjisi de diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi yerel bir enerjidir ve fosil kaynaklı enerjiler gibi belli bir ömre sahip değil, sonsuzdur.

Çizelge 2.3 Enerji Kaynaklarının Elde Edilebilirliği ve Kalan Ömürleri (Söylemez)

	Dışa Bağımlılık/Yerellik	Kalan Ömrü (Yıl)
Petrol	Dış	40-45
Kömür	Yerel/Dış	200-250
Doğalgaz	Dış	60-65
Nükleer	Dış	-
Hidrolik	Yerel	-
Güneş	Yerel	-
Jeotermal	Yerel	-
Rüzgar	Yerel	-

Rüzgar enerjisinin diğer enerji kaynaklarıyla maliyet açısından karşılaştırılmasına Çizelge 2.4’de yer verilmektedir. Burada rüzgar enerjisinin, yatırım maliyeti olarak hidrolik ve doğalgazdan sonra 3. sırada olduğu ve üretim maliyeti açısından da hidrolik, kömür ve doğalgazdan sonra jeotermal ile birlikte 4. sırada oldukları görülmektedir. Anlaşılacağı gibi rüzgar enerjisi maliyet açısından da avantajlı bir enerjidir.

Çizelge 2.4 Enerji Kaynaklarının Maliyet Açısından Karşılaştırılması (Söylemez, 2005)

	Yatırım Maliyeti (\$/kWh)	Üretim Maliyeti (cent/kWh)
Petrol	900-1100	6
Kömür	1400-1650	2.5-3
Doğalgaz	600-700	3
Nükleer	3000-4000	7.5
Hidrolik	750-1200	0.5-2
Güneş	Yüksek	10-20
Jeotermal	1500-2000	3-4
Rüzgar	1000-1200	3.5-4.5

Çizelge 2.5’de ise rüzgar enerjisinin çevreye karşı etkileri belirtilmektedir. Görüldüğü gibi rüzgar enerjisi, çevreye karşı en olumlu enerjilerden biridir. Karşılaştırılabilecek tek kayda değer olumsuzluk olarak gürültü gösterilebilmiştir (Söylemez). Ayrıca Çizelge 2.5’de kömürün de radyasyon yaydığı belirtilmektedir, bunun sebebi kömürün içerdiği radyoaktif maddelerdir.

Çizelge 2.5 Enerji Kaynaklarının Çevresel Etki Bakımından Karşılaştırılması (Söylemez)

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	+	+	+	+	+	-
Kömür	+	+	+	+	+	+
Doğalgaz	+	+	+	-	+	-
Nükleer	-	-	+	+	-	+
Hidrolik	+	-	-	-	-	-
Güneş	-	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	+	+	-	-
Rüzgar	-	-	-	-	+	-

(+: Etkili, -: Etkisiz)

2.6 Rüzgar Türbini Tesis Yeri Seçim Kriterleri

Rüzgar elektrik sistemlerinde, rüzgardan alınabilen güçten elektrikselsel güç çıkışına kadar olan tüm dönüşümün verimi %25-35 aralığındadır ve bu sistemlerde rüzgardan en fazla enerji elde etmenin ön şartı doğru tesis yerinin seçiminde yatmaktadır. Genelde rüzgar türbini tesis yeri seçiminde,

- Y Rüzgar karakteristikleri,
- Y Topografik etüd,
- Y Çevresel değerler,
- Y Verimlilik,
- Y Ekonomiklik

parametreleri ele alınmaktadır.

Bu parametrelerden rüzgar karakteristikleri, tesis yeri seçiminin ilk kriteridir ve bu karakteristikler; rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, nem, basınç, esme saat sayısı vb. değerlerdir. Bu değerlerin rüzgar türbini tesisleri açısından son derece önemli olmasından dolayı ölçümlerinde hassaslık ve dikkat gerekmektedir. Ölçümlerin, yıllarca süren araştırmalar sonucunda hazırlanan ülke rüzgar atlaslarına dayanılarak seçilen lokal bölgede en az 12 ay boyunca ve sürekli olarak yaptırılması gereği dikkate alınırsa çok küçük veri kaybının yaratacağı sorun büyük olmaktadır.

Rüzgar türbini tesisleri, karasal alanlarda denize yakın kıyılarda ya da deniz yüzeyinde kurularak verimlilik en üst seviyeye çıkarılmaya çalışılmaktadır. Ancak bu yaklaşım karasal alanların kıyıları dışında kullanılamayacağı anlamına gelmemektedir. Buna dayanılarak rüzgar türbinleri; korunaklı arazilerde, açık ovalarda, deniz kıyılarında, açık denizlerde, tepe ve bayırlarda tesis edilebilmektedir.

Günümüzde rüzgar türbinleri, yapısal ve hava içinde çalışma tekniğine bağlı olarak azda olsa gürültü oluşturmaktadırlar. Bu oluşan gürültünün kaynağı kanatlar, dişli kutuları ve jeneratör olmaktadır. Öte yandan gürültü oluşumunda, gürültü kaynağının tipi, gürültü kaynağından uzaklık, rüzgar hızı, sıcaklık, nem vb. birçok faktör etkili olmaktadır. Genelde rüzgar türbinlerinin 8 m/s rüzgar hızı koşulunda 100-106 dBA değerinde gürültü seviyesine sahip olduğu söylenebilir. Ancak türbinden 200-300 m uzaklaştıkça bu gürültü değerinin 45-50 dBA değerine düşmesinden dolayı, bu alanlar içinde insan, hayvan yaşam alanlarının bulunmamasına özen gösterilmelidir.

Ayrıca son yıllarda çevresel etki açısından rüzgar türbini tesis alanları irdelenirken, bu tesislerin bulunduğu veya yakın alanlarında yaşayan bitki, kuş vb. hayvanların rüzgar türbinlerinden etkilenme derecesi araştırılmaktadır. Genelde kuş sürülerinin geçiş yolları ile yaşadıkları alanlara rüzgar türbini yapılmaması yasal zorlamalarla sağlanmaktadır. Bunu temelinde, hem tabiat varlığı olan kuşları korumak hem de türbin güvenliğini sağlamak yatmaktadır.

Diğer taraftan rüzgar enerjisi uygulamaları ve gelişmelerin çevresel etkileri, temel olarak “arazi kullanım ilişkileri/uygunluğu” bağlamında fiziksel planlamanın bir problemi olarak ele alınabilir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin bir kara parçası üzerinde gerçekleşmesi, seçilen alanın yeni bir arazi kullanım biçimine dönüştürülmesini gerektirmektedir. Büyük alanlar gerektiren büyük ve orta ölçekli rüzgar tarlaları yaygın olarak yerleşmeler dışındaki, uzak, açık alanlarda, kırsal alanlarda yer almaktadır. Kırsal alanların seçildiği durumlarda, rüzgar türbinlerinin kurulduğu alan toplam alanın yaklaşık %2'sini kapladığından tarımsal faaliyetin devamı, arazinin ikili kullanımı sağlamaktadır.

Rüzgar santralleri tarımsal arazi kullanımı ile uygunluk gösterirken, diğer açık ve doğal alanların seçilmesi durumunda arazinin mevcut kullanımı ile çelişki gösterebilmektedir. Rüzgarın bol, hızının yeterli olduğu alanlar çoğu zaman doğal niteliği korunacak alanlar, milli parklar, özel nitelikli alanlar, arkeolojik ve tarihi alanlarla çakışmaktadır.

Topografyanın düz ve açık olduğu alanlarda türbinler basit ve kolay algılanabilir geometrik dizilimde konumlandırılmalıdır. Eğimli arazilerde ise, türbinler eğim çizgilerine paralel, doğal dokuya, yapıya uyumlu bir şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgar tarlasının büyüklüğü ve yoğunluğu seçilen alanın taşıma kapasitesine uygun olmalı ve türbinlerin kümülatif etkileri endüstriyel bir etkiden uzak olmalı, doğayla bütünleşmiş doğal bir görsel etki yaratmalıdır (Eker).

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ, BİLEŞENLERİ, ŞEBEKEYE BAĞLANMASI ve RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GELECEĞİ

Bu bölümde rüzgar türbinlerinden ve bu türbinlere ait bileşenlerden ayrıca rüzgar türbin sistemlerinin şebekeye bağlanmasında bahsedilmektedir. Son olarak da rüzgar türbinlerinin geleceği hakkındaki öngörülere yer verilmektedir.

3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

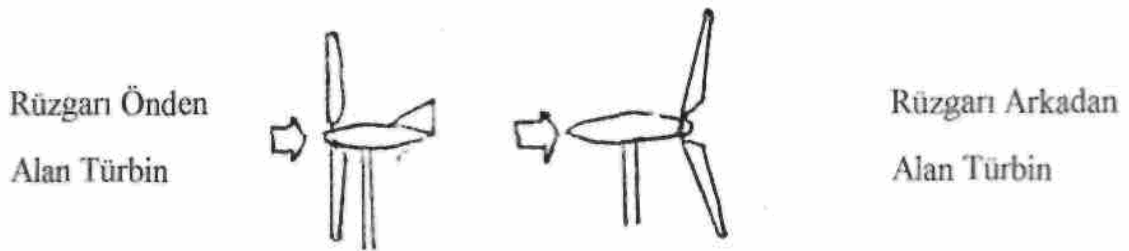
Günümüzde rüzgar türbinlerinin sınıflandırılmasında en çok kullanılan sınıflandırma biçimi, rotor ekseninin yeryüzüne göre konumunu dikkate alır. Buna göre rüzgar türbinleri;

- Y Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Y Dikey eksenli rüzgar türbinleri
- Y Eğik eksenli rüzgar türbinleri

olmak üzere üçe ayrılır.

3.1.1 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 (Şekil 3.1). Yatay eksenli türbinlerin kule üzerinde yatay eksen yönündeki hareketi, motorlar (rüzgar veya elektrik), rüzgara yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgarı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açı ile sağlanır [3].

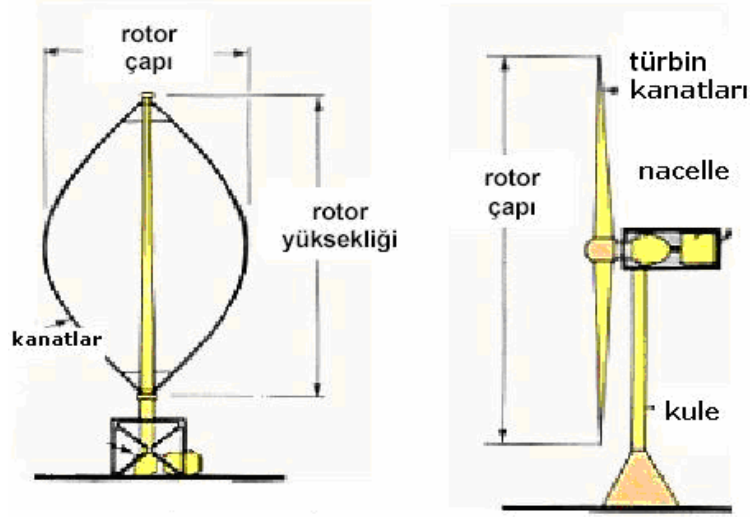


Şekil 3.1 Rüzgarı Önden ve Arkadan Alan Yatay Eksenli Türbin Tasarımları (Tümerdem)

Rüzgarı önden alan tasarımlar günümüzde daha çok kullanılmaktadır. Rüzgarı arkadan alan tasarımların yaygın bir kullanım alanları yoktur.

3.1.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşey olacak şekilde tasarlanmaktadır. Şekil 3.2’de dikey ve yatay rüzgar türbinlerinin temel elemanları gösterilmektedir. Bu türbinlerin rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğü vardır. Ayrıca bu türbinlerin bir diğer üstünlüğü ise makine aksamı, hız yükselticisi ve jeneratörün toprak üzerine konulabilmesidir. Dezavantajı ise kanatların güç üretebilmeleri için rüzgardan daha hızlı dönmeleri gerektiğinden, ilk harekete geçimlerinin güvenli olmamasıdır [3]. Şekil 3.3’de dikey eksenli rüzgar türbini çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Dikey ve Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri [3]



(a)





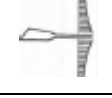

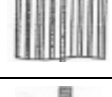
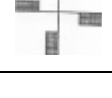
(b)

Şekil 3.3 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri a) Savonius Tipi b) Darrieus Tipi [5]

3.1.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri, düşeyle rüzgar yönünde belirli bir açı yapan türbinlerdir. Ayrıca kanatlar ve dönme eksenini arasında da belirli bir açı bulunmaktadır. Yaygın bir kullanım alanı yoktur.

Çizelge 3.1 Kullanılmakta Olan Rüzgar Türbin Tipleri ve Bunların Kullanım Yerleri (Ertürk)

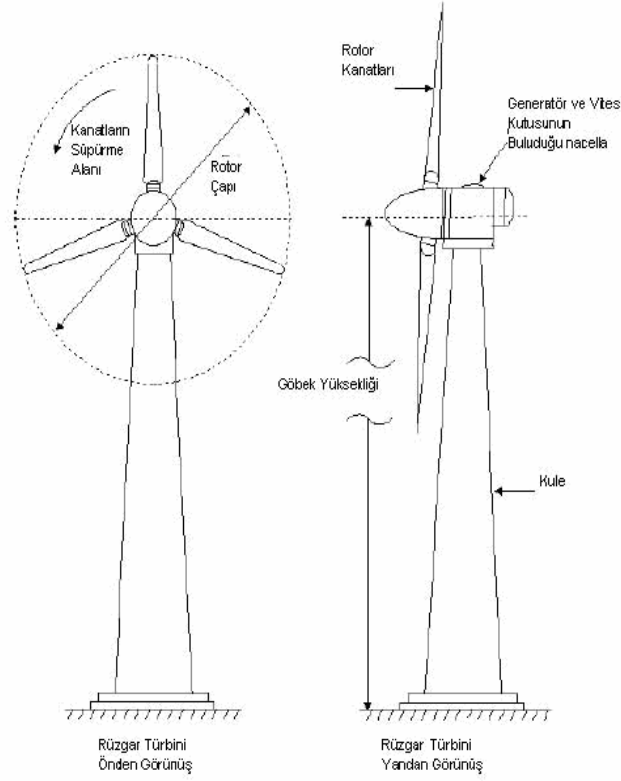
Rotor Tipi		Cp (Güç katsayısı)	Rpm	Tork	Kullanım Yeri
PERVANE TİPİ		0,42	Yüksek	Alçak	Elektrik üretimi
DARRIEUS TİPİ		0,40	Yüksek	Alçak	Elektrik üretimi
CYCLOGIRO TİPİ		0,45	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
ÇOK KANATLI TİP		0,35	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
YELKEN KANAT TİPİ		0,35	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
FAN TİPİ		0,30	Alçak	Alçak	Su pompalama
SAVONIUS TİPİ		0,15	Alçak	Yüksek	Su pompalama
HOLLANDA TİPİ		0,17	Alçak	Yüksek	Su pompalama veya değirmen

3.2 Rüzgar Türbini Bileşenleri

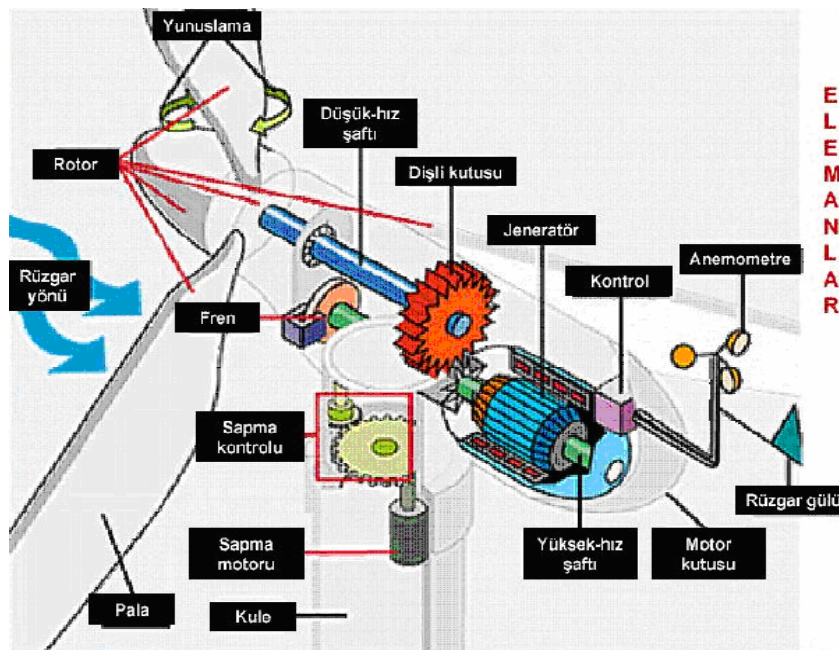
Aşağıdaki terimler genellikle bütün rüzgar türbinleri için kullanılmaktadır;

- Y Göbek yüksekliği: Göbeğin yerden yüksekliğini ifade eder.
- Y Süpürme alanı: Rotor diskinin dönerken taradığı alan olarak ifade edilir.
- Y Uç hız oranı: Kanat ucu hızının, rüzgar hızına oranıdır.
- Y 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. Bu parçalar Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de görülebilmektedir. Büyük parçalar dış muhafaza veya kaporta diyebileceğimiz kısım içerisine yerleştirilir. Söz konusu kaportanın kuleyle birleşim yerinde yaw (döndürme) sistemi mevcuttur (Dan ve McVeigh).



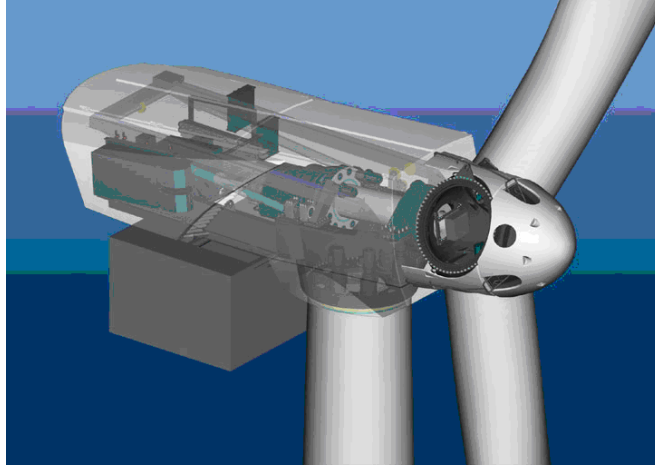
Şekil 3.4 Bir Rüzgar Türbini Önden ve Yandan Görünüşü [3]



Şekil 3.5 Motor Yuvası (Nacelle) İç Yapısı [5]

3.2.1 Rotor Kanatları

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rotorlar genellikle “pervane tipi” diye adlandırılmaktadır. Bunun sebebi uçaklarda aerodinamik ve yapısal özelliklerinin aynen uygulanabilmesidir. Bazı farklar olduğu (havayı yavaşlatması, uç hızlarının düşük olması) hiçbir zaman göz ardı edilmemelidir. Şekil 3.6’da yatay eksenli bir rüzgar türbinine ait rotor ve motor yuvası (nacelle) kısmı gösterilmektedir. Dikey eksenli rüzgar türbinleri ise çoğunlukla iki rotor kanadından oluşmaktadır.



Şekil 3.6 Rotor ve Motor Yuvası (Nacelle) [5]

Rüzgar türbinlerinde kanat sayısı arttıkça, dönüş hızı azalır. Bu dönüşün ölçüsü olarak uç hız oranı (tip speed ratio) denen bir parametre tanımlanmıştır. λ ile gösterilen bu oran, pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Eğer $\lambda=1$ ise, pervanenin dönüş hızının rüzgar hızına eşit olduğu görülür. Bu nedenle enerji üretiminde üçten fazla kanatlı sistemler kullanılmamaktadır. Kanat sayısının fazla olduğu sistemler çoğunlukla su pompalama amaçlı kullanılmaktadır.

3.2.2 Fren Sistemi

Denklem 3.1’den de görüleceği gibi,

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ , [Watt]} \quad (3.1)$$

rüzgardan elde edilecek güç rüzgar hızının küpü ile orantılı olup, özellikle yüksek hızlarda çok büyük güç elde edilir (ρ : havanın yoğunluğu, A: kanat süpürme alanı). Buradan da anlaşılacağı üzere rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde çalışması için etkili bir fren sistemi gereklidir. Rüzgar türbinlerinde bağımsız iki sistem vardır; aktif (pitch) – pasif (stall) kontrol ve mekanik fren sistemidir. Her biri de hız limitinin aşıldığı durumlarda, şebeke bağlantısının kopması ve

diğer acil durumlarda türbinleri güvenli konuma getirme özelliğine sahiptir. Mekanik frenler rotoru tamamen durdurmak için ana iletim şaftına yerleştirilmiştir. Aktif (pitch) – pasif (stall) kontrol mekanizmaları, jeneratörün rüzgardan çıkarabileceği enerjiye göre ayarlanır. Eskiden çoğu küçük ve orta büyüklükte türbinler pasif (stall) kontrol kullanırken, günümüzde rüzgar türbinleri üzerinde daha etkin bir kontrol sağlayan aktif (pitch) kontrol mekanizması kullanılmaktadır.

3.2.3 Döndürme (Yaw) Sistemi

Yatay eksenli bir rüzgar türbininde yer alan döndürme (yaw) sistemi, kanatları rüzgarın esme yönüne göre döndürerek sistemden maksimum verim elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu işlem de kulenin tepesinde yer alan döner tahrikli bir dişli çemberin devreye girmesiyle sağlanır. Bu tip türbinlerde rüzgarın esme doğrultusu rotor süpürme alanına, türbinin normal çalışması esnasında dik olmalıdır (Tümerdem).

Bazı tasarımlarda kanatların, yüksek rüzgar hızlarında döndürülmesi güç çıkışını önemli derecede azaltır ve hatta çok yüksek rüzgar hızlarının söz konusu olduğu durumlarda kanatların döndürülmesiyle sistem durabilmektedir (Walker ve Jeckins).

3.2.4 Elektronik Kontrol Ünitesi

Rüzgar türbininin durumunu sürekli izleyen ve döndürme mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar içerir. Bir arıza halinde (örneğin; dişli kutusu veya jeneratörün fazla ısınması) rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur ve internet hattı vasıtasıyla türbin operatörünün bilgisayarına uyarı verir.

3.2.5 Anemometre ve Yelkovan

Anemometre diğer bir deyişle rüzgar ölçer ve yelkovan, rüzgar hızı ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Ölçümlerde genellikle kap anemometresi (cup anemometer) kullanılır. Kap anemometresi düşey bir eksene ve 3 tane küçük fincan şeklinde kaba sahiptir ve bu kaplar ile rüzgar yakalanır. Her dakikadaki dönme devri elektronik olarak kaydedilir. Diğer anemometre türleri ultrasonik veya lazer anemometrelerdir. Mekanik anemometrelerin dezavantajı elektronik olanlara göre buzlanmaya karşı daha hassas olmalarıdır. Anemometreden gelen elektronik sinyaller, rüzgar türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgar hızı yaklaşık 5 m/s'ye yaklaştığında rüzgar türbinini çalıştırmak için kullanılır. Bilgisayar, türbini ve çevresini korumak için rüzgar hızı yaklaşık 25 m/s'yi aştığında ise türbini otomatik olarak durdurur.

Yelkovan, sinyalleri rüzgar türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgar türbinini rüzgara karşı döndürmek için kullanılır.

3.2.6 İletim Sistemi

Rotor kanatları tarafından üretilen mekaniksel güç motor yuvası (nacelle) içerisinde bulunan bir iletim sistemi vasıtasıyla jeneratöre aktarılır. Bu sistem vites kutusu, debriyaj, şaft bölümlerini içerir. Vites kutusu rotor hızını 20 dev/dak'dan 50 dev/dak'a ve birçok jeneratör tipinde kalkış için gerekli olan 1000-1500 dev/dak'a çıkartmada kullanılmaktadır. İletim sistemi rotor çıkış gücündeki dalgalanmalar nedeniyle oluşan yüksek seviyedeki dinamik yükler için tasarlanmıştır [3].

En sık kullanılan iki vites kutusu tipi; paralel mil ve büyük bir dişli çarkın içinde dönen küçük dişli vites kutularındır. Paralel mil tasarımları basittir. Ancak çıkış milleri giriş milleriyle aynı doğrultuda değildir ve oldukça ağırdır. Dişli çark vites kutuları (Şekil 3.7) daha hafif, daha düzenli ve çıkış milleri, giriş milleri ile aynı doğrultudadır. Büyük rüzgar türbinleri (rotor çapı 25 m'den büyük) için dişli çark vites kutuları ucuz ve hafif olmaktadır (Dan ve McVeigh).



Şekil 3.7 Rüzgar Türbini Dişli Kutusu [3]

Düşük hız mili, pervane göbeğini dişli kutusuna bağlayan elemandır. Modern bir 600 kW rüzgar türbininde, dişli nispeten yavaş 19-30 dev/dak, bir hızla döner. Acil mekanik freni bulunan yüksek hız mili, yaklaşık 1500 dev/dak hız ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır.

3.2.7 Jeneratörler

Rüzgar türbini jeneratörleri, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Rüzgar türbini jeneratörleri diğer tip jeneratörlere göre biraz daha farklıdır. Bunun sebeplerinden biri, jeneratörün salınımlı güç üreten rüzgar türbini rotoruyla birlikte çalışmasıdır. 100 kW veya 150 kW üstündeki büyük rüzgar türbinlerinde üretilen gerilim üç fazlı alternatif olup, genellikle 690 V değerindedir. Daha sonra rüzgar türbinin yanına veya kulenin içine monte edilmiş

transformatöre yollanır. Şebekeye bağlı olan bu transformatör yardımıyla gerilim 10 kV veya 30 kV arasında bir değere yükseltilir. Bu üreticiler 50 Hz ve 60 Hz olarak üretilebilmektedir (Dan ve McVeigh). Rüzgar türbinlerinde üç tip jeneratör kullanılmaktadır;

- Y Doğru Akım Jeneratörleri
- Y Senkron Jeneratörler (Alternatörler)
- Y Asenkron (İndüksiyon) Jeneratörler

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım jeneratörü, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmekteydiler. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü doğru akım makineleri, komütatörü elimine etmek için daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım, yarı iletken doğrultucular yardımıyla doğru akıma dönüştürülür. Fırçasız doğru akım makineleri olarak da isimlendirilen bu makineler, daimi mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar (Patel). Doğru akım jeneratörleri, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron jeneratörlere bırakmıştır. Bu jeneratörler, dönüştürücüler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar ve sabit stator ve dönen rotor olmak üzere sabit iki kısımdan oluşurlar. Her iki jeneratör tipinde de, stator benzer yapıdadır. Statorlar sabit hızda manyetik alan meydana getirirler (Tümerdem).

Orta ve büyük rüzgar türbin endüstrisinde asenkron jeneratörleri, yaygın bir şekilde kullanılmakta olup tercih edilmelerinin sebebi, emniyetli olmaları ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Rüzgar türbinlerinde, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tip asenkron jeneratör kullanılmaktadır (Patel).

Sincap kafesli asenkron makineler; fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Bu makinelerde doğrultucu, jeneratör için programlanabilir bir uyarım oluşturabilmektedir. Ayrıca çevirici, harmonik kompanzator olarak çalıştırılabilmektedir. Jeneratör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşılaştırması ve stator tarafındaki dönüştürücünün, makinenin ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır (Hansen ve arkadaşları).

3.2.8 Soğutma Ünitesi

Elektrik jeneratörünü ve dişli kutusundaki yağı soğutmak için kullanılan soğutma sistemlerini içerir.

3.2.9 Kule

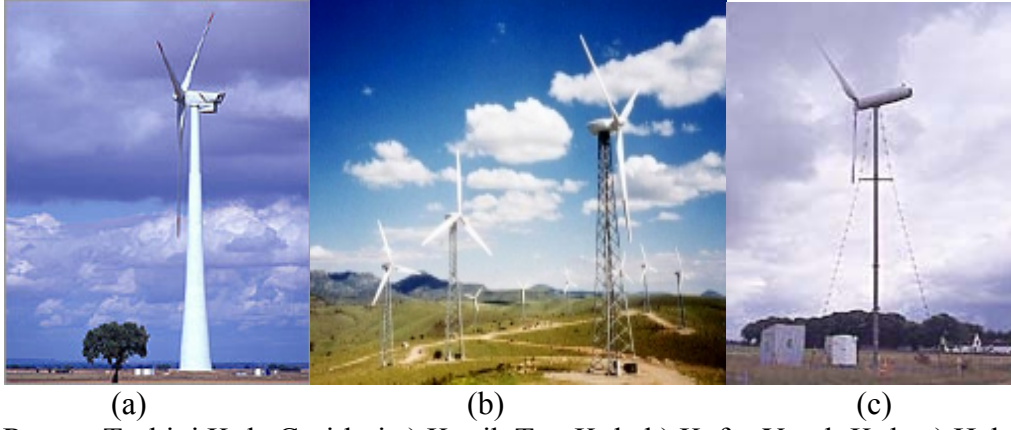
Kule, rüzgar türbinlerinde motoru yuvası (nacelle) ve rotoru taşır. Kuleler genellikle konik tüp şeklinde çelik, çelik kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Çelik halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır (Walker ve Jeckins).

Kuleyi konik şeklinde yapmak çok kolay değildir. Kuleler genellikle 20-30 m (daha uzun türbin kuleleri de bulunmaktadır) uzunluğunda üretilmektedir, kulelerin türbin yerine nakliyesi boylarındaki sınırlayıcı faktördür. Çizelge 3.2 30 m'lik kulede yüksekliğe bağlı olarak ölçülebilen parametreleri göstermektedir. Tipik olarak kule ağırlıkları ise; 44 m rotor çaplı (600 kW) 50 m kule için 40 ton, 72 m rotor çaplı (2000 kW) 60 m kule için 80 tondur. Rüzgar türbini kule kesitleri sıcak çekilmiş flanşlar kullanılarak birbirlerine bağlanmakta ve her kule kesitinin sonuna kaynak yapılmaktadır (Eker, Akdoğan ve Vardar).

Çizelge 3.2 30 m'lik Kulede Ölçüm Yüksekliklerine Göre Ölçülen Parametreler [1]

Ölçüm Yüksekliği [m]	Ölçülen Parametreler
2	Çevre sıcaklığı ve basınç
10	Rüzgar hızı
20	Rüzgar hızı
30	Rüzgar hızı ve yönü

Ayrıca konik tüp şeklinde kuleler, kötü hava koşullarında makine odasına kule içerisinden ulaşabilme imkanı vermektedir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları hafif ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük rüzgar türbini (akü şarj eden vs.) halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir. Şekil 3.8'de kule tiplerinin örneklerini görebilirsiniz [1].



Şekil 3.8 Rüzgar Türbini Kule Çeşitleri a) Konik Tüp Kule b) Kafes Yapılı Kule c) Halat Destekli Kule [3]

Kule tasarlanırken rüzgarın neden olduğu kuvvetler ve yer çekimi kuvvetleri dikkate alınmalıdır. Motor kutusu, kulenin en üstünde ve döndürme (yaw) sistemi ise motor yuvası (nacelle) ile kule arasında yer alır [3].

3.3 Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde etkin olarak güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır. Bu tür devreler üretilen enerjinin istenen forma çevrilmesinde ve amaçlanan kontrol mantığının gerçekleştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı esas alındığında çalışma prensiplerine göre üç gruba ayrılabilir;

1. Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri
2. Değişken hız sabit frekans dönüşüm sistemleri
3. Değişken hız değişken frekans dönüşüm sistemleri

Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemlerinde, rüzgar türbininin mili jeneratöre, jeneratör stator kutupları ise bağlayıcı sisteme doğrudan bağlanmaktadır. Jeneratör olarak senkron jeneratör veya asenkron jeneratör kullanılmaktadır.

Değişken hız sabit frekans sistemleri ile, rüzgar hızının değiştiği durumlarda rüzgar türbininden maksimum güç elde etmek için uç hız oranı kanat aralık açısı değiştirilerek optimum bir değerde tutulmak suretiyle rüzgardan elde edilecek gücün maksimum transferi sağlanabilir. Burada jeneratör çıkışı değişken gerilim ve frekansta olduğundan bağlayıcı şebekeye direkt bağlanamaz. Jeneratör çıkışlarını şebeke gerilim ve frekansı ile uyumlandırmak için bir AA – DA – AA çevirici yardımıyla üretilen enerji önce DA daha sonra da AA forma çevrilebilir.

Değişken hız değişken frekans dönüşüm sistemleri, üretilen enerjinin bağlayıcı şebekeye bağlanması zorunluluğu olmayan otonom sistemlerde kullanılır. Bu tür sistemlerde genel olarak kapasitör yardımıyla kendinden uyarımlı asenkron jeneratörler, alan sargılı senkron jeneratörler veya sabit mıknatıslı alternatörler kullanılır [3].

3.4 Rüzgar Türbinlerinde Güç – Hız İlişkisi

Belirli bir alan içerisinde akan havanın kinetik enerjisinden üç kanatlı rüzgar türbini aracılığıyla dönen mile aktarılacak gücün ve torkun eşitlikleri denklem 3.2 ve 3.3’de verilmektedir:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A V^3, \text{ [Watt]} \quad (3.2)$$

Burada; ρ havanın yoğunluğu, A süpürme alanı, V rüzgar hızı ve C_p rüzgar türbinin güç katsayısı olup maksimum değeri %59,3’dür.

$$T = 0.5 \frac{C_p(q, \lambda)}{\lambda} \rho \pi r^3 V^2, \text{ [N.m]} \quad (3.3)$$

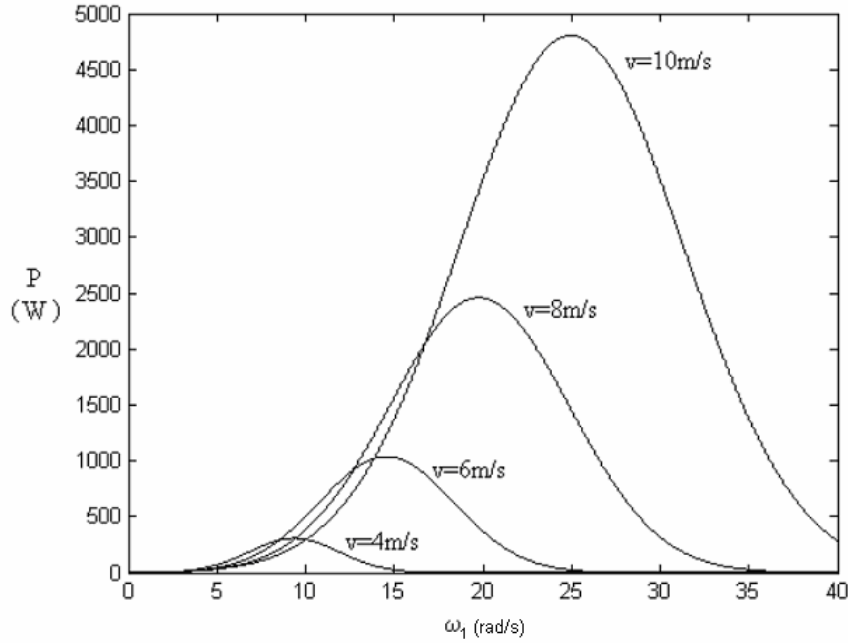
Burada; r türbin yarıçapıdır.

Rüzgar türbininin güç katsayısı (C_p), uç hız oranı (λ) ve kanat açısının (q) bir fonksiyonudur ve buna bağlı olarak türbinin çalışma koşulları rüzgardan elde edilecek güç miktarını belirler. Rüzgar türbinlerinin genel karakteristikleri göz önüne alındığında, sabit kanat açılı bir türbinin güç katsayısı ile uç hız oranı arasındaki ilişki aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$C_p = E e^{-B(\lambda-C)^2} \quad (3.4)$$

Bu denklemde E maksimum güç katsayısını ($C_{p,max}$), B eğrinin biçimini ve C ise türbinin maksimum güç noktasına ($P_{t,max}$) karşılık gelen optimum uç hız oranını ifade etmektedir. Eğer rüzgar türbininin $C_p - \lambda$ karakteristiği biliniyorsa, bu karakteristik türbin modelinde doğrudan kullanılabilir veya denklem parametreleri en küçük kareler yöntemi gibi eğri uydurma yöntemi yaklaşımıyla bulunabilir.

Örneğin, 8 m/s rüzgar hızında rüzgar türbininin en çok $P_{t_max}=2.5$ kW gücü mile aktaracağı varsayıldığında, $\rho=1.223$ kg/m³ ve $r=2.5$ m alındığında denklem 3.5'deki katsayılar $E=0.4$, $B=0.2$, $C=6.5$ seçilebilir ve Şekil 3.9'da verilen türbinin güç – hız karakteristiği elde edilebilir. Rüzgar hızının değişik değerleri için güç – mil hızı eğrileri denklem 3.2 kullanılarak türetilir. Bu eğrilerin türetilmesinde $C_p - \lambda$ karakteristiğinin tüm rüzgar hızlarında korunduğu varsayımı yapılmaktadır [3].



Şekil 3.9 Türbin Güç – Hız ($P - \omega_1$) Karakteristiği [3]

Çizelge 3.3'de ise, rotor kanatları cam fiber takviyeli plastikten (GRP) imal edilen Enercon rüzgar türbinleri için, rotor çaplarına göre hangi rüzgar hızında, ne kadar güç elde edilebileceğini gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Rüzgar Türbinlerinde Rotor Çapına Göre Rüzgar Hızı – Güç İlişkisi (Enercon Wind Turbines Product Overview)

Rotor Çapı [m]	33.4		44		48		52.9		71		82	
Rüzgar Hızı [m/s]	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p	Güç [kW]	Güç Katsayısı, C_p
1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
2	0.0	0.0	1.4	0.19	2.0	0.23	2.0	0.19	2.0	0.10	3.0	0.12
3	5.0	0.35	8.0	0.32	12.0	0.40	14.0	0.39	18.0	0.27	25.0	0.29
4	13.7	0.40	24.5	0.41	32.0	0.45	38.0	0.44	56.0	0.36	82.0	0.40
5	30.0	0.45	53.0	0.46	66.0	0.48	77.0	0.46	127.0	0.42	321.0	0.43
6	55.0	0.47	96.0	0.48	120.0	0.50	141.0	0.48	240.0	0.46	532.0	0.46
7	92.0	0.50	156.0	0.49	191.0	0.50	228.0	0.49	400.0	0.48	815.0	0.48
8	138.0	0.50	238.0	0.50	284.0	0.50	336.0	0.49	626.0	0.50	1180.0	0.49
9	196.0	0.50	340.0	0.50	405.0	0.50	480.0	0.49	892.0	0.50	1612.0	0.50
10	250.0	0.47	466.0	0.50	555.0	0.50	645.0	0.48	1223.0	0.50	1890.0	0.50
11	292.8	0.41	600.0	0.48	671.0	0.45	744.0	0.42	1590.0	0.49	2000.0	0.44
12	320.0	0.35	710.0	0.44	750.0	0.39	780.0	0.34	1900.0	0.45	2050.0	0.36
13	335.0	0.28	790.0	0.39	790.0	0.32	810.0	0.27	2080.0	0.39	2050.0	0.29
14	335.0	0.23	850.0	0.33	810.0	0.27	810.0	0.22	2230.0	0.34	2050.0	0.23
15	335.0	0.18	905.0	0.28	810.0	0.22	810.0	0.18	2300.0	0.28	2050.0	0.19
16	335.0	0.15	910.0	0.24	810.0	0.18	810.0	0.15	2310.0	0.23	2050.0	0.15
17	335.0	0.13	910.0	0.20	810.0	0.15	810.0	0.12	2310.0	0.19	2050.0	0.13
18	335.0	0.11	910.0	0.17	810.0	0.13	810.0	0.10	2310.0	0.16	2050.0	0.11
19	335.0	0.09	910.0	0.14	810.0	0.11	810.0	0.09	2310.0	0.14	2050.0	0.09
20	335.0	0.08	910.0	0.12	810.0	0.09	810.0	0.08	2310.0	0.12	2050.0	0.08
21	335.0	0.07	910.0	0.11	810.0	0.08	810.0	0.06	2310.0	0.10	2050.0	0.07
22	335.0	0.06	910.0	0.09	810.0	0.07	810.0	0.06	2310.0	0.09	2050.0	0.06
23	335.0	0.05	910.0	0.08	810.0	0.06	810.0	0.05	2310.0	0.08	2050.0	0.05
24	335.0	0.05	910.0	0.07	810.0	0.05	810.0	0.04	2310.0	0.07	2050.0	0.05
25	335.0	0.04	910.0	0.06	810.0	0.05	810.0	0.04	2310.0	0.06	2050.0	0.04

3.5 Rüzgar Türbinlerinin Ömrü

Eğer bir otomobil ortalama 80-90 km/h'lik bir hızda yaklaşık 150-200 bin km yol yaparsa, bu yolu almak için geçen süre yaklaşık olarak 2000 saat olacaktır. Ortalama hız düşük ise, bu süre 3000 saati bulacaktır. Rüzgar türbinlerinin yılın 8760 saati çalıştığı düşünülürse 150000 km yol yapan aracın parçalarının değiştirilmesinde olduğu gibi bir değiştirme rüzgar türbininde de olacaktır. Günümüzde 15-16 yıldan daha fazla çalışan türbin olmadığı için kesin bir ömür verilmemekle birlikte, beklenen türbin ömrünün 20-30 yıl olabileceği söylenebilir. Dünya da bu gün için yaklaşık 30000 türbinin çalıştığı bilinmektedir. Günümüzde yaygın kullanılan rüzgar türbinleri yaklaşık 3-5 m/s'de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15 m/s'de ulaşır ve yaklaşık 25 m/s'de ise çalışmaz. Kanatlar dakikada yaklaşık 15-50 kez döner, ancak değişken kanat hızlı türbin çeşitlerinin sayısı giderek artmaktadır [6].

3.6 Rüzgar Türbinlerinin Bakımı

Modern rüzgar türbinleri 20 yıllık ömürlerinde 120000 saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobilin 4000-6000 saat çalışma aralığından çok daha fazladır. Danimarka'da 1975'den beri kullanılan 4400 türbin üzerinde yapılan çalışmalar, yeni üretim türbinlerinin bakım ve onarım maliyetlerinin eski üretim türbinlerinin bakım ve onarım maliyetlerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir. Eski Danimarka türbinlerinin yıllık bakım maliyetleri, türbin yatırım maliyetlerinin %3 dolayındadır. Yeni üretim türbinlerinde ise bu oran, yatırım maliyetlerinin %1.5-2'si dolayındadır. Tek başına kurulan bir türbinin bakım maliyeti, bir rüzgar parkındaki türbinlerden birinin bakım maliyetinden daha pahalıdır. Bazı rüzgar türbini parçaları bozulmaya ve değiştirilmeye, diğerlerinden daha çok maruz kalır. Bunlar özellikle rotor kanatları ve vites kutusu olarak görülür. Özellikle kanatlar, vites kutusu veya üreteç türbin fiyatının %15-20 arasında değişen kısmını oluşturur. Türbinlerin 20 yıllık tasarım ömrü üreticiler tarafından belirtilmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbin kalitesine hem de yerel iklim koşullarına bağlıdır. Örneğin, türbinin konulduğu yerdeki türbülans değeri gerçek ömrü önemli oranda belirleyen değişkendir [6].

3.7 Rüzgar Türbinlerinin Geleceği

Endüstrideki uzmanlar, rüzgar türbinlerinde özellikle şu alanlarda gelişmeler öngörmektedirler;

- Y Daha verimli tasarım ve üretim; aerodinamik tasarım, gelişmiş yük ve dayanım güvenliği, yüksek dayanımlı ve sönümlü malzemelerin kullanımı, gelişmiş üretim teknolojileri, yeni konseptlerin oluşturulması, gelişmiş kanat tasarımı ve bakım-onarım masraflarının azaltılması
- Y Türbülans altında yüklerin durumunu ve yapısını daha iyi, türbin ömrüne etkisini kavrayabilmek
- Y Sistem model ve simülasyonlarını geliştirmek
- Y Entegre jeneratör ve güç elektroniği sayesinde mekanik dişli kutularından kurtulmak
- Y Verimli ve düşük maliyetli enerji depolamak
- Y Daha iyi rüzgar hızı karakter analizi yapmak (Söylemez).

4. RÜZGAR TÜRBİNİ KONSTRÜKSİYONLARINDA KULLANILAN MALZEMELER

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.

Türbin malzemelerindeki ekonomik ve teknolojik gelişimlerle beraber büyük rüzgar türbinlerinin kullanımı geniş oranda artmakta ve artmaya devam etmektedir (Eker, Akdoğan ve Vardar). Küçük ve büyük türbinler arasında, kullanılan malzemeler açısından farklılıklar vardır. Ayrıca yeni malzeme teknolojileri ve üretim yöntemlerinde yapılan çalışmalarla dizayn değişiklikleri tasarlanmaktadır. Çizelge 4.1'de küçük ve büyük rüzgar türbinlerinde kullanılan malzemeler gösterilmektedir (Dan ve McVeigh).

Çizelge 4.1 Rüzgar Türbini Bileşenlerinde Kullanılan Malzemelerin Yüzde Oranı (Dan ve McVeigh, 2001)

Büyük Türbinler ve (Küçük Türbinler ¹)									
Bileşen/Malzeme		Daimi manyetik malzemeler	Ön gerilmeli beton	Çelik	Alüminyum	Bakır	Cam takviyeli plastik ⁴	Ahşap epoksi ⁴	Karbon fiber takviyeli plastik ⁴
Rotor	Göbek	-	-	(95) - 100	(5)	-	-	-	-
	Kanatlar	-	-	5	-	-	95	(95)	(95)
Motor Yuvası ² (Nacelle)		(17)	-	(65) - 80	3 - 4	14	1 - (2)	-	-
	Dişli Kutusu ³	-	-	98 - (100)	(0) - 2	(<1) - 2	-	-	-
	Jeneratör	(50)	-	(20) - 65	-	(30) - 35	-	-	-
	Şasi, Mekanizma ve Dış Kaplama	-	-	85 - (74)	9 - (50)	4 - (12)	3 - (5)	-	-
Kule		-	2	98	(2)	-	-	-	-

Notlar:

1. Küçük türbinler olarak 100 kW'dan daha az güçlü türbinler kabul edilmiştir ve parantez içindeki değerler küçük türbinlere aittir.
2. Motor yuvası (nacelle)'nin 1/3'ü dişli kutusu, 1/3'ü jeneratör ve 1/3 şasi ve mekanizma olduğu kabul edilmektedir.
3. Yaklaşık olarak küçük türbinlerin yarısı dişli kutusu olmayan direkt tahrikli sistemlerdir.
4. Rotor kanatları cam takviyeli plastik, ahşap epoksi veya karbon fiber takviyeli plastikten yapılmaktadır.

Küçük ve büyük türbinler arasındaki üretim ve tasarım eğilimleri farklıdır. Küçük türbinlerin yapımında, maliyeti azaltmak için daha hafif döküm malzemeler tercih edilir. Küçük türbinlerde birçok parçada basınçlı alüminyum döküm, büyük türbinlerde ise, dayanım ve yapısal yorulma nedeniyle, çelik dökümler veya dövme malzemeler kullanılmaktadır. Ancak büyük türbinlerde, özellikle kanat gövdesinin üretiminde, döküm boyutu çeşitli zorluklara neden olmaktadır (Dan ve McVeigh).

Rüzgar türbini konstrüksiyonlarında yeterince dikkate alınmadığı takdirde sonuçlarının çok ağır olabileceği unsur, en fazla dayanımın gerektiği eleman olan rotorun üretimidir. Yüksek rüzgar hızlarında türbin kulesinde ve özellikle kanatlarda mukavemet problemleri ortaya çıkmakta, sonuç olarak türbin elemanlarının deformasyonu hatta kırılması söz konusu olabilmektedir. Kuleyi zorlayan yük, kule ve özellikle rotora etki eden rüzgar kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Kanatlara ise, hem rüzgar kuvveti hem de kanatların dönmesinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin teğetsel ve normal bileşenleri etki etmektedir. Bu kuvvetler, kule ve kanatlarda eğilme gerilmeleri ile normal gerilmeler oluşturmakta, bu gerilmelerin kullanılan malzemeye özgü güvenli gerilme sınırını aşması durumunda da kırılma oluşmaktadır (Onat, Kepeçler ve Orgül).

Malzeme teknolojisindeki hızlı ilerlemeler rüzgar türbini yapısında bazı değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişiklikler, rüzgar türbin maliyetinin azaltılmasını olumlu yönde etkilemektedir. Mekanik donanım, kırılma tokluğu, rijitlik, ağırlık ve görünüş gibi birçok faktörün rüzgar türbini malzemelerinde etkileri vardır. Ancak tasarımı ve rüzgar türbininin çalışmasını etkileyen başlıca problem yorulmadır. Birçok bileşenin ömrü, yüksek dönüş sayılarından dolayı kademeli olarak azalmaktadır. Türbin kanatları en fazla yorulmanın görüldüğü (%50) parçalardır (Eker, Akdoğan ve Vardar, 2006). Malzemelerin yorulma özellikleri, rüzgar türbini tasarım ve malzeme seçiminde önemli bir yer tutmaktadır. Rüzgar türbininin tahmin edilen 30 yıllık ömrü süresince, bileşenlerin çoğu 4×10^8 yorulma gerilim çevrimlerine dayanabilmelidir. Bu yüksek yorulma direnci havacılık, otomotiv, köprü ve diğer birçok insan yapımı yapıların dayanması gereken değerlerden daha fazladır (Dan ve McVeigh). Rüzgar türbinleri, genellikle rotor ağırlık kontrolü, uzun hizmet ömrü, sistem dizaynının ana hatları ve maliyet karakterlerinin yarısına performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde dizayn edilirler. Diğer tüm koşulların eşit olduğu durumda ağırlığı en az tutan dizayn kriteri en uygun dizayn olacaktır. Buna göre uygun özelliklere sahip

hafif malzemeler en iyi verimi sağlayacaktır. (Vardar ve Eker).

1994 yılından beri dünya çapında rüzgar türbinlerinin malzeme ve tasarımındaki gelişmeler her yıl ortalama %30 oranında artmaktadır (Dan ve McVeigh). Kompozit malzemelerin özellikle büyük rüzgar türbinlerinde kullanılması ile enerji üretim maliyeti aşağıya çekilmiştir. Günümüzde bu değer 1980'li yıllara oranla kWh başına neredeyse %90'lar düzeyindedir. Bunun anlamı 1980'lerde kWh maliyet değeri 40 US cent iken bugün bu değer 3,5-4 US cent'e düşürülmüştür. 2020'li yıllarda bu değer 2,25 US cent'e kadar düşürülmesi beklenmektedir.

Kompozit malzemeler sadece konstrüksiyon ve maliyet açısından değil; aynı zamanda rotoru oluşturan kanatların süpürdüğü alandan elde edilen enerjinin verimsel değerinin artması açısından da önemlidir. Hatta, başta Avrupa olmak üzere deniz üzerine yerleştirilen rüzgar türbinlerinin yaygınlaşarak adeta deniz üstünde rüzgar türbini tarlalarının oluşumunda kompozit malzemelerin etkisi büyük olmuştur.

Öte yandan rüzgar türbinlerinin aerodinamik açıdan değerlendirilmesi yapıldığında, sistemin optimizasyonu için örneğin 600 kW'lık bir türbin için 19-30 dev/dak'lık bir devir yanında merkez noktada 15 m/s varan bir rüzgar hızının olması gerekmektedir. Ayrıca fırtına gibi yüksek hız koşullarında ya da rüzgar hızının olmadığı koşullarda sistemin kararlılığını sağlayabilmesi gerekir. Şüphesiz bu değerlere ve koşullara ulaşabilmek ve çalışmasını devam ettirebilmek için rotoru oluşturan kanatların uygun tasarımı yanında, uygun malzemenin de düşünülmesi zorunludur. Malzeme seçiminde sadece yoğunluğun düşük olması, uygun maliyet vb. konularına değil, malzemenin değişken koşullara uyum göstermesine de dikkat edilmelidir.

Tüm bu yaklaşımlar sayesinde rüzgar türbinlerinde kompozit malzemelerin kullanılmasına odaklanılmış ve böylece kompozit malzemenin kullanımının yaygınlaşması ile rüzgar enerjisinden daha fazla faydalanılabileceği görülmüştür. Yine yapılan çalışmalarda bu malzemenin kullanıldığı sadece rotor sistemi kanat yapılarında bir yıl içinde 3000 saati aşan değerlerde bakıma gereksinim kalmadan sistemin verimli bir şekilde çalıştığı saptanmıştır. Ayrıca yüksek dönüş hızlarında, rotorun türbin jeneratörüne yaptığı etkinin de zarar vermeyecek düzeye indiği görülmüştür. Hatta gücün bilgisayar kontrolü ile düzenlenmesi sistem kararlılığını sağlamıştır.

Günümüzde bazı uygulamalarda her kanadın ayrı ayrı frenlenebilir oluşuyla da zarar görme riski en aza indirilmiştir. Yine yapılan çalışmalarda kompozit malzeme kullanımıyla rüzgar türbinlerinde ideal aerodinamik yapının gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca rüzgar türbini üretiminde dünya çapındaki büyük imalatçılar artık kompozit malzemeleri kullanmaktadırlar (Vardar ve Eker).

4.1 Kompozit Malzemeler

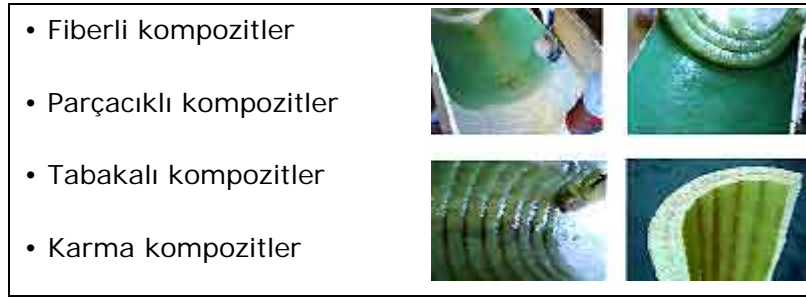
Kompozit malzemeler; yeni bulunan bir malzeme olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle farklı özelliklere sahip malzemelerin değişik şekillerde (taneli, lifli, tabakalı vb.) birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Tanım olarak iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde bileşimi olarak söylenebilir. 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 (Akdoğan ve Eker).

Lifli kompozit malzemeler, ilk kez M.Ö. 4000 civarında Mısır'da papirustan kat kat yazı malzemeleri yapımında kullanılmıştır. Papirustan kesilenler, ilk Mısırlılar tarafından bot, sal, boru, sepet yapmak için de kullanılmıştır ve papirus parşömen günümüzde hala kullanılmaktadır. M.Ö. 1300 civarında saman, çamur tuğlalar için takviye malzeme olarak tercih edilmiştir ve bugün hala kullanımını sürdürmektedir. Ayrıca antik Mısırlılar ısıyla yumuşatılmış camdan çekilen kaba fiberlerden büyük kaplar yapmışlardır. Böylece, Mısırlılar tarafından üretilen ilk kompozit uygulamalarından 20. yüzyılın ikinci yarısındaki ileri kompozit malzemelerle tanışılmasına kadar yaklaşık 6000 yıl geçmiştir (Herakovich).

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 dezavantajıdır.

Kompozitlerin yapılarındaki malzemelerin formuna göre Şekil 4.1'deki gibi gruplama yapılabilir (Vardar ve Eker);



Şekil 4.1 Yapılarındaki Malzeme Formuna Göre Kompozit Malzemeler (Vardar ve Eker)

Fiberli kompozit tipi, fiberlerin matris yapısında yer almasıyla meydana gelmiştir. Çünkü fiberlerin matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun fiberlerin matris içinde birbirine paralellığı ile yüksek mukavemet sağlanırken, fiberlere dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanabilmektedir.

Parçacıklı kompozitler, bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip, plastik matris içinde yer alan metal parçacıklarıdır.

Tabakalı kompozitler, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiplerdir. Farklı fiber yönlemelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir; bu malzemeler ısıya ve neme dayanıklı yapılardır, metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli malzemelerdir.

Karma kompozitler, aynı yapıda iki veya daha fazla fiber çeşidinin bulunması sonucu oluşmaktadır. Hibrid kompozitler olarak da adlandırılan bu malzemeler, iki farklı fiberin devrede olması ve maliyet düşüklüğünün yanında, malzeme özelliklerinin iyileşmesini de sağlamaktadırlar.

Öte yandan kompozit tasarımında, iki önemli unsur vardır. Bunlardan birincisi, matristeki fiberin yönelme doğrultusudur. İkincisi ise malzeme dizaynında, aerodinamik koşulların göz önünde bulundurulması zorunluluğudur. Bu koşullar gerçekleştiğinde; kompozit malzemelerin imalata uygunluğu, bakım maliyetinin düşük olması ve mekanik özelliklerinin iyi olması türbin tasarımında büyük avantajlar sağlayacaktır (Vardar ve Eker).

4.1.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

İleri kompozit malzemelerin ilk gelişimi ve uygulaması, daha hafif yapıların elde edilmesine olanak sağlayabilme potansiyeline sahip olmasından dolayı gerçekleştirilmiştir. 1960'ların başında ilk uygulamaları hafifliğin, yakıt tüketimini, performansı ve taşınan yükü kritik olarak etkilediği havacılık yapılarında ve daha hafif olmalarının, performansın geliştirilmesini sağlandığı spor ekipmanlarında kullanımıdır. Bugün lifli kompozitler, tasarımcılar tarafından çeşitli nedenlerden dolayı tercih edilmektedirler. Bu nedenler arasında; hafiflik, sağlamlık, yüksek dayanım, elektriksel yalıtkanlık (veya iletkenlik), düşük termal genleşme, düşük veya yüksek ısı transferi, korozyon direnci, daha uzun yorulma süresi, optimal tasarım, düşük bakım, tam doğrulukta (ölçüsel) üretim ve yüksek işleme sıcaklığında şeklin bozulmama özellikleri olarak sıralanabilir.

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

✈ **Optimal Tasarım:** Üretilen kompozit malzemeler, her uygulamanın belirli taleplerini karşılamak için projelendirilebilirler. Mümkün tasarım seçenekleri; malzeme (fiber ve matris), işleme yöntemi ve tabaka tipi (tek yönlü veya dokuma) seçimini, tabaka konumlarının, verilen doğrultudaki tabaka sayısının ve tabakaların kalınlığının değiştirilmesini içermektedir. Kompozitler için tasarım değişikliklerinin bu geniş aralığı, geleneksel mühendislik malzemelerine göre zıt bir durumdur. Bu malzemelerin tasarımlarındaki bu geniş çeşitlilik, daha az malzemenin artık olarak atılmasıyla üretilen verimli yapıların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca çeşitlilikteki bu büyük imkan, kompozit yapıların üretilmesinde bilgisayarlar, optimizasyon, uzman sistemler ve yapay zeka kullanılmasını ve tasarımların geliştirilmesini sağlamaktadır.

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

✈ **Ölçüsel Kararlılık:** Hemen hemen tüm yapılar, kullanım süreleri boyunca sıcaklık değişikliklerine maruz kalmaktadır. Sıcaklık değişimiyle ilgili gerilmeler, boyut veya şekilde değişikliklerle, sürtünmenin artmasıyla ve termal gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı uygulamalarda bu termal etkiler kritik olabilmektedir. Hareketli parçalar (örneğin, motorda) arasında

sürtünmenin artması, aşırı ısınmadan dolayı hatalara neden olabilir. Uydulardaki küçük şekil değişiklikleri işlev görmemesine yol açabilmektedir. Karayolları ve çatı sistemlerinde de ısıl genleşme hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıfır veya sıfıra yakın ısıl genleşme katsayısına sahip malzemelerin kullanılmasının gerekli olduğu birçok uygulama vardır. Uygun tasarım sayesinde, sıfır ısıl genleşme katsayısına sahip kompozit malzemeler elde etmek veya termal gerilimi ve uygunsuzluğu minimuma indirmek amacıyla diğer bileşenlerin ısıl genleşme katsayısı ile eşleştirmek için kompozitin ısıl genleşme katsayısını dizayn etmek mümkündür.

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

✧ **Etkin Üretim:** Kompozit yapılar; filaman sargısı, püskürtme ve şerit katman gibi otomatikleştirilmiş metodların kullanılmasıyla etkili bir şekilde üretilmektedir. Üretimindeki 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 elektriksek 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 kullanılmama çalışmaları devam etmektedir.

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

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

4.1.2 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Reçineler

Kompozit malzemelerde kullanılan reçineler, mekaniksel yüklemelerin fiberlere iletilmesi ve dış ortamdan malzemeyi koruma işlevlerini yerine getirirler ve bu yüzden esnek olmalıdırlar, fiberlerle uyum göstermelidirler. Ek olarak, reçineler kompozit malzemenin kendine özgü yüksek mekaniksel karakteristiklerini etkilememek için düşük yoğunluğa sahip olmalıdırlar. Bunları hesaba katarak kullanılan reçineler; kalıp ayırıcı maddeler, dengeleyiciler, pigmentler vb. farklı takviyelerle değiştirilmiş polimerlerdir. Polimer reçineler, termoplastik ve termoset reçineler gibi iki büyük aileye sahiptir.

Termoplastik ve termoset reçineler, tamamlanmış ürün ya da formu değiştirilebilen yarı tamamlanmış ürün sağlamak için üretilebilme veya kalıplanabilme özelliğine sahiptir. Termoplastik reçineler, düşük maliyetlerinden dolayı yüksek tonajlarda üretilirler ve ardışık olarak birkaç kez ısıtılabilme ve yeniden soğutulabilme özelliğine sahiptirler. Bu yüzden, bu reçinelerin kolaylıkla geri dönüşümü sağlanabilmektedir. Aksine termoset reçineler, sadece bir kez işlenebilirler ve geometrik yapısına ulaştıktan sonra sadece termal enerjinin yoğun bir şekilde uygulanmasıyla imha edilebilirler. Termoset reçineler, oldukça iyi mekaniksel ve termoplastik reçinelerden daha yüksek termomekaniksel özelliklere sahiptirler (Berthelot). Sonuç olarak, termoset reçineler, uygulamada, rüzgar türbini rotor kanatlarının üretiminde matris malzemesi olarak kullanılırlar. Fakat termoplastiklerin karakteristiklerindeki gelişmeler, diğer uygulamalarda tercih edilmelerinde artışa neden olmaktadır.

4.1.2.1 Termoset Reçineler

Çeşitleri;

✚ **Doymamış polyester reçineler;** yoğunlaştırılmış polyesterler, vinilesterler, alil (doymamış tek değerli hidrokarbon kökü) türevleri vs...

✚ **Yoğunlaştırıcı reçineler;** Fenolik (karbolik asit veya hidroksil benzen de denilen, çok yönlü organik bir bileşik) reçineler, aminoplast (yapma zambak) reçineler, furan (renksiz, uçucu, yanıcı, zehirli ve kanserojen organik bir bileşiktir) reçineler vs...

✧ **Epoksi reçineler;** mükemmel mekaniksel karakteristikli, yüksek maliyetli reçinelerdir.

Bu reçine çeşitlerinden rüzgar türbini rotor kanatlarında en çok tercih edilenler, doymamış polyester reçineler ve epoksi reçinelerdir. Profil kiriş uzunluğu 3 m'e kadar olan türbin kanatlarında polyester reçineler matris malzemesi olarak seçilirken, 3 m'den sonra vinilester veya epoksi reçineler matris malzemesi olarak seçilmektedir.

4.1.2.1.1 Doymamış Polyester Reçineler

Kompozit malzemelerin üretiminde tüm reçineler içinde en yaygın kullanım alanı bulan reçine çeşidi doymamış polyester reçinelerdir. Polyester reçinelerdeki gelişmeler;

- ✧ Düşük üretim maliyeti,
- ✧ Birçok gerçekleşmesi mümkün çeşitlilik sunması,
- ✧ Taşınmasını kolaylaştıran ve otomasyonunu sağlayan bazı fabrikasyon proseslerine adaptasyonları.

Bu sebeplerden dolayı endüstriyel gelişmeleri sürekli artmaktadır. Young modüllerine göre polyester reçineler; esnek, yarı rijit ve rijit reçineler olarak sınıflandırılırlar. Kompozit malzemelerin üretiminde genellikle kullanılan reçineler rijit tip polyester reçinelerdir. Bu reçinelerin karakteristikleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Rijit Tip Polyester Reçinelerin Karakteristikleri (Berthelot)

Yoğunluk	1200 kg/m ³	Çekme uzaması	% 2-5
Çekme modülü	2,8 – 3,5 GPa	Eğilme uzaması	% 7-9
Eğilme modülü	3 – 4,5 GPa	Basma mukavemeti	90 – 200 MPa
Çekme mukavemeti	50 – 80 MPa	Kesme mukavemeti	10 – 20 MPa
Eğilme mukavemeti	90 – 130 MPa	Isıl sapma sıcaklığı	6 – 100 °C (1,8 MPa gerilme altında)

Polyester reçinelerin avantajları;

- ✧ Elastiklik modülünün yüksek olmasından dolayı iyi rijitlik özelliği,
- ✧ İyi ölçüsel kararlılık,
- ✧ Fiberleri ve kumaşları iyi ıslatabilme,
- ✧ İyi kimyasal davranış,

- Y Düşük üretim maliyeti,
- Y Oda sıcaklığında hidrokarbonlara (petrol, fuel vs...) karşı iyi kimyasal direnç, vs...

Polyester reçinelerin dezavantajları;

- Y 120°C altında sürekli kullanımda, sıcaklıkla vasat davranış göstermektedirler,
- Y Özellikle darbe altında çatlama hassasiyeti,
- Y Önemli derecede çekme (büzülme), yaklaşık %8-10,
- Y Buhar içinde düşük davranış; kaynayan suda hidroliz riski vardır. Korumak için “jelkot (kalıplanmış parçanın düzgün dış yüzeyini oluşturan, parçanın görünümünü ve uzun dönem kalitesini belirleyen maddedir)” tabakayla polyester reçine kompozitleri kaplamak gereklidir,
- Y UV ışığı altında bozunma,
- Y Alev alabilirlik (Berthelot).

4.1.2.1.2 Yoğunlaştırıcı Reçineler

Yoğunlaştırıcı reçineler; fenolik reçineler, aminoplast reçineler, furan reçinelerden oluşmaktadır.

1. Fenolik reçineler, termoset reçinelerin en eskisidir. En iyi bilineni bakalittir. Bu reçinelerin karakteristikleri Çizelge 4.3’de verilmektedir.

Çizelge 4.3 Fenolik Reçinelerin Karakteristikleri (Berthelot)

Yoğunluk	1200 kg/m ³	Eğilme mukavemeti	90 MPa
Eğilme modülü	3 GPa	Kesme mukavemeti	30 – 50 MPa
Çekme mukavemeti	40 MPa	Isıl sapma sıcaklığı	290 °C
Çekme uzaması	% 2,5		

Fenolik reçinelerin avantajları;

- Y Mükemmel ölçüsel kararlılık,
- Y İyi termal kararlılık,
- Y İyi kimyasal direnç,
- Y Düşük çekme (büzülme),

- Y İyi mekaniksel karakteristikler,
- Y Düşük maliyet.

Fenolik reçinelerin dezavantajları;

- Y Düşük üretim oranıyla basınçla kalıplama prosesine uygun olmaları,
- Y Reçinelerin koyu renkleri.

Bu özelliklerinden dolayı, sıcaklık altında geliştirilmiş davranış veya iyi kimyasal direnç isteyen cisimler için fenolik reçineler kullanılabilir.

2. Aminoplast reçinelerin karakteristikleri, fenolik reçinelerin karakteristiklerine yakın değerdedirler. Fakat fenolik reçinelerin avantajlarına, reçinelerin renklendirilmesinin mümkün olduğu eklenmelidir.
3. Furan reçineler, oksitleyici olmayan ortamlarda termoset reçineler içinde en iyi kimyasal direnci olan reçine çeşididir. Diğer bir avantajı ise, yanması durumunda düşük duman salımına sahip olmalarıdır (Berthelot).

4.1.2.1.3 Epoksi Reçineler

Doymamış polyester reçinelerden sonra en yaygın kullanıma sahip reçine çeşidi epoksi reçinelerdir. Fakat, yüksek maliyetlerinden dolayı (polyester reçinelerin 5 katından fazla) kompozit pazarının %5'ini oluşturmaktadırlar.

İyi mekaniksel karakteristiklerinden dolayı, genellikle dolgu maddesiz kullanılan epoksi reçineler, yüksek performans kompozitlerinin (havacılıkla ilgili yapılar, füzeler vs...) matrisleridir. Epoksi reçinelerin genel mekaniksel karakteristikleri Çizelge 4.4'de verilmektedir.

Çizelge 4.4 Epoksi Reçinelerin Genel Mekaniksel Karakteristikleri (Berthelot)

Yoğunluk	1100 – 1500 kg/m ³	Çekme uzaması	% 2-5
Çekme modülü	3 – 5 GPa	Basma mukavemeti	250 MPa
Çekme mukavemeti	60 – 80 MPa	Isıl sapma sıcaklığı	120 °C
Eğilme mukavemeti	100 – 150 MPa		

Epoksi reçinelerin avantajları;

- Y Polyester reçinelerden daha iyi mekaniksel özellikler,

- Y Yüksek sıcaklıklarda iyi davranış; 150 °C – 190 °C'e kadar sürekli kullanım,
- Y Mükemmel kimyasal direnç,
- Y Kalıplama işleminde ve kütleme sırasında düşük çekme (büzülme); yaklaşık % 0,5-1,
- Y Takviye malzemelerini çok iyi ıslatabilme,
- Y Metalik malzemelere mükemmel yapışma.

Epoksi reçinelerin dezavantajları;

- Y Uzun polimerizasyon süresi,
- Y Yüksek maliyet,
- Y Üretim süresinde önlemlerin alınması gereklidir,
- Y Çatlak oluşturma hassasiyeti (Berthelot).

4.1.2.2 Termoplastik Reçineler

Termoplastik reçineler (tek kelimeyle “plastik”), oldukça geniş bir ailedir ve çok geniş çeşitli plastiklere ve teknik plastiklere (veya termopolimerler) ayrılabilirler. Plastiklerin geniş çeşitleri ya kalıplanmış objeleri elde etmek için enjeksiyonla ya da filmleri, plakaları, tüpleri, profilleri vs elde etmek için ekstrüzyonla üretilebilmektedir. Teknik plastikler ise genellikle enjeksiyonla üretilmektedirler.

Termoplastik reçineler arasında; polivinilklorür (PVC, yanınca hidroklorik asit yayan ve yaygın olarak kullanılan plastik ya da reçine), polietilen (hafifliklerine karşılık son derece sağlam ve kırılmaz olmaları ile dikkat çeken saydam şişe, kavanoz, tepsi, tava, kutu, kap ve camsı levhaların ana malzemesi olarak kullanılan plastik ya da reçine), polipropilen (dayanıklı olması ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle otomotiv sektöründe önemli bir kullanım alanı bulmaktadır), polistren (ısı geçirmeyen, saf halde renksiz, katı ve saydam halde bulunan, çok yönlü bir termoplastiktir), poliamid (yumuşak ve esnek bir plastik çeşididir, en çok bilinen türü naylondur) ve polikarbonat (uzun moleküler zincirleri içinde karbonat grupları (-O-CO-O-) tarafından bağlanmış fonksiyonel gruplara sahip olan polikarbonatlar termoplastiklerin özel bir grubudur; işlenmesi, kalıplanması, ısıl olarak şekillendirilmesi kolaydır, bu tip plastikler modern imalat sektöründe çok geniş kullanım alanı olan plastiklerdir) yer almaktadır. Termoplastik reçineler; termoset reçinelerden daha düşük mekaniksel ve termomekaniksel özelliklere sahip olmasına

karşın düşük maliyetleri ve birçok kez şekillendirilebilmeleri nedeniyle yaygın kullanıma sahiptirler. Çizelge 4.5’de poliamid ve polipropilen için bazı karakteristikler verilmektedir.

Çizelge 4.5 Poliamid ve Polipropilen Reçinelere Ait Bazı Karakteristikler (Berthelot)

	Polipropilen	Poliamid
Yoğunluk (kg/m ³)	900	1140
Çekme mukavemeti (MPa)	20 – 35	60 – 85
Young modülü (GPa)	1,1 – 1,4	1,2 – 2,5
Isıl sapma sıcaklığı (°C)	50 – 60	65 – 100

Çeşitli termoplastikler, fiberlerle takviyelendirilebilirler ve sonra kompozit malzemenin bir parçasını meydana getirirler. Fakat, termoplastik reçinelerin yüksek sıcaklık gereksinimlerinden dolayı bu reçinelerden üretilen kompozit malzemeler sınırlı gelişime sahiptirler (Berthelot).

4.1.2.3 Termotabil Reçineler

Termotabil diğer bir deyişle ısıya dayanıklı reçineler, termal performanslarıyla diğer reçinelerden ayrılırlar ve özellikle laboratuvar araştırmalarının yeni reçinelere odaklandığı havacılık ve uzay teknolojisi alanlarında gelişme göstermektedirler.

1. Bismalimid reçineler; polimer zincirlerinin kısa molekül zincirleri şeklinde birbirine eklenen yapısı katkı maddeleri tarafından yapılan 180 °C – 200 °C arasındaki reçinelerdir. Kalıplama işlemlerinde, epoksi veya polyester tipinde termoset matris ile birlikte kompozit üretimi için kullanılmaktadırlar.
2. Polimid reçineler; yüksek termal dirence sahip olmalarına rağmen, maliyetleri çok yüksektir. Bu reçineler, 250 °C’de alüminyumdan daha yüksek gerilim değerine sahip kompozit malzemeler elde etmemizi sağlamaktadırlar. Bu reçineler içinde en iyi bilinen, NASA tarafından yaklaşık 20 yıl önce geliştirilen PMR-15’dir. Polimid reçineler, özellikle reaktörler için yapısal parçaların üretiminde kullanılmaktadırlar (Berthelot).

4.1.3 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Dolgu ve Katkılar

Maliyeti azaltmak veya reçine özelliklerini değiştirmek için reçineye farklı ürünler katılabilir. Bu ek ürünler arasında, dolguların oranı %10 mertebesinde ve katkıların oranı ise % birkaç ya da daha az mertebede olmaktadır.

Bu ürünlerin ilavesi, son ürünün mekaniksel ve fiziksel karakteristiklerinin gelişmesini veya üretiminin daha kolay olmasını sağlamaktadır.

4.1.3.1 Dolgu Maddeleri

Dolgu maddeleri aralarında, takviye amaçlı olanlar ve takviye amaçlı olmayanlar olarak sınıflandırılmaktadırlar.

4.1.3.1.1 Takviye Amaçlı Dolgular

Reçinelerin mekaniksel özelliklerini geliştirirler. Takviye amaçlı dolgular geometrik formlarına göre sınıflandırılmaktadırlar; küresel ve küresel olmayan takviye amaçlı dolgular.

1. Küresel takviye amaçlı dolgular; temel ilgi gerilim dağılımını sağladığından dolayı küresel formlarındadır. Ayrıca bu dolgular, küresel olmayan dolgularla karşılaştırıldığında matris çatlaklarını azaltmaktadırlar. Cam, karbon veya epoksi, fenolik, polistren gibi organik esaslı katı veya içi boş küre formundaki küresel dolgular, genellikle 10 – 150 mikron arasında çapa sahiptirler.

Düşük yoğunluk ($100 - 400 \text{ kg/m}^3$) avantajıyla içi boş cam mikroküreler, kullanılan küresel dolguların %99'undan fazlasını teşkil etmektedirler. Ayrıca bu mikroküreler, reçinenin young modülünü arttırmaları ve basınç altında davranışını geliştirirler.

Diğer içi boş mikroküreler:

- Y Karbon mikroküreler; yoğunluk: 120 kg/m^3 , çap: 5 – 150 μm
- Y Organik mikroküreler (epoksi, fenolik vs...): yoğunluk: $100-500 \text{ kg/m}^3$, çap: 10 – 800 μm

Bu mikroküreler, cam kürelere göre genellikle daha pahalıdırlar. Kullanılan diğer mikroküreler arasında katı cam küreler yer almaktadır. İçi boş cam kürelerle karşılaştırıldığında katı kürelerin karakteristikleri;

- Y Yüksek yoğunluk: 2500 kg/m^3 ,
- Y Düşük maliyet,
- Y Yüksek basınçlarda reçineyle üretimin mümkün olabilmesi.

2. Küresel olmayan takviye amaçlı dolgular; bu dolgu maddeleri arasında en çok kullanılan malzeme mikadır. Çapı 100 – 500 μm ve kalınlık 1- 20 μm 'dir. Mika, elektrik veya elektronik uygulamalarında termoplastik veya termoset reçinelere eklenir (Berthelot).

4.1.3.1.2 Takviye Amaçlı Olmayan Dolgular

Bu dolgular, reçinelerin maliyetini ya da reçinenin belli özelliklerini geliştirme amaçlı kullanılırlar.

1. Düşük maliyetli dolgular; matrisin yoğunluğunu, young modülünü, sertliği, viskoziteyi ve ölçüsel kararlılığı arttırmaktadırlar. Maliyeti, çekme ve eğilme direncini azaltmaktadırlar.

Bu dolgular;

- Y Karbonatlar: tebeşir veya kalsiyumkarbonatlar (CaCO_3); en çok kullanılan dolgu çeşididir.
 - Y Silikatlar: talk, arı kil, felspar (potasyum, sodyum ve kalsiyumun alüminasilikatları), volastonit (kalsiyum silikat çeşidi).
 - Y Silisler: kuvars kumunun ezilmesi ve elenmesiyle elde edilirler.
2. Alev almayı geciktirici dolgular; reçineye eklendiğinde tutuşma olayının azaltılmasını veya engellenmesini sağlarlar. Termoset reçinelerde kullanılan katı dolgular arasında; alüminyum hidrat ve antimon oksit yer almaktadır.
 3. İletken ve anti-statik dolgular; organik reçineler, termal ve elektriksel yalıtkanlardır. Belli uygulamalar için yalıtkan eleman eklemek gereklidir. Bu dolgular arasında;
 - Y Bakır tozlar veya ince tabakalar: bakır, demir, alüminyum vs...
 - Y Metalleştirilmiş plastik küreler (bakır ve gümüşle),
 - Y Karbon partiküller
 - Y Metalik ince teller (Berthelot)

4.1.3.2 Katkı Maddeleri

Kalıp ayırıcı katkıları, boya maddeleri ve renklendiriciler, çekme önleyici katkıları, UV ışık dengeleyiciler gibi katkı maddeleri, çok az miktarlarda kullanılmaktadırlar.

4.1.3.2.1 Kalıp Ayırıcı Katkıları

Kompozit yapının kalıp, mandrel vs. tamamen ayrılması amacıyla kullanılırlar. Kalıp yüzeyinin gözenekli olduğu durumlarda, kalıp ayırıcıdan önce doldurma maddesinin kullanılması gereklidir.

4.1.3.2.2 Boya Maddeleri ve Renklendiriciler

Boya maddeleri, toz veya ince tabaka formunda oluşan çözünmeyen maddelerdir. Renklendiriciler ise, uygun çözeltilerde çözünebilen organik bileşimlerdir. Zayıf kimyasal ve termal davranışlarından dolayı kullanımları sınırlıdır. Boya maddesi veya renklendirici seçimi, reçinelerle uyumuna ve kompozit malzemenin kullanımına bağlıdır.

4.1.3.2.3 Çekme Önleyici Katkılar

Reçineler, polimerizasyon işlemi sırasında çekme gösterebilirler ve bunun sonucunda da düşük kaliteli son hal veya kalıplanmış parçalarda mikro çatlaklar oluşabilmektedir. Dolayısıyla düşük çekme ve kesit daralmasının sağlanması için gerekli katkı maddelerinin sık sık eklenmesi gerekmektedir. Bu katkılar ayrıca bazı kalıplama işlemlerinde malzemenin akışını geliştirmektedirler. Genellikle termoplastik veya elastomer temelli olan bu maddeler, toz formunda ya da çözelti halinde oluşurlar.

4.1.3.2.4 UV Işık Dengeleyiciler

Kompozit kalıpların kullanıldığı yerlerde, güneş ışığına uzun süre maruz kalınması durumunda solma meydana gelmemesi önemlidir. Solmanın temel nedeni, reçine sisteminin bozunmasını sağlayan UV (ultraviyole) ışınımına maruz kalmasıdır. Bu problemi ortadan kaldırmak için UV ışığı dengeleyicileri reçine sistemine eklenmelidir. Bu katkılar, UV ışınımını absorbe ederler ve reçine sisteminin bozunmasını engellerler (Berthelot).

4.1.4 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Fiberler

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan başlıca fiber çeşitleri; cam fiberler, karbon fiberler, aramid fiberler, seramik fiberler ve termotabil sentetik fiberlerdir. Rüzgar türbini rotor kanatlarında ekonomik olması ve istenilen özellikleri sağlama nedeniyle cam fiberler tercih edilmektedir. Karbon ve aramid fiberlerin maliyetlerinin yüksek oluşu üstün özelliklerine rağmen rüzgar türbin endüstrisinde fazla yer bulamamalarına neden olmaktadır. Seramik fiberler ise kırılma dayanıklılıklarının yüksek olmasından dolayı rüzgar türbinlerinde tercih edilmemektedir.

4.1.4.1 Cam Fiberler

Cam yüksek kırılma dayanıklılığıyla karakterize edilir ve yüksek çatlama hassasiyeti vardır. Ancak, cam küçük çaplarda fiber formuna getirildiğinde bu özelliklerini kaybeder ve iyi mekaniksel karakteristiklere sahip olur. Cam fiberler, mineral camlardan (silika, alümina, kireç, magnezya

vs...) yapılmaktadırlar. Bu malzemeler düşük maliyetli ürünlerdir ve üretim prosesleri oldukça basittir. Cam fiberler, mükemmel maliyet/performans oranına sahiptirler ve bu yüzden kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan fiber çeşididir. Cam çeşitleri ve genel karakteristikleri Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 Cam Çeşitleri ve Genel Karakteristikleri (Berthelot)

Tip	Genel Karakteristikler
E	Genel kullanım, iyi elektriksel özellikler
D	Yüksek elektriksel yalıtkanlık
A	Yüksek alkali içerir
C	İyi kimyasal direnç
R,S	Yüksek mekaniksel özellikler

Bileşimlerine bağlı olarak, kullanılan fiberlere dönüştürülebilen cam çeşitleri mümkündür. Pratikte, en çok tercih edilen E tipi camlar üretilen rüzgar türbin kanatlarının da çoğunu teşkil etmektedir. Diğer cam çeşitleri ise cam fiber üretiminin yaklaşık %1'lik kısmını oluşturmaktadır ve özel uygulamalarda kullanılmaktadırlar;

Y D-cam; yüksek yalıtkan özellikleriyle, telekomünikasyon sektöründe elektronik malzemelerin yapılarında kullanılırlar, özellikle anten gövdelerinde.

Y C-cam; kimyasal etmenlere direnç, özellikle kimyasal etkenlere maruz kalan yüzeysel yapılarda kullanılmaktadır.

Y R- ve S-camları; yüksek mekaniksel karakteristikleriyle, yüksek mekanik performanslı yapılar üretmek için kullanılırlar (Berthelot).

Şekil 4.2'de cam fiber keçe görülmektedir.



Şekil 4.2 Cam Fiber Keçe (Eker, Akdoğan ve Vardar, 2006)

Cam çeşitlerinin bileşimleri Çizelge 4.7’de verilmektedir.

Çizelge 4.7 Cam Çeşitlerinin Bileşimleri (Berthelot, Akdoğan)

Bileşen	E-cam [%]	D-cam [%]	R-cam [%]	S-cam [%]	C-cam [%]	A-cam [%]
Silika, SiO ₂	53 – 54	73 – 74	60	64,0 – 64,3	63,6 – 64,6	72,5
Alümina, Al ₂ O ₃	14 – 15,5	-	25	25 – 26	4,0 – 4,1	0,7- 1,5
Kireç, CaO	-	-	9	-	-	-
Magnezya, MgO	20 – 24	0,5 – 0,6	6	10,0 – 10,3	16,6 – 16,7	12,5 – 13,5
Boroksit, B ₂ O ₃	6,5 – 9	22 – 23	-	<0,01	5,6 – 5,7	-
Flor, F	0 – 0,7	-	-	-	-	-
Demiroksit, Fe ₂ O ₃	<1	0,1 – 0,2	-	-	-	-
Titanyumoksit, TiO ₂	<1	-	-	-	-	-
Sodyumoksit, Na ₂ O	<1	1,3	-	0,0 – 0,3	9,1 – 9,6	13,5 – 13,8
Potasyumoksit, K ₂ O	<1	1,5	-	0,0 – 0,3	9,1 – 9,6	13,5 – 13,8

E- ve R-cam fiberlerinin mekaniksel karakteristikleri Çizelge 4.8’de ve tek telden oluşan ve tellerden çekilen E- ve R-camlarının çekme dayanımları Çizelge 4.9’da verilmektedir.

Çizelge 4.8 E- ve R-Cam Fiberlerinin Mekaniksel Karakteristikleri (Berthelot)

Karakteristik	E-cam	R-cam
Yoğunluk, ρ [kg/m ³]	2600	2500
Young modülü, E_f [GPa]	73	86
Çekme dayanımı, σ_{fu} [MPa]	3400	4400
Kritik uzama, ε_{fu} [%]	4,4	5,2
Poisson oranı	0,22	-

Çizelge 4.9 Tek Telden Oluşan ve Tellerden Çekilen E- ve R-Camlarının Çekme Dayanımları (Berthelot)

	E-cam	R-cam
Endüstriyel telden çekilerek üretilen tek telin çekme dayanımı [MPa]	2000 – 2400	3600
Çok sayıda fiberden üretilen endüstriyel telin çekme dayanımı [MPa]	1200 – 1550	1700 – 2000
Erimiş camdan çekilen tek telin çekme dayanımı [MPa]	3400	4400

4.1.4.2 Karbon Fiberler

Karbon fiberler, çok iyi mekaniksel özelliklere ve genellikle 2000 kg/m^3 'den daha az yoğunluğa sahiptirler. Çizelge 4.10'da karbon fiberlerin özellikleri, E-cam fiberlerle karşılaştırılarak verilmektedir. Ayrıca karbon fiberler, oksitleyici olmayan atmosferde sıcaklıkla mükemmel davranış gösterirler. Mekaniksel özellikleri yaklaşık $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'a kadar korunur. Bu özelliği roket nozüllerinde, fren bloklarında (kamyonlar, Formula 1 araçları, hava taşıtları), fırın elemanlarında vs. kullanılmalarını sağlamaktadır. Bu malzemeler, anti-oksidan tabakayla kaplanarak oksitleyici atmosferlerde de kullanılabilirler (bilyalı yataklar ve lastikler gibi) (Berthelot).

Çizelge 4.10 E-Cam Fiberlerle Karşılaştırılarak Karbon Fiberlerin Özellikleri (Berthelot)

Karakteristik	E-Cam	HS Karbon	HM Karbon	UHM Karbon	HM Karbon (Zift) ¹
Yoğunluk, ρ [kg/m^3]	2600	1750	1810	1950	2000
Çap [μm]	10 – 20	5 – 7	5 – 7	5 – 7	12
Young modülü, E_f [GPa]	73	210	400	600	280
Özgül modül, E_f/ρ [MNm/kg]	28	130	210	310	140
Çekme dayanımı, σ_{fu} [MPa]	3400	3000 – 4000	2800	2000	2000 – 4000
Özgül dayanım, σ_{fu}/ρ [kNm/kg]	1300	1710 – 2290	1550	1030	1000 – 1200
E-cam fiberlerle ilişkili olarak maliyet	1* ²	10 – 15	30 – 50	200 – 400	50 – 100

HS: yüksek dayanımlı, HM: yüksek modüllü, UHM: ultra yüksek modüllü

¹HM (zift): ziftten meydana gelen fiberler

²1*: 15 Frank/kg (1996 yılında)

4.1.4.3 Aramid Fiberler

Yüksek mekanik özellikli aramid fiberler, genellikle DuPont de Nemours (ABD) tarafından geliştirilen fiberin ticari ismiyle Kevlar olarak bilinirler ve kompozit pazarına 1972 yılında sunulmuştur. Diğer gruplarda aramid fiberler üretmektedirler; özellikle AKZO grup (Almanya ve Hollanda), Twaron fiberler ticari adıyla ve Japon grubu Teijin Ltd, Technora fiberler ticari adıyla aramid üretmektedirler. Aramid fiberlerin yüksek mekanik özelliklerinin aksine basma ve eğmeye karşı dirençleri düşüktür. Çizelge 4.11’de aramid fiberlerin mekaniksel özellikleri belirtilmektedir. Bu fiberler, spor ekipmanlarında (kayak, tenis vs...) ve balistik uygulamalarında ayrıca yüksek dayanımlı halat ve kablo üretiminde kullanılmaktadırlar. Karbon ve aramid fiberlerin hibrid kompozitleri, karbon fiber kompozit malzemelerinin darbe direncini arttırmak için üretilmektedirler (Berthelot).

Çizelge 4.11 Aramid Fiberlerin Mekaniksel Özellikleri (Berthelot)

Karakteristik	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Yoğunluk, ρ [kg/m ³]	1440	1450	1470	1440	1390
Çap [μ m]	12	12	12	12	12
Young modülü, E_f [GPa]	60	120	160	60	90
Özgül modül, E_f/ρ [MNm/kg]	42	83	110	42	65
Çekme dayanımı, σ_{fu} [MPa]	3000	3000	2400	2600	2800
Özgül dayanım, σ_{fu}/ρ [kNm/kg]	2080	2070	1630	1800	2010
Kritik uzama ε_{fu} [%]	3,6	1,9	1,5	3	4

4.1.4.4 Seramik Fiberler

Ateşe dayanıklı veya seramik malzemelerin (karbitler, boritler, nitritler vs...) çeşitli fiberleri, buhar fazında kimyasal çöktürme ile üretilebilirler. Pratikte bu işlemle üretilen fiberler arasında; Bor (B) fiberler, Borkarbür (B₄C) fiberler, Silisyumkarbür (SiC) fiberler, Bor silisyumkarbür (BorSiC) fiberler yer almaktadır. Bazı seramik fiberlerin mekanik özellikleri Çizelge 4.12’de verilmektedir. Yüksek maliyetlerinden dolayı bu fiberlerin kullanımları sınırlıdır. SiC ve BorSiC fiberler özellikle metalik (örneğin, alüminyum) veya seramik matrislerle kullanılırlar (Berthelot).

Çizelge 4.12 Bazı Seramik Fiberlerin Mekaniksel Özellikleri (Berthelot)

Karakteristik	Bor	Bor + B ₄ C	SiC
Yoğunluk, ρ [kg/m ³]	2600	2600	3000
Çap [μ m]	100 – 150	100 – 150	100 – 150
Young modülü, E_f [GPa]	430	430	410
Özgül modül, E_f/ρ [MNm/kg]	165	165	140
Çekme dayanımı, σ_{fu} [MPa]	3800	4000	3900
Özgül dayanım, σ_{fu}/ρ [kNm/kg]	1460	1540	1300

4.1.4.5 Termostabil Sentetik Fiberler

Yüksek sıcaklıklarda, mekaniksel özelliklerinin değişmediği organik fiberlerdir. Elektrik ve termal izolatörlerde kullanılırlar.

Y Kermel Fiber; Rhone-Poulenc tarafından üretilmektedir. Yoğunluk (ρ): 1350 kg/m³, Young modülü (E_f): 7 GPa, Çekme dayanımı (σ_{fu}): 470 MPa, Kritik uzama (ϵ_{fu}): %20

Y Nomex Fiber; bileşimi Kevlar fiberinkine yakındır. DuPont de Nemours tarafından üretilmektedir. Yoğunluk (ρ): 1380 kg/m³, Young modülü (E_f): 16 GPa, Çekme dayanımı (σ_{fu}): 670 MPa, Kritik uzama (ϵ_{fu}): %45

Y Kynol Fiber; çapları azaldığında fiber karakteristikleri artar. Nippon Kynol tarafından üretilmiştir. 10 mikron çapındaki Kynol fiberler için karakteristikleri; Yoğunluk (ρ): 1270 kg/m³, Young modülü (E_f): 4,5 GPa, Çekme dayanımı (σ_{fu}): 280 MPa, Kritik uzama (ϵ_{fu}): %20-60

Y PBI (Polybenzimidazole) Fiber; Hoechst-Celanese tarafından üretilmektedir. Karakteristikleri; Yoğunluk (ρ): 1430 kg/m³, Young modülü (E_f): 6 GPa, Çekme dayanımı (σ_{fu}): 500 MPa, Kritik uzama (ϵ_{fu}): %30

Y Apyeil Fiber; Kevlar'a yakın bir yapıya sahiptir. Unika Ltd tarafından üretilmektedir. Karakteristikleri; Yoğunluk (ρ): 1380 kg/m³, Young modülü (E_f): 17 GPa, Çekme dayanımı (σ_{fu}): 660 MPa, Kritik uzama (ϵ_{fu}): %40 (Berthelot).

4.1.4.6 Diğer Fiberler

Belirli uygulamalarda kullanılan çeşitli fiberler bulunmaktadır. Bu fiberler genellikle düşük modül ve dayanıma (metal fiberler hariç) sahiptirler. Genellikle bu fiberler aşağıdaki özelliklere sahip ürünler elde etmek için kullanılmaktadırlar;

- Y Düşük maliyetli ürünler,
- Y Yüksek termal yalıtım ürünleri,
- Y İyi termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ürünler.

Bu fiberler arasında;

- Y Bitkisel asıllı fiberler; odun, sisal keneviri, hint keneviri, keten
- Y Mineral asıllı fiberler; silika, asbest (kullanımı yasak)
- Y Sentetik fiberler; polyester fiberler (tergal, dakron, terilen vs...), poliamid fiberler, polietilen fiberler, polipropilen fiberler
- Y Metal fiberler; çelik, bakır, alüminyum. Bu fiberlerin iyi termal ve elektriksel iletkenliği ve termomekaniksel özellikleri olduğu için metal matrislerle kullanılırlar (Berthelot).

4.1.5 Kompozit Malzemelerde Rüzgarın Çarpma Etkisi

Rüzgar türbini teknolojisinde, rüzgarın dış ortam malzemelerinde neden olduğu beklenmeyen sorunları engellemek için, rüzgarın çarpmasına karşı malzeme tarafından en uygun cevabın verilmesi beklenmektedir.

Kompozit malzemeler, rüzgar türbinlerinde rüzgarın çarpmasından oluşan etkiyi en düşük seviyeye çekecek özelliklere sahiptir. Bu çarpma sonucunda diğer malzemelerde plastik şekil değişimi ile bir kırılma formu olabilmesine rağmen, kompozit malzemeler çeşitli biçimlerde hasara uğrayabilmekte ancak bu hasar biçimlerinde malzemenin boyutsal bütünlüğünü etkileyecek önemli değişiklikler görülmemektedir. Genellikle görünmeyen ve çok cılız hasarlar oluşmaktadır. Kompozit malzemelerdeki çarpma enerjisi sadece elastik deformasyon ve hasar mekanizmalarının (matris kırığı, sınır, fiber kırığı vs.) bazıları tarafından emilebilmektedir. Hasar direnç ifadesi kompozit sistemde ortaya çıkan çarpma zararının büyüklüğü ile ilgilidir.

Çoğunlukla, çarpmalar yüksek ve düşük hızlı olarak sınıflandırılmaktadır. Normal şartlarda düşük hızlı çarpma malzemenin iç yapısında kanat ve rüzgarın temas bölgesinde deformasyona neden olmaktadır. Düşük hızda malzeme yapısında çarpmaya yanıt için gerekli temas süresi yeterli uzunluktadır ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak emilmektedir. Bundan dolayı, türbin kanadının dinamik yapısı önemlidir. Hızlı çarpmaya yanıt ise malzeme boyunca gerilim dalgası tarafından sağlanmaktadır ve bu durumda malzeme çarpmaya yanıt için zaman kazanmaz ve hasar çok küçük bir bölgede oluşur. Böylece, yüksek hız bozulma formunda fiber kırığı aracılığıyla

belirir. Düşük hızda ise matris kırığı ve katmanlar arasında sınırlama aracılığıyla belirir.

Kompozit malzemelerin en çok duyarlı olduğu yükleme durumu düzlemden dışarı doğrudur. Çünkü kompozit malzemeler kalınlık doğrultusunda, katman düzlemine kıyasla daha güçsüzdür. Sonuç olarak, geniş doğrultusunda çarpmaya maruz kalan kompozit malzemeler toplam taşınan yükün azalmasına neden olan önemli hasarlara uğramaktadır. Kompozit malzemelerin çok kompleks çarpma yüklerine karşılık verebilmesi, her bileşenin kendi kompozit malzeme ve yapı biçimini oluşturan özelliklerine bağlıdır. Tüm bunlara ilaveten, çarpmaya verilen yanıt geometri, hız ve vuran rüzgar miktarına da bağlıdır. Bunlardan her biri genişlik doğrultusunda toplam çarpma etkisinin karakteristikleri için önemli rol oynamaktadır (Eker, Akdoğan ve Vardar, 2006).

4.2 Rüzgar Türbini Zemin Yapılarında Kullanılan Malzemeler

Rüzgar türbini kulesinin monte edileceği zemin, hazırlanan çelik konstrüksiyona beton malzeme dökülmesiyle yapılmaktadır. Beton yapıda kulenin monte edileceği uygun bir alan bırakılmakta ve bu alana kule çelik bilezik ve civatalar kullanılarak monte edilmektedir. Şekil 4.3’de zemin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Rüzgar Türbini Zemin Yapısı (Aero A.Ş., İzmir)

4.3 Rüzgar Türbini Kule Yapılarında Kullanılan Malzemeler

Büyük ve küçük rüzgar türbini kulelerinde ağırlıklı olarak kule yapılarının gerektirdiği dayanımı sağlayabilmesi, imalatının nispeten kolay ve ekonomik oluşu nedeniyle çelik malzemeler kullanılmaktadır. Çelik; kulelerde çevre şartlarına ve rüzgar türbininin büyüklüğüne göre konik tüp şeklinde, profil şeklinde veya halat şeklinde kullanılabilir. İçine gerilmiş teller yerleştirilerek sağlamlaştırılmış beton kuleler de yaygın olmamasına rağmen büyük rüzgar türbini kulelerinde kullanım alanı bulmaktadır [1].

4.4 Rüzgar Türbini Motor Yuvası (Nacelle) Yapılarında Kullanılan Malzemeler

Dişli kutusu, jeneratör ve rüzgar türbininin diğer bileşenlerini korumakla görevli motor yuvası (nacelle); küçük rüzgar türbinlerinde daimi manyetik malzemelerden, çelik ve GRP (cam takviyeli plastik)'den, büyük rüzgar türbinlerinde ise çelik, alüminyum, bakır ve GRP'den imal edilmektedir. Yüksek dayanım ve hafiflik sağlaması nedeniyle son yıllarda GRP kullanımı artmakta ve motor yuvası (nacelle) yapısında GRP kullanımını üzerinde araştırmalara devam edilmektedir [National Academy Press].

Büyük ve küçük rüzgar türbinlerinde, göbek ve dişli kutusu ağırlıklı olarak çelik malzemelerden imal edilmektedir.

Jeneratör; küçük rüzgar türbinlerinde daimi manyetik malzemelerden, çelik ve bakırdan, büyük rüzgar türbinlerinde ise çelik ve bakırdan üretilmektedir.

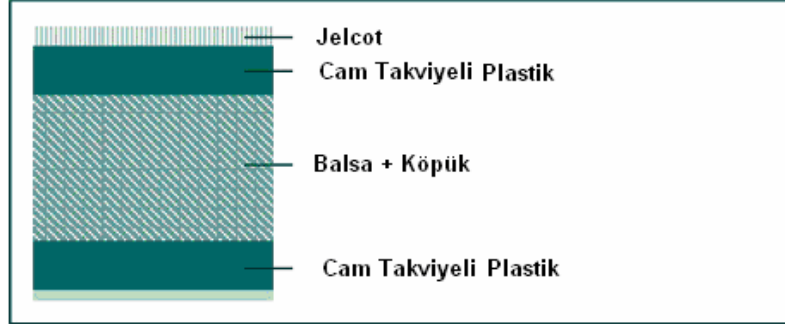
Çoğunlukla çelik malzemedan yapılan rüzgar türbini tahrik millerinin üretiminde son yıllarda GRP kullanılmaya başlanılmıştır. Bu malzemelerin tahrik millerinde başlıca kullanılma nedenleri; hafif oluşu, yüksek sıcaklık direncine sahip olmaları ve emniyetli güç iletimi sağlayabilmeleridir. Diğer bir sebep ise kompozit malzemelerin doğal elektriksel yalıtıma sahip olmalarıdır [Marcus].

4.5 Rüzgar Türbini Rotor Kanatlarında Kullanılan Malzemeler

Rüzgar yapılarında kanatlar sistemin verimi için kesin etkili bileşenlerdir. Çapları ve sayıları türbin dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Rüzgar türbin kanatlarının tasarımında kompozit malzemelerin kullanılması fiziksel, kimyasal veya mekaniksel özelliklerin bir veya birkaçının karmaşıklığının giderilmesini sağlamaktadır. Bu amaç için, farklı metodlar kullanılmaktadır. Daha verimli türbin kanatlarının üretilmesi için kullanılan metodların temel prensibi dayanım direncini geliştirmeye odaklanmakta ve bu metodlarda kompozitlerin kullanılmasıyla da malzeme yorulması mümkün olan en az seviyeye çekilmektir (Eker, Akdoğan ve Vardar, 2006).

Rüzgar türbini kanatlarının yapımında cam takviyeli plastik (GRP), karbon fiber takviyeli plastik (CFRP), ahşap, alüminyum veya çelik malzemeler kullanılmaktadır. Küçük rüzgar türbinleri için, kanat çapı 5 metreden az, kullanılacak malzeme seçiminde, ağırlık, sertlik veya kanat karakteristiklerinin yerine daha çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Fakat büyük ölçekli türbinler söz konusu olunca kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemli kazanmaktadır. Büyük rüzgar türbinlerinde genellikle GRP kullanılmaktadır. Bu malzeme hafifliği, yüksek dayanıklılık sağlaması, iyi korozyon direnci, yüksek sıcaklık toleransı ve üretim kolaylığının yanında, diğer malzemelere göre daha ucuzdur. CFRP yapımı kanat prototiplerinde

başarı sağlamıştır ve sınırlı bir üretimi vardır. Bu malzemenin GRP'den daha yüksek dayanım ve hafiflik sağlaması bir avantaj olmasına rağmen, çok pahalı olması ekonomik açıdan kullanımını sınırlamıştır [3]. Şekil 4.4'de Enercon E70'e ait rotor kanadının yapımında kullanılan malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Enercon E70 Rotor Kanadında Kullanılan Malzemelerin Gösterimi [7]

Rüzgar türbinlerinde özellikle kanatlarda kullanılan bir başka tip kompozit yapısı doğal kompozit olarak bilinen ağacın kullanılmasıdır. Bu amaçla yaklaşık 2,5 – 4 mm kalınlığındaki ince tahta ağaç kaplamalardan oluşturulan tahta/epoksi laminant kompozit ürünleri tercih edilmektedir. Ancak bununda özellikle büyük kanat formlarında işçilik gereksinmesinin fazla oluşu sakıncalı yönünü oluşturmaktadır (Vardar ve Eker). “Soğuk kalıp” olarak adlandırılan bir teknik üretimde kullanılarak bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ahşap kaplama tahtaları bir vakum torbasında epoksi reçine ile haddelenerek, kanat kalıbı şeklinde preslenir. Bu biçimde elde edilen kanatlar, özellikle, büyük rüzgar türbinlerinde dayanıklılık ve hafiflik bakımından diğerlerine göre oldukça büyük bir üstünlük sağlamaktadır ve bunun üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Çelik ve alüminyum bileşimleri ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemler nedeniyle sadece küçük güçlü rüzgar türbinlerde kullanılmaktadır [3].

Dünya çapındaki uygulamalara bakıldığında örneğin üretilen kanatların yaklaşık % 47'sini elinde bulunduran Danimarka'daki LM Glasfiber adlı şirketin GRP'i rüzgar türbini imalatında kullandığı görülmektedir. Bu şirketin, bu kompozitlerle 13,5 – 39 m çapında 50 kW'den, 5MW'a kadarki türbinleri ürettiği bilinmektedir. Cam takviyeli plastikler üstüne balsa ya da köpük kaplama ile yaptıkları sandviç malzemeler yine bu amaçla kullanılmaktadırlar. Jel kaplama ile yansıma olmadan ve UV dayanımına sahip yapıları oluşturdukları bilinmektedir.

Pazarın yaklaşık % 24'ünü elinde bulunduran Vestas Wind System şirketi kanat yapılarında cam/epoksiyi önermektedir. Bu yapının 110 °C'de oluşturulması ile oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Aynı firma kompoziti sadece kanatlarda değil, jeneratör grubunun korunmasında, borularda, kulede, kaplinlerde kullanarak sistem maliyetini ve verimliliğini aşağıya çekmeyi başarmıştır. Yine Danimarkalı NEC Micon firması da tahta kompozitler içerisinde

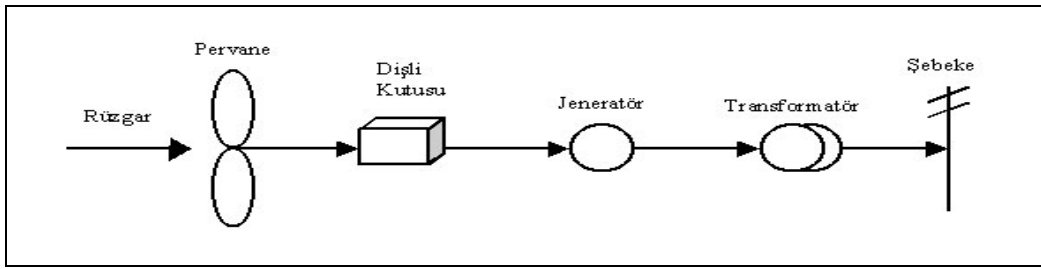
aerolaminatların kullanılması gerektiğini ve bunun yerinin ağır cam/polyester ile hafif cam/polyester kompozit grubunun arasında olduğunu belirtmektedirler. Bu firma 1980 yılından beri üretimini yaptığı 5000 türbinde tahta kompozitleri kullandığını, özellikle tahta/epoksi yapıyı şiddetli savunarak cam takviyeli yapılara oranla daha uygun olduğunu açıklamaktadırlar (Vardar ve Eker).

Ayrıca son yıllarda NASA tarafından, rüzgar türbini rotor kanatlarında şekil hafızalı alaşımların kullanılması konularında araştırmalar yaptırılmaktadır. Henüz uygulamaya geçmeyen bu çalışmalarda rotor kanadı imalatında Ni-Ti, Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al şekil hafızalı alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan imal edilen kanatların üzerine gerilim ölçerler (strain gauges) yerleştirilmekte, kanadın rüzgar tarafından deformasyona uğraması periyodunda gerilim belirli seviyeye ulaşınca rezistanslar aracılığıyla kanat ısıtılmakta ve böylece şekil hafızalı alaşımdan üretilen rotor kanadının orijinal şekline geri dönmesi sağlanmaktadır.

Şekil hafızalı alaşımdan yapılan kanatlar, mevcut kanatlara göre daha uzun boyutlarda olabilmekte ve verimleri daha yüksek olmaktadır. Dezavantajları ise, daha pahalı ve 3 kat kadar daha ağır olmalarıdır. Fakat ağırlık problemi kanat profilinin dış kısmını şekil hafızalı alaşımdan ve kalan kısımları başka malzemelerden imal ederek kısmen engellenebilmektedir (Mensch).

5. RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT PROFİLLERİ

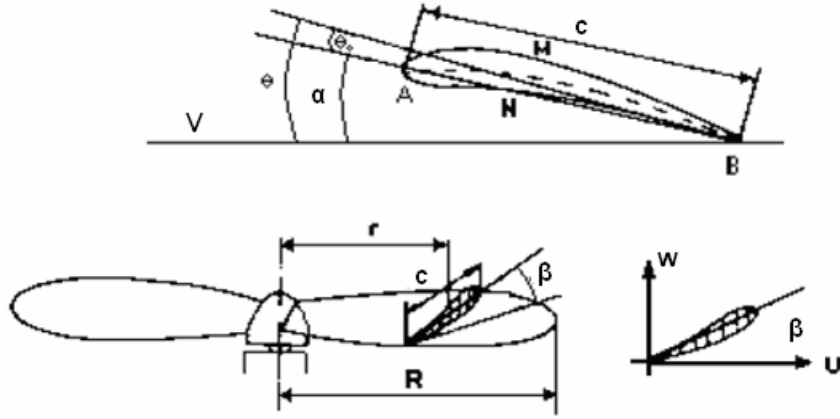
Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinde, enerji dönüşüm zincirinin ilk halkası olan rüzgar türbini kanadı önemli rol oynamaktadır (Şekil 5.1). Bir rüzgar türbini kanadından da maksimum verimi sağlayabilmek için gerekli en önemli faktörlerden biri ise rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısıdır. Aerodinamik yapının önemi rüzgarın barındırdığı kinetik enerjinin maksimum %59'unun yararlı enerjiye dönüştürülebilir olmasıyla kaynaklanmaktadır. Rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısı incelenirken kanat tipinin, kanat açılarının ve kanat konumunun en az rüzgarda bile dönme sağlayabilecek özelliklerde olması ve rüzgar türbininin bulunduğu bölgedeki rüzgar potansiyeli ile uyum sağlaması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple rüzgar türbini kanadının rüzgardan maksimum enerjiyi çekebilecek şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir (Onat ve Çetin).



Şekil 5.1 Rüzgar Enerji Tesisi Prensi Şeması (Onat ve Çetin)

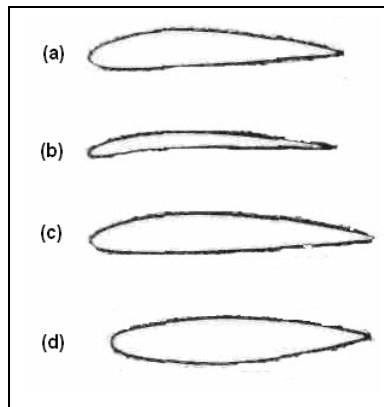
Rüzgar türbini kanat dizaynında, öncelikle yapılması gereken λ (uç hız oranı) seçimidir. Bu değer, şebeke bağlantılı üç kanatlı rüzgar türbinleri için 7 olarak alınmakta ve 6 – 8 değerleri arasında seçilmesi önerilmektedir. En genel halde optimum λ , profil tipine ve kanat sayısına bağlıdır. Bu nedenle optimum λ sayısının 6 – 8 arasında seçimi genel bir kural değildir. Rüzgar türbini kanat dizaynı için optimum profil boyunun, profil giriş hattı ile kanat dönme düzlemi arasındaki açı olan bağlama açısının ve profil boyuna bağlı olarak profil alt ve üst kalınlıklarının hesaplanması gereklidir.

Rüzgar türbinlerinde, rüzgar enerjisinin absorbe edilmesini sağlayan eleman olan kanatların profili ve kanat profilini etkileyen parametrelerin bilinmesi maksimum enerjinin elde edilmesi açısından çok önemlidir. Şekil 5.2’de bu parametrelerden en önemlileri gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Kanat ve Rotor Kesit Görüntüsü [3]

Burada; profilin sivri ucuna (B) sürükleme ucu, burun noktasına (A) kaldırma ucu denilmektedir. AB uzunluğu profil kiriş uzunluğu (cord) c 'yi verir. Kirişin ortasından geçen eğri kiriş ortalama eğrisidir. Sıfır kaldırma doğrusu ile kiriş arasındaki sıfır kaldırma açısı (θ_0), V hızı ile sıfır kaldırma doğrusu arasındaki açı ise kaldırma açısı (θ) olmaktadır. V hız vektörü ile kiriş arasında kalan açı, hücum veya geliş açısı (α)'dır. Hafif bombeli yüzeyler, verilen bir hücum açısı için daha yüksek bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasında bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır. Kaldırma kuvveti cisim üzerinde emme veya çekme meydana getirir. Dolayısı ile aerofoil (kanat profili) denen bu tip şekiller bu durum için uygundur. Kanat profili üst yüzeyde daha hızlı bir akış oluşturur. Yüksek hava akış hızı, kanat profilinin üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirmektedir. Bunun sonucunda emme etkisi oluşarak kanat havalanmaktadır [3]. İki temel kanat profili vardır: simetrik ve asimetric. Şekil 5.3'de simetrik ve asimetric kanat profilleri gösterilmiştir. (a), (b) ve (c) ile gösterilen kanat profilleri asimetric; (d) şikkında ise simetrik kanat profili gösterilmektedir.

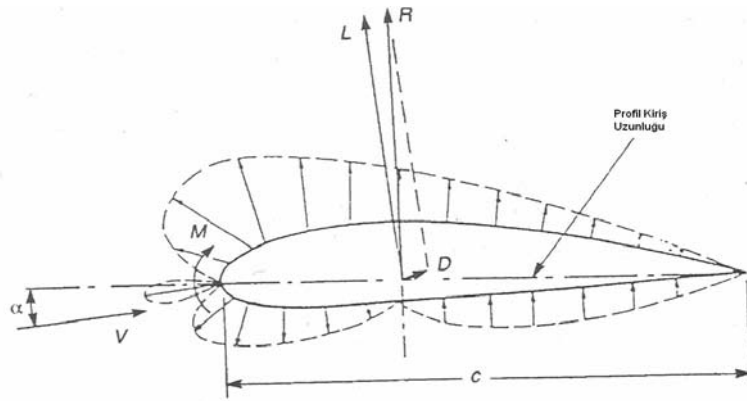


Şekil 5.3 Asimetric ve Simetric Kanat Profilleri (Tümerdem)

Şekil 5.3 dikkatle incelendiğinde, bazı ortak noktalar göze çarpmaktadır. Bunlar, dışbükey olmaları, hücum kenarının (leading edge) dairesel, firar kenarlarının da (trailing edge) keskin ve sivri olduğudur (Tümerdem).

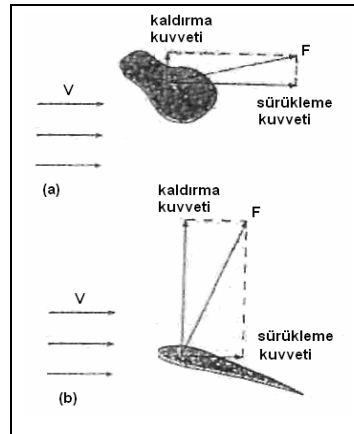
Aralarındaki temel farklılık ise, alt yüzeylerinin şeklidir. Asimetrik kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akış yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken; simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de yaklaşık eşit bir kaldırma görülür.

Şekil 5.4’de ise kanat profili üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. (L; kaldırma kuvveti, D; sürüklenme kuvveti, M; moment, c; kanat uzunluğu R; bileşke kuvvet) [3].



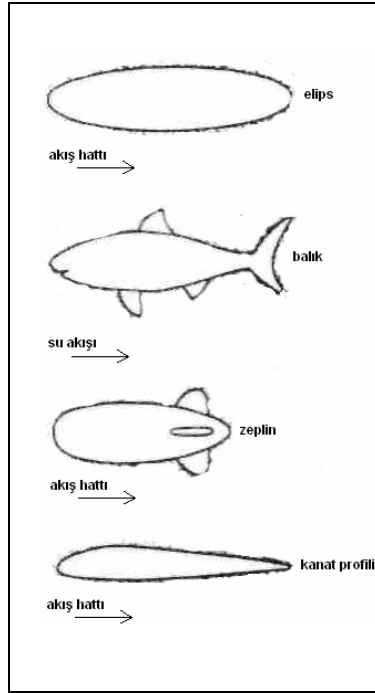
Şekil 5.4 Kanat Profili Üzerine Etkiyen Kuvvetler [3]

Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90° dik geldiği durumda; minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralel olduğu durumda meydana gelir (Şekil 5.5). Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.



Şekil 5.5 Sürüklenme ve Kaldırma Kuvvetleri a) Hava Akışı, Cisim Üzerine 90° Dik b) Hava Akışı, Cisim Yüzeyine Paralel (Tümerdem)

Sürüklenme kuvvetine en iyi örnek paraşüt verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma indirebilmek için yapılmış özel cisimlere “akış hatlı” cisimler denir. Şekil 5.6’da akış hatlı bazı cisimler görülmektedir.



Şekil 5.6 Akış Hatlı Bazı Cisimler (Tümerdem)

Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0° açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akış altı da denir. Dolayısıyla, hava akışı hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça basınç artar, bu olaya “Bernoulli etkisi” denir. Kaldırma kuvveti cisim üzerinde çekme (veya emme) meydana getirir (Tümerdem).

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri havanın akış hızına, kanadın boyutuna, hava yoğunluğuna ve hücum açısına göre değişir. Verilen bir profil için, kaldırma ve sürüklenme katsayıları rüzgar tüneli testlerine veya analitik formüllere dayanarak ya da hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde bilgisayarda hücum açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Farklı hücum açılarında sürüklenme katsayısı (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) hesaplanır. Bu katsayılar birimsiz büyüklüklerdir. Bu katsayılar yardımıyla türbin için uygun kanat yapısı belirlenir.

C_D sürüklenme katsayısı;

$$C_D = D / (0.5 \rho V^2 A) \quad (5.1)$$

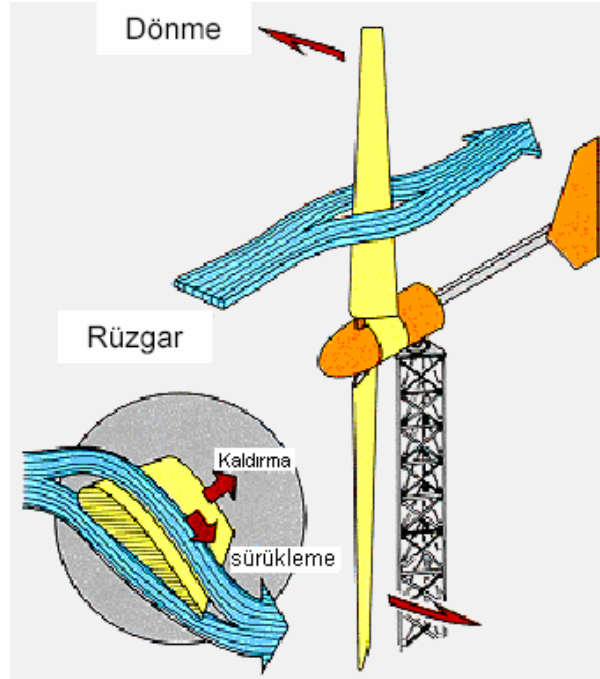
D: sürüklenme kuvveti (N), **ρ :** hava yoğunluğu (kg/m^3), **V:** hava hızı (m/s), **A:** kanat alanı (m^2) şeklinde ifade edilir.

C_L kaldırma katsayısı ise;

$$C_L = L / (0.5 \rho V^2 A) \quad (5.2)$$

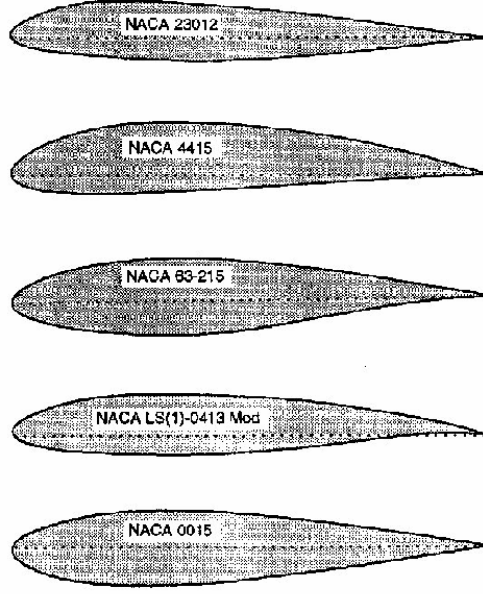
olarak gösterilir. Denklemdaki L indisi, kaldırma kuvvetini ifade etmektedir.

Her iki katsayı da rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan C_D ve C_L katsayılarının oranları (C_D/C_L) alınır. Bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri, rüzgar türbinlerinden en iyi verim alınabilecek değerdir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin rüzgar türbin kanatları üzerine etkisi ise, Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, rüzgar akışı, pervane kanada çarptığında, kanat profiline üst kısımdan daha hızlı, alt kısımdan ise daha yavaş geçecektir [3].



Şekil 5.7 Rüzgar Türbinini Etkileyen Temel Kuvvetlerin Gösterimi [3]

Rüzgar türbin kanatlarında profil olarak daha çok NACA, LS ve LM profilleri kullanılmaktadır. Şekil 5.8’de rüzgar türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profil şekilleri ve Çizelge 5.1’de de bazı NACA kanat profil özellikleri verilmektedir.



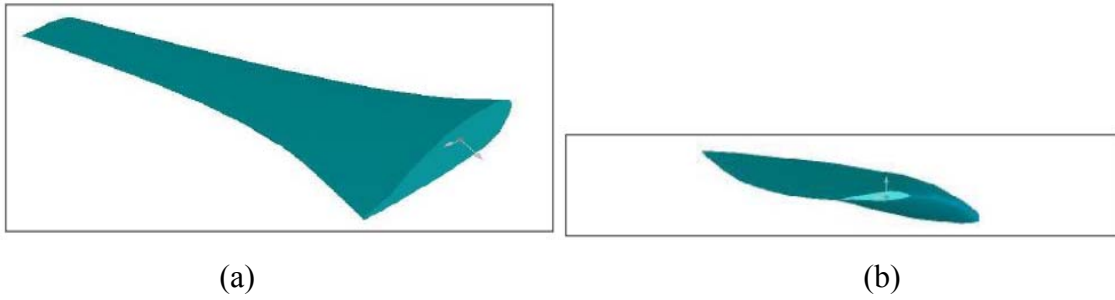
Şekil 5.8 Bazı Rüzgar Türbini NACA Kanat Profilleri (Onat ve Çetin)

Çizelge 5.1 Türbinlerde Kullanılan Bazı NACA Profillerinin Özellikleri

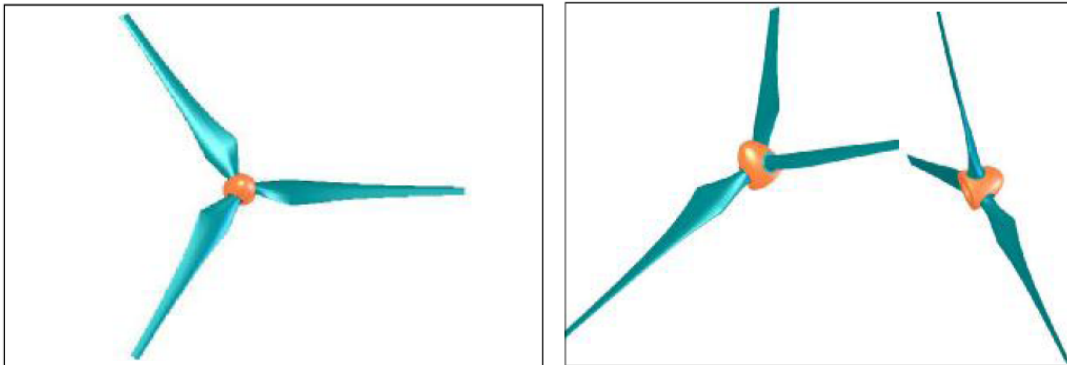
Profil	α (hücum veya geliş açısı)	C_L (kaldırma katsayısı)	C_D (sürüklenme katsayısı)
Naca 23012	-2	0.0	0.006
	8	0.872	0.010
	20	1.210	0.190
Naca 23015	-2	-0.001	0.007
	8	0.898	0.010
	20	1.270	0.167
Naca 4412	-4	0.003	0.008
	8	1.135	0.014
	20	1.504	0.164
Naca 4415	-4	-0.038	0.075
	8	1.102	0.116
	20	1.304	0.121

Naca 0012	25	0.835	0.445
	75	0.567	2.006
	150	-0.976	0.689
Naca Fx 60-120	-4	0.102	0.007
	8	1.364	0.013
	20	1.297	0.012
Naca Fx 60-184	-4	0.019	0.008
	8	1.262	0.012
	20	1.300	0.012

Şekil 5.9'da 3 kanatlı rüzgar türbini için LS-1 kanat profilinin tam ve uçtan görünüşü, Şekil 5.10'da ise 5 m uzunluğunda LS-1 profilli 3 kanatlı rotorun değişik açılardan görünüşleri gösterilmektedir.



Şekil 5.9 LS-1 Kanat Profili a) Tam ve b) Uçtan Görünüşü (Onat, Kepçeler ve Orgül)



Şekil 5.10 5 m Uzunluğunda LS-1 Profilli 3 Kanatlı Rotorun Değişik Açılardan Görünüşleri (Onat, Kepçeler ve Orgül)

Rüzgar türbinlerinde maksimum güç katsayısına yüksek uç hız oranlarında (λ) ulaşılabilmektedir. Yukarıda λ 'nın 7-8 arasında önerildiğinden bahsedilmişti, örneğin; $\lambda=7$ olarak belirlenen bir sistemde Çizelge 5.2'den bu değere karşılık gelen kanat sayısı 3 olarak seçilebilir.

Çizelge 5.2 Uç Hız Oranına Göre Kanat Sayısı

Kanat Sayısı	Uç Hız Oranı (λ)
6 – 20	1
4 – 12	2
3 – 8	3
3 – 5	4
2 – 4	5 – 8
1 – 2	8 – 15

Aerodinamik açıdan optimum dizayn için ise α (hücum açısı) ve L/D oranlarının dikkatle seçilmesi gerekmektedir. α açısı küçük, buna karşılık L/D oranı ise maksimum değerlerinde seçilmelidir.

Yüksek λ 'lı rüzgar türbinlerinde C_L/C_D oranının büyüklüğünden dolayı tercih edilen kanat profil tipleri NACA 4415 ve NACA 23012'dir (Bu profillerin bazı özellikleri için Çizelge 5.1 ve profillerin şekilleri için Şekil 5.8'e bakınız). Her iki profilin (C_L/C_D)_{max} değerleri birbirine yakın olup 100-125 civarındadır.

Kanat profillerinin seçiminde tüm hesaplamalardan önce rüzgar türbinlerinin kurulacağı bölgenin rüzgar durumu araştırılmalıdır. Bu araştırmalar sonucunda bölgedeki rüzgar yoğunluğuna göre kanat profili dolayısıyla da rüzgar türbini seçim işlemine başlanılmalıdır. Ayrıca rüzgar türbinlerinin kurulacağı noktada esen rüzgarın hakim esme yönü tespit edilmeli ve bu yönde rüzgarın hızını kesecek engellerin olmamasına özen gösterilmelidir.

Hafiflik, yüksek dayanım ve yorulma direnci gösterdiği için son yıllarda özellikle büyük rüzgar türbinlerinin kanatlarında kompozit malzeme olarak plastik matrisli kompozitler seçilmektedir. Çoğunlukla GRP (cam takviyeli plastik) ve CFRP (karbon fiber takviyeli plastik)'nin kullanıldığı kanat imalat işlemlerinde maliyet açısından daha uygun olan GRP, CFRP malzemelere göre daha fazla tercih edilmektedir.

Rotor kanatlarında maliyeti düşürmek, dayanım ve rijitliği arttırmak için imalat sırasında cidarlar plastik matrisli kompozit malzemelerden yapılmakta, ara malzeme olarak da balsa ve köpük kullanılmaktadır. Düşük "maliyet/ürün özellikleri" nedeniyle balsa yaygın olarak kullanılan ara malzemelerden birisidir. Balsa malzemesinin kesme yükü ve basınç yükü dayanımı yüksek ancak

su dayanımı köpük malzemelere oranla daha düşüktür. Kompozitlerde ara malzeme olarak tercih edilen köpük cinsleri; üretan, fenolik, polieter, polistiren, polivinilklorür (PVC) köpüklerdir. Köpükler cidarla ara malzeme arasında, kompozit üreticisine, iyi bir bağın oluşturulabilmesi için yeterli, geniş ve düzgün bir yüzey sunmaktadır. Genellikle köpüklerin yoğunluğu 1-8 kg/m³ arasındadır.

Hem Türkiye’de hem de dünyada GRP üretiminde en yaygın kullanılan reçine malzemesi, takviyeli plastikler içinde termoset grubunda yer alan doymamış polyester reçinelerdir. Elle yatırma gibi basit kalıplama tekniklerden en karmaşık makineleşmiş kalıplama tekniklerine kadar her tür kalıplama tekniğine hitap ederler. Polyester reçineler, çok geniş bir kimyasal aileyi kapsar ve genel olarak dibazik asitlerle polihidrik alkollerin kondensasyon reaksiyonu sonucunda elde edilirler.

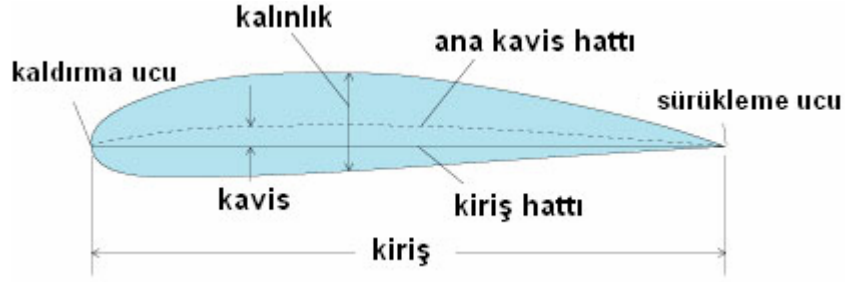
Dibazik Asit + Polihidrik Alkol \Rightarrow Polyester Reçine + H₂O

Polyester reçineler, rüzgar türbinlerinde de çok tercih edilmekte fakat 3 m’den büyük rotor kanatlarının imalatında reçine malzemesi olarak epoksi kullanılmaktadır.

Kalıplanan rotor kanatları zımparalandıktan sonra uygulanan jelkot, kanadın düzgün dış yüzeyini oluşturur ve parçanın görünümünü ve kalitesinin uzun süre korunmasını belirler. Kaliteli bir yüzey sağlamak ve günden güne değişmeleri önlemek amacı ile jelkot uygulama tekniği çok iyi kontrol edilmelidir. Uygun olmayan tekniklerin kullanılmasını ve işçilerin işi baştan sağma yapmalarını önlemek amacı ile periyodik olarak düzenlenmiş taze bilgilerle, işçilerin eğitilmesi gereklidir [8].

5.1 Rüzgar Türbini Rotor Kanadının İmalatı

Önceleri elle yatırma yöntemi ile üretilen GRP rüzgar türbini kanatları, günümüzde reçinenin homojen bir şekilde dağılmasının sağlanması için reçine transfer yöntemi ile üretilmektedir. Ayrıca bu yöntem seri imalata daha yatkındır. Şekil 5.11’de imalat için tercih edilen bir kanat profilinin resmi gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Kanat Profili [7]

Kumaş fiberler önceden seçilmiş kanat profili yarı kalıbına dizilir ve üstü plastik poşet tarzı bir malzemeyle kaplanır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Yarı Kalıba Dizilmiş Fiber Malzemelerin Poşetle Kaplanması (Aero A.Ş., İzmir)

Sonra vakumlama işlemi ile fiberler ve poşet arasındaki hava alınır. Epoksi reçine içeri gönderilir. Reçine transfer yöntemi kullanıldığı için epoksi tüm yarı kalıba homojen olarak yayılır. Daha sonra kalıp yarıları yaklaşık 8 saat süreyle 80 – 90 °C sıcaklıkta kürlenir. Kürlenme işleminden sonra kalıp yarılarına hafifliği sürdürmek ve maliyeti azaltmak amacıyla köpük ve balsa malzemeleri yerleştirilir. Sandviç yapı olarak adlandırılan bu yapı elde edildikten sonra kalıp yarılarına, rüzgarın karşılanması ve iletilmesi sırasında kanat dayanımının artırılması amacıyla türbinin boyutlarına göre sayısında ve yerlerinde değişiklik görülebilen (genelde 2 adet) omurga monte edilir. Hazır hale getirilen kalıp yarıları kapama düzeneği (Şekil 5.13) yardımıyla birbirleri üzerine kapatılır ve yapıştırma reçinesi kullanılarak birbirlerine yapıştırılırlar.



Şekil 5.13 Yarı Kalıp Kapama Düzeneginde Kapama İşlemi Öncesi Beklerken (Aero A.Ş., İzmir)

Kalip yarıları bu düzenek üzerindeyken yaklaşık 3 - 4 saat 80 - 90 °C sıcaklıkta kapama kürlenmesi yapılır. Bu işlemden sonra sırtlık (spoiler) (Şekil 5.14), şekilsel tasarım ve verim artımı (süpürülen alanı arttırarak) için kanata monte edilir (Şekil 5.15). Sırtlığın takılmasından sonra bitirme işlemlerine geçilmektedir.



Şekil 5.14 Sırtlık (Aero A.Ş., İzmir)



Şekil 5.15 Sırtlığın Monte Edilmesi (Aero A.Ş., İzmir)

İlk olarak rüzgar türbini kanat yüzeyleri zımparalanır (Şekil 5.16). Jelkot uygulanır ve daha sonra yüzeyler tekrar zımparalanır. Bu işlemden sonra tekrar jelkot uygulanmaktadır.



Şekil 5.16 Zımparalanan ve Zımparalanmayı Bekleyen Rüzgar Türbini Kanatları (Aero A.Ş., İzmir)

En son olarak da kanat yüzeyleri kapalı alanda 2 kat boyanır. Bu boyama işlemi 1. kat boya + yaklaşık 80 °C’de 30-40 dak. kürleme + 2. kat boya şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Rüzgar türbini kanatlarında kalite kontrol işlemi balans ayarlaması yapılarak gerçekleştirilir. Balans ayarlamasında 3 kanat 1 seti oluşturmaktadır. Her kanadın tek tek ağırlıkları tartıldıktan sonra bilgisayar programı yardımıyla momentleri hesaplanır. Çizelge 5.3’de Enercon E48 rüzgar türbini rotor kanatlarında yapılan hesaplamalara ait ağırlık ve moment aralıkları görülmektedir.

Çizelge 5.3 Enercon E48 Rüzgar Türbini Rotor Kanatlarının Kontrolünde Hesaplanan Ağırlık ve Moment Aralıkları

Kanat Boyu	Ağırlık Aralığı	Moment Aralığı
24 m	2000 – 2200 kg	+/- 12 kgm

Her üç kanada da ait moment değerleri bulunduktan sonra aralarındaki oran belli tolerans değerlerini aşıyorsa kalıplama sırasında kanada yerleştirilen balans kutusuna kurşun reçine karışımı ilave edilmektedir. Bu kurşun reçine karışımı momenti düşük olan kanat üzerindeki balans kutusuna eklenmektedir. En son olarak kanatlar tekrar tartılır, momentleri hesaplanarak tekrar kontrol edilir ve sevkiyata hazır hale getirilirler (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Kontrolleri Yapılmış Sevkiyata Hazır Rüzgar Türbini Kanadı (Aero A.Ş., İzmir)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Rüzgar türbini rotor kanatları, kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle çekmeye maruz kalmaktadır. Bu yüzden rüzgar türbini kanat yapımında kullanılan, polyester matrisli ve vinilester matrisli cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli kompozit malzemeler çeşitli katlarda üretilmiştir. Üretilen bu kompozit malzemelerin gerilme – gerinme karakteristikleri, mikrosertlik değerleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca profil giriş uzunluğu 400 mm olan rüzgar türbini kanat modeli üretilmiştir.

6.1 Malzeme

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler, rüzgar türbini rotor kanatlarının üretiminde tercih edilen malzemelerden seçilmiştir.

- **Matris Malzemeleri**

Matris malzemesi olarak, polyester ve vinilester reçineler seçilmiştir. Bu reçinelerin sıvı haldeki özellikleri Çizelge 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1 Polyester ve Vinilester Reçinelerin Sıvı Haldeki Özellikleri (Poliya)

Özellik	Polyester	Vinilester
Yoğunluk [g/cm ³]	1,128	1,044
Kırılma İndisi	1,539	1,565
Asit Değeri [mg KOH/g]	17	maks. 9
Viskozite [cp]	700	400
Jel Süresi [dakika]	11	20
Monomer* Oranı [%]	37	42
Raf Ömrü [ay]	4	6

Kullanılan polyester reçine; reaktif, orta viskozitede, deformasyonu az, açık renkli, ekonomik ve cam takviyeli plastik üretiminde ve döküm işlemlerinde kullanılan genel amaçlı doymamış polyester reçinedir. Bu reçine, el yatırması ve fiber püskürtme yöntemleri ile cam takviyeli plastik elde edilmesinde kullanılan bir reçinedir.

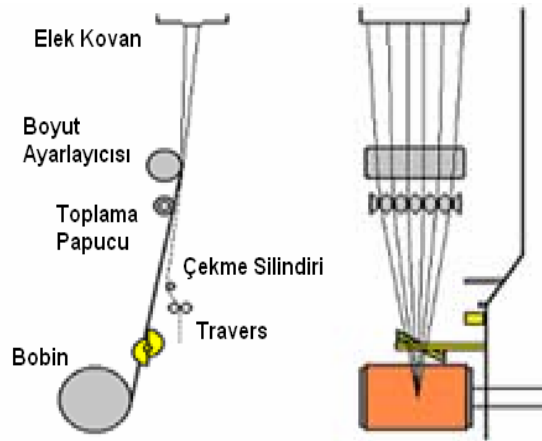
* Büyük moleküllerin bileşenlerine ayrışması sonucu oluşan en küçük yapı birimi

Kullanılan vinilester reçine ise; uzun süre yüksek ısı dayanımı, yüksek korozyon direnci ve mükemmel yapışma özelliklerine sahiptir. Ayrıca asidik ve alkali ortamlarda performansının yüksek olmasının yanında, bu reçinenin yüksek dayanım ve esneklik imkanı sunan gelişmiş mekanik özellikleri sayesinde dinamik ve statik yük dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılması uzun süreli yüksek performans elde edilmektedir. Vinilester reçineler doymamış reçineler arasında yüksek sıcaklıklarda dahi kimyasal direnci en iyi olan ürünlerdir. Polyesterlerin alkali-bazik maddelere ve oksitleyici asitlere karşı zayıf oldukları bilinmektedir. Fakat vinilester reçineler söz konusu kimyasal maddelere karşı güvenle kullanılır (Poliya).

Ayrıca jelleşme süresinin kısaltılması amacıyla Co hızlandırıcı olarak ve sertleşmenin gerçekleşmesi için Mek-P (metil etil keton – peroksit) çözültisi reçineye katılmıştır.

- **Takviye Malzemeler**

Üretilen kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak, 450'lik cam fiber keçeleri (450 g/m^2) ve balsa kullanılmıştır. Cam fiber, dünyanın her yerinde çoğunlukla "E" camının mikron mertebesinde devamlı proses ile ince lifler halinde çekilmiş türüdür. Cam hammadde bileşimi, çok ince öğütülerek, homojen bir karışım elde etmek üzere karıştırılır ve yaklaşık $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta çalışan bir ergitme fırınına beslenir. Fırın içinde, karışım yavaşça sıvı hale geçer. Prosesine uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sistemi ile $50 - 70 \text{ m/sn}$ gibi yüksek bir hız ile daha sonraki uygulama türüne bağlı olarak $5 - 20$ mikron çapında çekilen cam lifleri bir bobin üzerinde toplanır (Şekil 6.1). Cam fiberler, demet haline getirilmeden önce, bağlayıcı adı verilen bir kimyasal bileşim ile kaplanır. Bağlayıcı cinsi, kompozit malzeme içinde cam fiberin performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bobin üzerine sarılan cam fiberler kurutulduktan sonra, kırılmış demetten keçe, çok uçlu fitil, süreksiz demetler gibi cam fiber ürünlerinin elde edilmesi amacıyla prosese tabi tutulur [8].



Şekil 6.1 Cam Liflerin Bobin Üzerinde Toplanması [8]

Değişik sayıda fiberlerin birlikte bükülmesiyle sürekli tek iplikler üretilir. Bükülmüş ipliklerin çapları 0,065 – 1,40 mm arasında değişir, kumaş şeklindeki cam tekstil ürünlerinde ve filaman sarma tekniğinde kullanılırlar. Sürekli demetler, birbirine paralel filamanlardan oluşan bükümsüz demet veya ipliklerdir. Değişik sayıda bükümlü ipliklerin veya bükümsüz filaman demetlerinin bir makara üzerine sarılmasıyla sürekli fitiller elde edilir. Fitiller kendi aralarında bükümsüz veya hafif bükümlü fitiller şeklinde gruplandırılırlar. Cam fiber keçeler ise, bükümlü veya bükümsüz fitillerin kesilmesiyle elde edilen uzunlukları 3 – 60 mm arasında değişen kıyılmış fiberlerdir. Süreksiz fiber üretiminde kullanılan fitiller, yapısal bütünlüğü yüksek olan sert fitiller veya kolayca dağılabilen gevşek yapılı yumuşak fitillerdir.

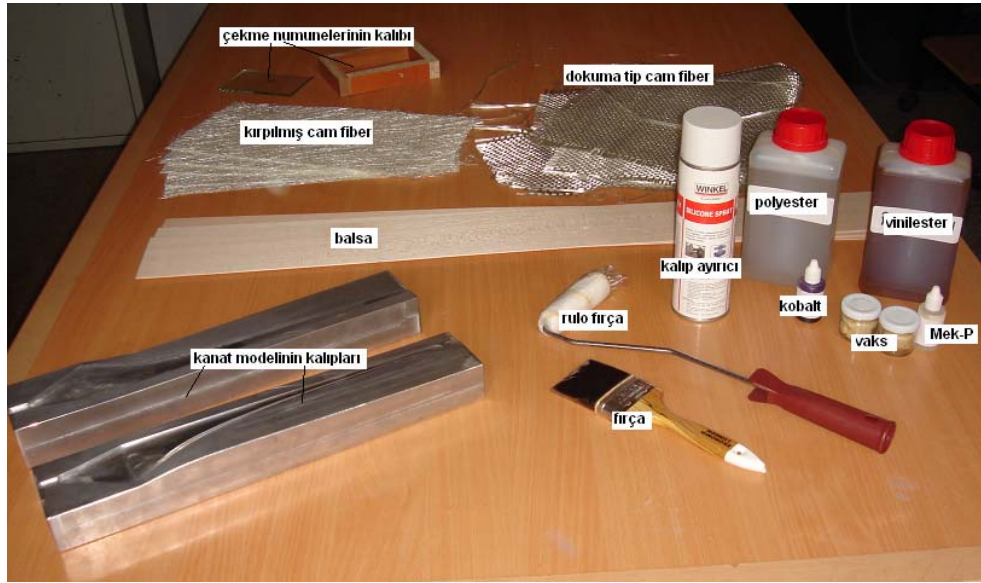
Kullandığımız cam fiber keçeler; sürekli veya süreksiz filaman demetlerinden oluşan ince, düz tabakalardır. Filamanlar, yapı içerisinde tamamen düzensiz bir şekilde dağılırlar ve bağlayıcı bir reçine veya iğneleme ile mekaniksel bir şekilde bir arada tutulurlar. Sürekli filaman demetlerinden ve kıyılmış filamanlardan oluşan keçelerin pekiştirici etkileri aynı olmakla beraber kalıplanma özellikleri farklıdır. Sürekli filaman keçeleri karmaşık şekilli parçaların kalıplanmasında kullanılabilirler. Bazı fiberlerin keçe düzlemine dik olarak yönlendikleri iğnelenmiş keçeler, iğnesiz keçelerden daha yumuşak olup daha kolay katlanabilirler. Bu nedenle şekil alabilme özellikleri yüksektir. Şekil 6.2’de üretimi tamamlanmış rulo halinde cam fiber keçe görülmektedir. Pekiştirici keçelerde kullanılan organik bağlayıcılar yüksek veya düşük çözünürlük özelliklerine sahip olabilirler. Çözünürlük özelliği, bağlayıcının sıvı reçine matrisi içerisinde çözünme hızını gösterir. Bağlayıcı fazın hızla çözündüğü pekiştirici keçeler elle kalıplama tekniği gibi, reçinenin pekiştiricileri hızlı bir şekilde ıslatmasının önemli olduğu üretim tekniklerinde kullanılırlar. Düşük çözünme hızlı bağlayıcı fazı içeren keçeler ise presle kalıplama tekniğinde kullanılırlar (Akdoğan).



Şekil 6.2 Cam Fiber Keçe Rulosu [8]

Üretilen kompozit malzemelerde cam fiberle birlikte takviye elemanı olarak seçilen balsa ağacının yoğunluğu $80 - 176 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmekte olup, $96 - 144 \text{ kg/m}^3$ arasındaki yoğunluk daha çok kullanılır. Bu tür malzemelerde yaşanan sorun, ağaç içine suyun sızmasından kaynaklanmaktadır. Sızan su, ara malzemenin çürümesine ve cidarlardan ayrılarak, boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Balsa ise, liflerin, cidarlara dikey doğrultuda yönlendirilmiş olması nedeniyle diğer ağaç malzemelerde yaşanan sorunları yaratmayan özellikte bir malzeme olup, suyun cidardan sızmasından itibaren giriş bölgesinde oluşan nemi burada tutarak, yayılmasını engellemektedir. Balsa ağacının kullanım alanları oldukça fazla sayıdadır. Düşük maliyetleri nedeniyle en yaygın olarak kullanılan ara malzemedir. Kesme yükü ve basınç yükü dayanımı yüksektir. Ancak su dayanımı, köpük malzemelere oranla daha düşüktür [8].

Ayrıca üretilen kompozit malzemelerin kalıp yüzeylerine yapışmaması ve kalıptan kolay çıkarılması için de kalıp yüzeylerine vaks ve kalıp ayırıcı sürülmüştür. Kompozit malzemelerin hazırlanmasında kullanılan malzeme ve ekipmanlar Şekil 6.3’de gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Kompozit Malzemelerin Hazırlanmasında Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar

6.2 Kompozit Malzemelerin Üretimi

Deneylerde kullanılan kompozit malzemeler, elle yatırma yöntemi ile laboratuvar şartlarında üretilmişlerdir. Bu yöntem, yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygun olduğundan tercih edilmiştir. Üretim sırasında reçinenin taşmaması ve öngörülen boyutlarda kompozit malzeme üretilebilmesi amacıyla tahtadan kalıp yapılmıştır. Ayrıca kalıbın alt yüzeyi olarak, üretilen kompozit yüzeyinin düzgün olması ve reçine sürülürken kolaylık sağlanması amacıyla cam seçilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Kompozit Malzemeler Üretilirken Kullanılan Kalıp

Kompozit malzemelerin üretimine geçmeden önce kalıp temizlenip, kompozit malzemenin kalıptan kolay ayrılabilmesini sağlamak amacıyla vaks ve kalıp ayırıcı kalıp yüzeylerine uygulanmıştır. Ayrıca 100 ml. polyester reçineye, 1/6 ml %6'lık Co çözeltisi ve 1 ml %1'lik Mek-P (metil etil keton – peroksit) çözeltisi, 100 ml vinilester reçineye ise, 0,2 ml. %6'lık Co çözeltisi ve 2 ml. %1'lik Mek-P çözeltisi katılıp, homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Bu işlemlerden sonra cam fiber keçe kalıba yatırılmış, üzerine reçine sürülmüş ve tekrar bir kat cam fiber malzeme veya balsa ıslatılmış fiberlerin üzerine serilerek işleme devam edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin reçine oranı, çeşitli katlarda cam fiber ve bazı yapılarda balsa da kullanıldığından dolayı yaklaşık %60-90 arasında değişmektedir. İşlem sırasında reçinenin, fiberlere iyi nüfuz etmesine özen gösterilmiştir. Şekil 6.5'de kalıp içinde sertleşmekte olan kompozit malzemeler görülmektedir.



Şekil 6.5 Kalıp İçerisinde Sertleşmekte Olan Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; 1 kat cam fiber keçe + polyester reçine, 1 kat cam fiber keçe + vinilester reçine, 1 kat cam fiber keçe + 1 kat balsa (kalınlık=1,5 mm) + polyester reçine, 1 kat cam fiber keçe + 1 kat balsa (kalınlık=1,5 mm) + vinilester reçine, 2 kat cam fiber keçe + polyester reçine, 2 kat cam fiber keçe + vinilester reçine, 3 kat cam fiber keçe + polyester reçine, 3 kat cam fiber keçe + vinilester reçine, 2 kat cam fiber keçe + 2 kat balsa (kalınlık=1,5 mm) + vinilester, 2 kat cam fiber keçe + 1 kat balsa (kalınlık=1,5 mm) + vinilester olmak üzere 10 farklı çeşitte üretilmiştir.

Üretilen kompozit malzemelerin kalınlık değerleri Çizelge 6.2’de verilmektedir. Ölçümler mikrometre ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.2 Üretilen Kompozit Malzemelerin Kalınlık Değerleri

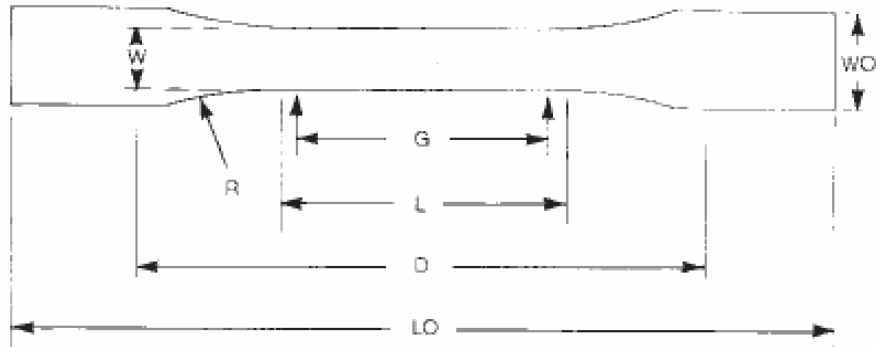
Numune	3 kat fiber + polyester	3 kat fiber + vinilester	2 kat fiber + polyester	2 kat fiber + vinilester	1 kat fiber + polyester	1 kat fiber + vinilester	1 kat fiber + 1 kat balsa + polyester	1 kat fiber + 1 kat balsa + vinilester	2 kat fiber + 2 kat balsa + vinilester	2 kat fiber + 1 kat balsa + vinilester
Kalınlık [mm]	3,35	3,04	2,13	1,82	1,06	0,93	2,56	2,41	5,19	4,20

6.3 Numunelerinin Hazırlanması

Polyester reçine veya vinilester reçine matrisli ve çeşitli katlarda cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli olarak üretilen kompozit malzemeler, deneylerin uygulanabilmesi için uygun form ve yapılarda hazırlanmıştır.

- Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

Çekme deneyi numuneleri, ASTM D 638 “Plastiklerin Gerilme Özelliklerinin Tayini için Standart Test Metodu” ’na göre hazırlanmıştır. Şekil 6.6’de ASTM D 638’e göre çekme numunelerinin boyutları ve Şekil 6.7’de ise hazırladığımız çekme numunelerine ait örnekler gösterilmektedir. Kompozit malzemeler, kalınlıklarına bağlı olarak maket bıçağı veya testereyle kesilip daha sonra taşlanmıştır. En son olarak da kenar ve köşeleri zımparalanarak çekme numunesinin son şekline getirilmiştirlerdir.



Şekil 6.6 ASTM D 638’e Göre Çekme Numunelerinin Boyutları

Şekil 6.6'daki simgelerin anlamları ve değer aralıkları aşağıda verilmektedir;

W (dar kısmın genişliği): 13 mm \pm 0,5

L (dar kısmın uzunluğu): 57 mm \pm 0,5

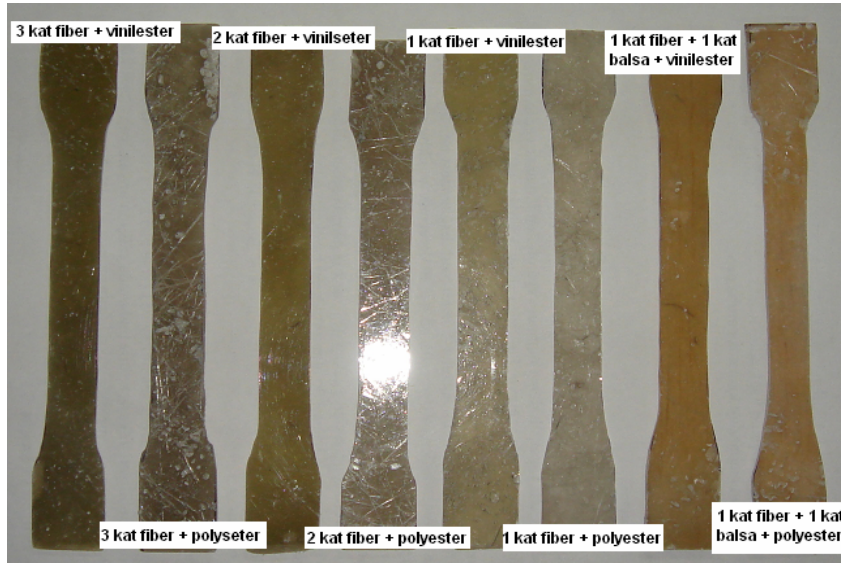
Wo (dış genişlik): min. 19 mm – maks. 25,4 mm

Lo (dış uzunluk): min. 165 mm

G (ölçme uzunluğu): 50 mm \pm 0,25

D (çeneler arası mesafe): 115 mm \pm 5

R (radyus): 76 mm \pm 1



Şekil 6.7 Hazırlanan Çekme Numunelerine Ait Örnekler

- **Mikrosertlik Deney Numunelerinin Hazırlanması**

Mikrosertlik ölçümlerinde kullanılan numuneler; cihazda hassas bir şekilde ölçülebilmeleri, cihaz üzerine koyulan numunenin ölçüm sırasında hareket etmemesi, konulduğu düzleme tam oturması ve çeşitli bölgelerden ölçüm alınabilmesi için boylamasına kesilmiştir ve daha sonra kenarlardan sarkan fiberler 400 numaralı zımpara kağıdı ile zımparalanarak hazır hale getirilmiştir.

- **Mikroyapı İncelemeleri için Numunelerin Hazırlanması**

Mikroyapı incelemelerine hazırlık için, kompozit malzemeden kesilen ufak parçalar, sırasıyla 280, 400 ve 800 numaralı zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra asetonla yüzey silme işlemine tabi tutulmuştur.

6.4 Uygulanan Deneyler

Üretilen kompozit malzemelerden hazırlanan numuneler, çekme ve mikrosertlik deneyleri ile mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur.

6.4.1 Çekme Deneyi

Hazırlanan çekme numuneleri, çekme cihazında 50 mm/dak deney hızında çekilerek Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de verilen akma, çekme ve kopma kuvvetleri, gerilme değerleri ve deformasyon verileri elde edilmiştir. Deney sırasında çenelerdeki boşluğu almak için numunelere 5 N/mm² ön yük değeri uygulanmıştır. Ayrıca üretilen kompozit malzemelere ait özgül dayanım ve özgül modül değerleri de Çizelge 6.5’de verilmektedir.

Çizelge 6.3 Polyester Matrisli Üretilen Kompozit Malzemelerin Çekme Deneyi Verileri

Numune	Akma (R _e)		Çekme (R _m)		Kopma		Gerinim		Elastisite Modülü (E)
	Kuvvet [N]	Sınırı [N/mm ²]	Kuvvet [N]	Dayanımı [N/mm ²]	Kuvvet [N]	Gerilme [N/mm ²]	mm	%	[N/mm ²]
1 kat cam fiber + polyester	476,10	41,50	717,67	62,54	699,67	60,97	2,67	4,85	3396,29
2 kat cam fiber + polyester	1394,67	46,75	2220,00	74,41	2119,33	71,04	2,98	5,42	3575,73
3 kat cam fiber + polyester	2472,40	61,05	3532,00	87,21	3221,67	79,55	4,71	8,56	4249,25
1 kat cam fiber + 1 kat balsa + polyester	547,33	15,84	846,67	24,50	826,00	23,90	4,67	8,48	1921,00

Çizelge 6.4 Vinilester Matrisli Üretilen Kompozit Malzemelerin Çekme Deneyi Verileri

Numune	Akma (R_e)		Çekme (R_m)		Kopma		Gerinim		Elastisite Modülü (E)
	Kuvvet [N]	Sınırı [N/mm ²]	Kuvvet [N]	Dayanımı [N/mm ²]	Kopma [N]	Gerilme [N/mm ²]	mm	%	[N/mm ²]
1 kat cam fiber + vinilester	769,53	61,30	1099,33	87,56	1046,00	83,31	2,91	5,29	3360,67
2 kat cam fiber + vinilester	1476,97	71,04	2303,67	110,81	2027,33	97,52	3,50	6,37	4369,95
3 kat cam fiber + vinilester	2616,83	81,10	3738,33	115,86	3427,00	106,21	4,92	8,94	4610,77
1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester	839,67	25,81	1047,00	32,18	983,33	30,22	5,34	9,72	2082,20
2 kat cam fiber + 2 kat balsa + vinilester	1633,67	22,09	2418,33	32,67	2244,00	30,32	8,60	15,64	1811,32
2 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester	1956,23	34,50	2492,33	43,96	2303,00	40,60	5,67	10,30	2448,33

Çizelge 6.5 Üretilen Kompozit Malzemelerin Özgül Dayanım ve Özgül Modül Değerleri

	1 Kat Cam Fiber + Polyester	2 Kat Cam Fiber + Polyester	3 Kat Cam Fiber + Polyester	1 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Polyester	1 Kat Cam Fiber + Vinilester	2 Kat Cam Fiber + Vinilester	3 Kat Cam Fiber + Vinilester	1 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Vinilester	2 Kat Cam Fiber + 2 Kat Balsa + Vinilester	2 Kat Cam Fiber + 1 Kat Balsa + Vinilester
Özgül dayanım [kNm/kg]	54	62	66	71	81	88	90	87	88,5	97
Özgül modül [MNm/kg]	2,92	2,99	3,23	5,61	3,12	3,48	3,57	5,64	4,91	5,42

6.4.2 Mikrosertlik Deneyi

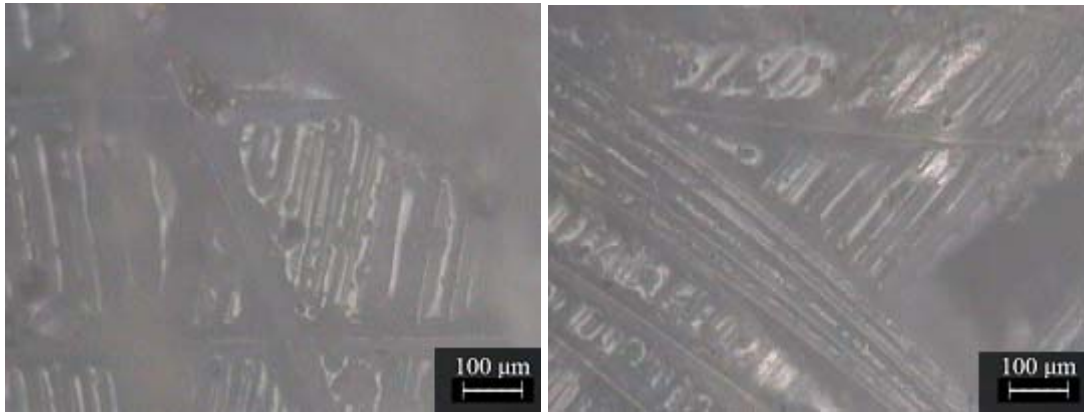
Hazırlanan numunelerin yüzey mikrosertlik ölçümleri, Vickers sertlik ölçüm cihazında 50 g. yük altında 10 sn. tutularak gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait ortalama mikrosertlik değerleri Çizelge 6.6'da verilmektedir.

Çizelge 6.6 Hazırlanan Numunelerin Ortalama Mikrosertlik Değerleri

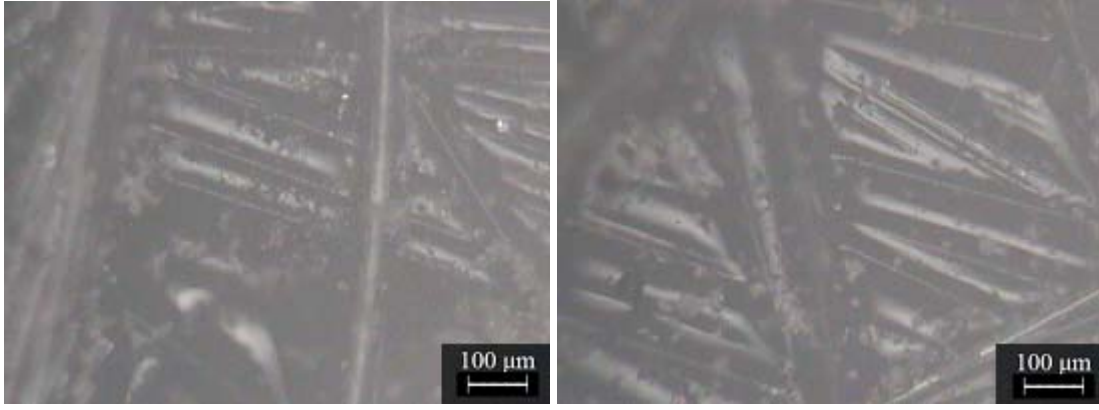
Numune	3 kat fiber + polyester	3 kat fiber + vinilester	2 kat fiber + polyester	2 kat fiber + vinilester	1 kat fiber + polyester	1 kat fiber + vinilester	1 kat fiber + 1 kat balsa + polyester	1 kat fiber + 1 kat balsa + vinilester	2 kat fiber + 2 kat balsa + vinilester	2 kat fiber + 1 kat balsa + vinilester
Mikrosertlik [HV]	17,2	14,9	17,13	16,1	17,32	15,63	17,72	15,55	15,11	15,25

6.4.3 Mikroyapı İncelemesi

Işık mikroskopuyla 100x büyütme altında, polyester matrisli cam fiber keçe takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı resimleri Şekil 6.8'de, vinilester matrisli cam fiber keçe takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.9'da gösterilmektedir.



Şekil 6.8 Polyester Matrisli Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemenin 100x Büyütme Altında Mikroyapı Fotoğrafları



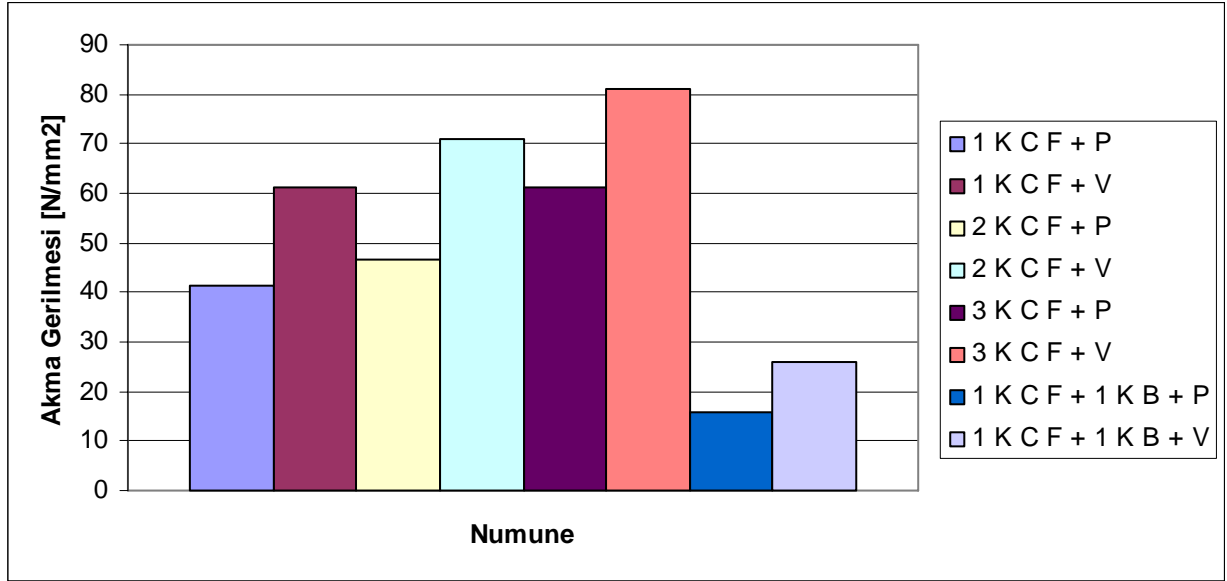
Şekil 6.9 Vinilester Matrisli Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemenin 100x Büyütme Altında Mikroyapı Fotoğrafları

6.5 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

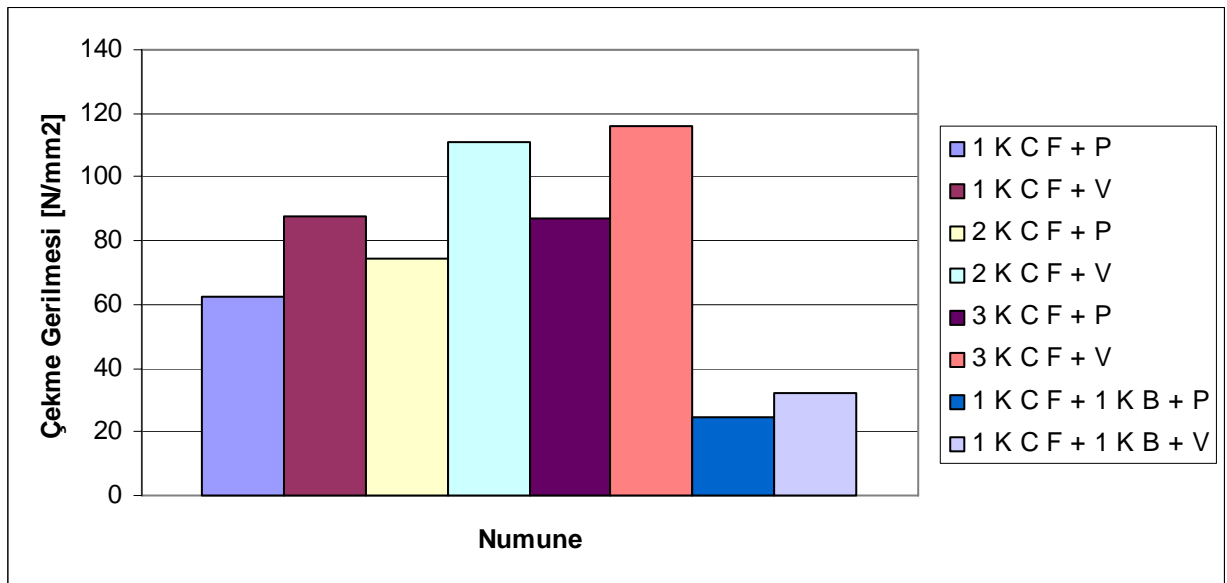
Üretilen kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen çekme ve mikrosertlik deneyleri sonunda elde edilen veriler ve mikroyapı inceleme sonuçlarının irdelenmesi aşağıda verilmiştir.

- **Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi**

Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda; takviye malzemesi olarak ilave edilen cam fiber keçe kat sayısı arttırıldıkça, hem polyester hem de vinilester matrisli kompozit malzemelerin gerilme – gerinme değerlerinin arttığı, cam fiber keçe yanısıra kompozit malzemelere balsa da takviye elemanı olarak kullanıldığında dayanımda düşüş olduğu buna karşılık deformasyon oranında dikkate değer bir artış olduğu Şekil 6.10 – Şekil 6.13’de görülmektedir. İki ve üç katlı yapılarda tek tabakalı yapının katları kadar gerilme değerlerine çıkılamamasının nedeni, tabakalar arası yüzey bölgesinin bulunması ve bu ara yüzeyde oluşan kayma gerilmeleri ile yükün bir tabakadan diğerine aktarılmasıdır. Tabakalar arası bölge kompozit mukavemeti açısından belirleyicidir. Kompozit malzemedan istenilen dayanım, matris malzemesi değiştirilerek (polyester yerine vinilester) ya da cam fiber keçe miktarı arttırılarak sağlanabilmektedir. Balsa ve cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin dayanımlarında düşüş gözlemlenmektedir. Şekil 6.13 incelendiğinde eşit katlarda takviye elemanına sahip vinilester ve polyester matrisli kompozit yapıların gerinme değerleri arasında çok fazla farkın olmadığı söylenebilir.

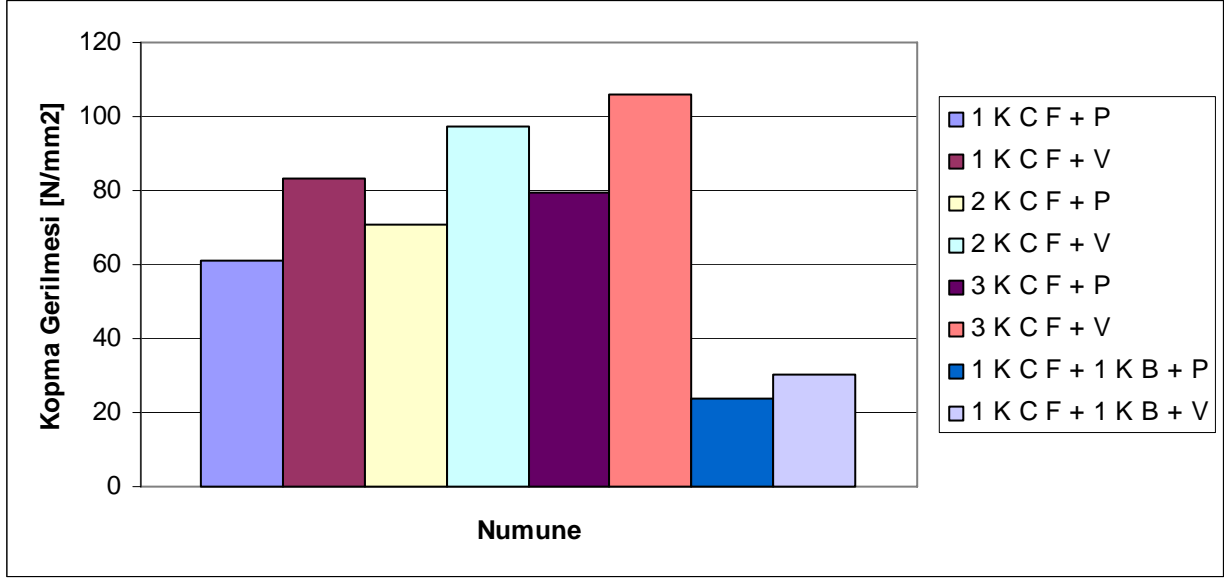


Şekil 6.10 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Akma Gerilmelerinin Karşılaştırılması*

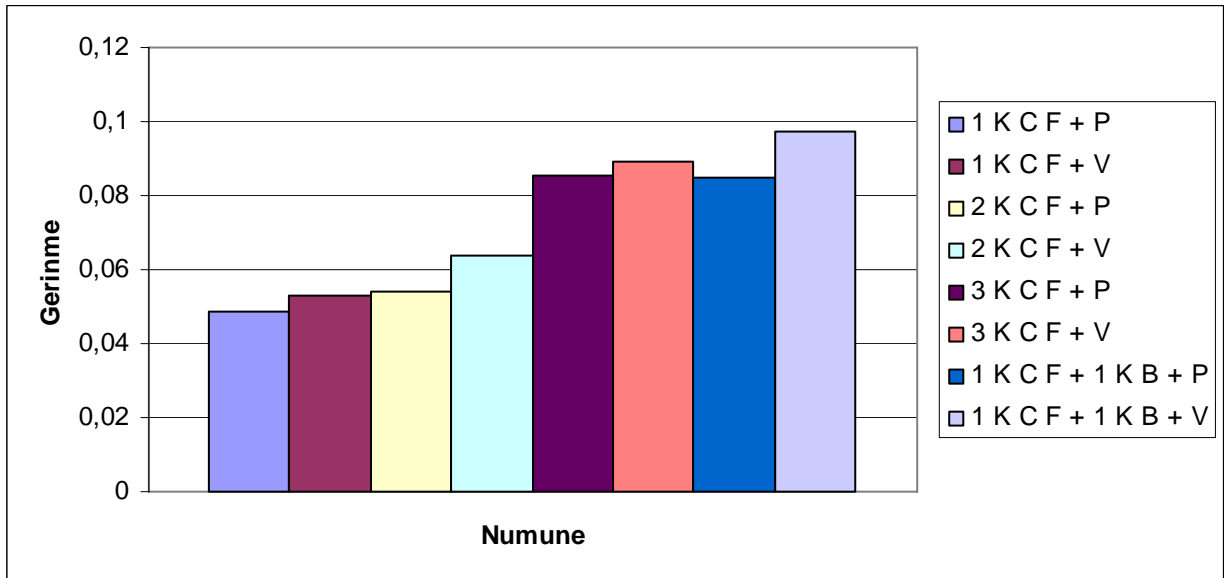


Şekil 6.11 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Çekme Gerilmelerinin Karşılaştırılması*

* 1 K C F + P : 1 kat cam fiber + polyester, 1 K C F + V : 1 kat cam fiber + vinilester, 2 K C F + P : 2 kat cam fiber + polyester, 2 K C F + V : 2 kat cam fiber + vinilester, 3 K C F + P : 3 kat cam fiber + polyester, 3 K C F + V : 3 kat cam fiber + vinilester, 1 K C F + 1 K B + P : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + polyester, 1 K C F + 1 K B + V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester



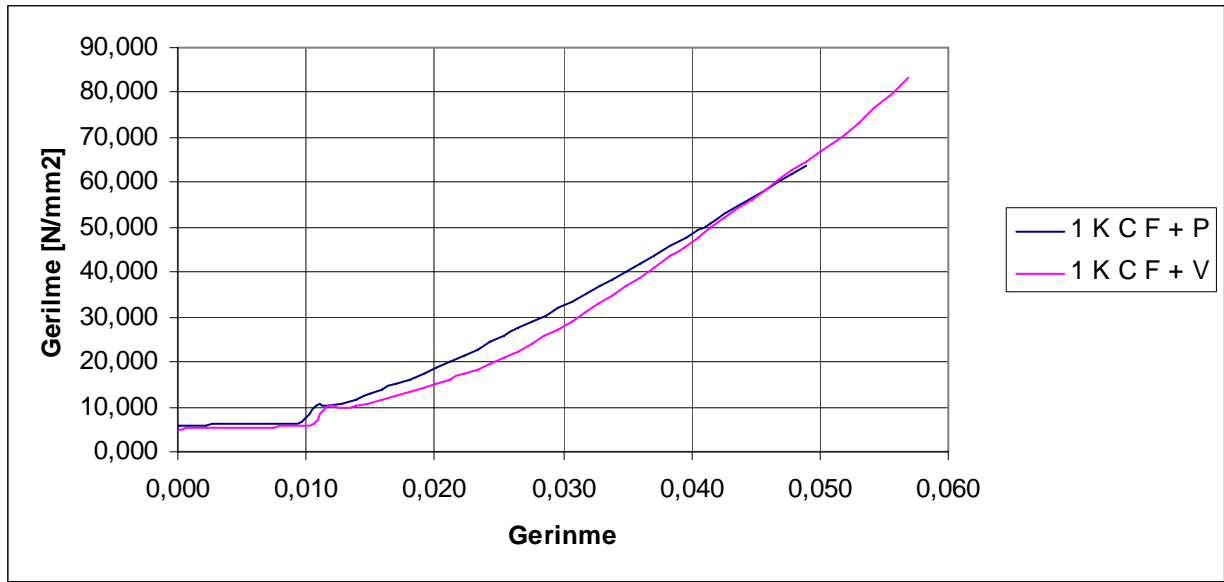
Şekil 6.12 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kopma Gerilmelerinin Karşılaştırılması *



Şekil 6.13 Polyester veya Vinilester Matrisli Çeşitli Katlarda Cam Fiber Keçe ve/veya Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması *

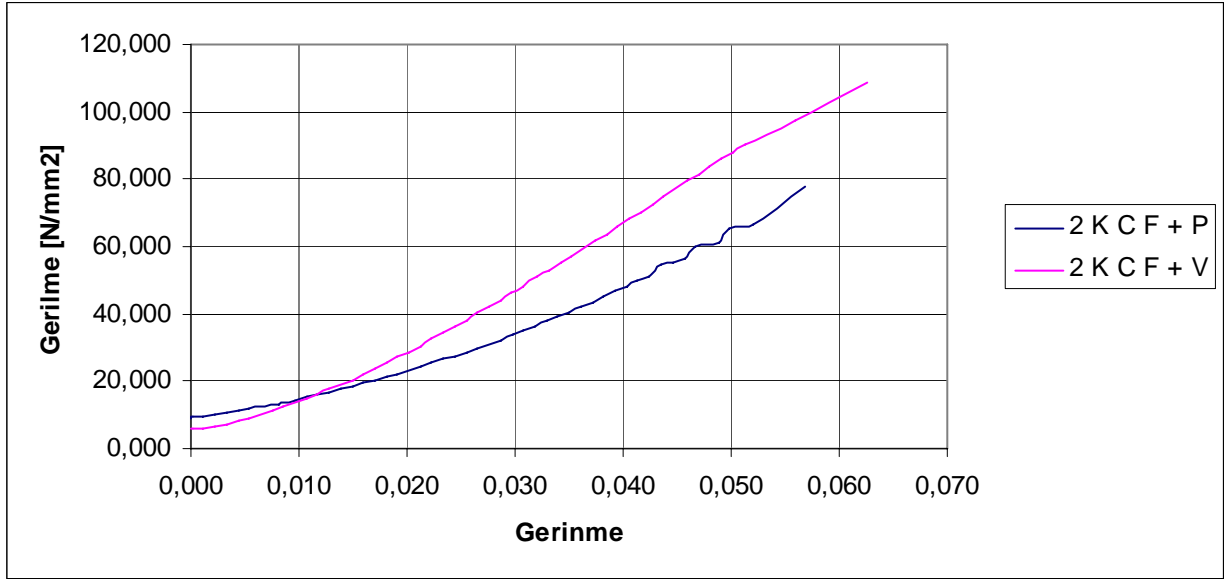
* 1 K C F + P : 1 kat cam fiber + polyester, 1 K C F + V : 1 kat cam fiber + vinilester, 2 K C F + P : 2 kat cam fiber + polyester, 2 K C F + V : 2 kat cam fiber + vinilester, 3 K C F + P : 3 kat cam fiber + polyester, 3 K C F + V : 3 kat cam fiber + vinilester, 1 K C F + 1 K B + P : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + polyester, 1 K C F + 1 K B + V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester

Eşit katlı cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli polyester ve vinilester matrisli kompozit malzemelerinin gerilme – gerinme diyagramları Şekil 14 – Şekil 17’de görülmektedir. Buna göre vinilester matrisli kompozit yapıların, polyester matrisli yapılara göre gerilme ve deformasyon değerlerinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Sadece, cam fiber takviyeli yapıların gerilme – gerinme eğrilerinin daha lineer olduğu görülürken, balsa ve cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin diyagramlarında plastik bölgedeki dalgalanma çekme deneyi sırasında önce balsa daha sonra cam fiber keçe malzemenin kopmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca eğrilerde oluşan bazı süreksizlikler kompozit malzemelerin, elle yatırma yöntemiyle üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere bu yöntemle kompozit malzeme üretilirken, ortamdaki hava işlem sırasında yapı içerisine girerek bazı boşluklar oluşturabilmektedir.

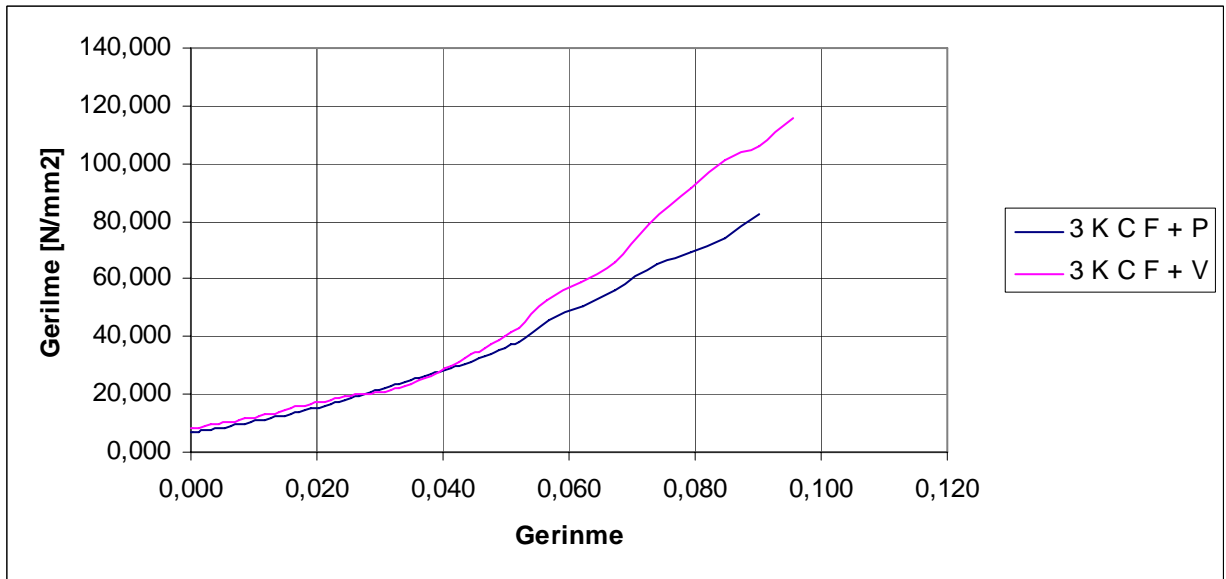


Şekil 6.14 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Bir Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması*

* 1 K C F + P : 1 kat cam fiber + polyester, 1 K C F + V : 1 kat cam fiber + vinilester



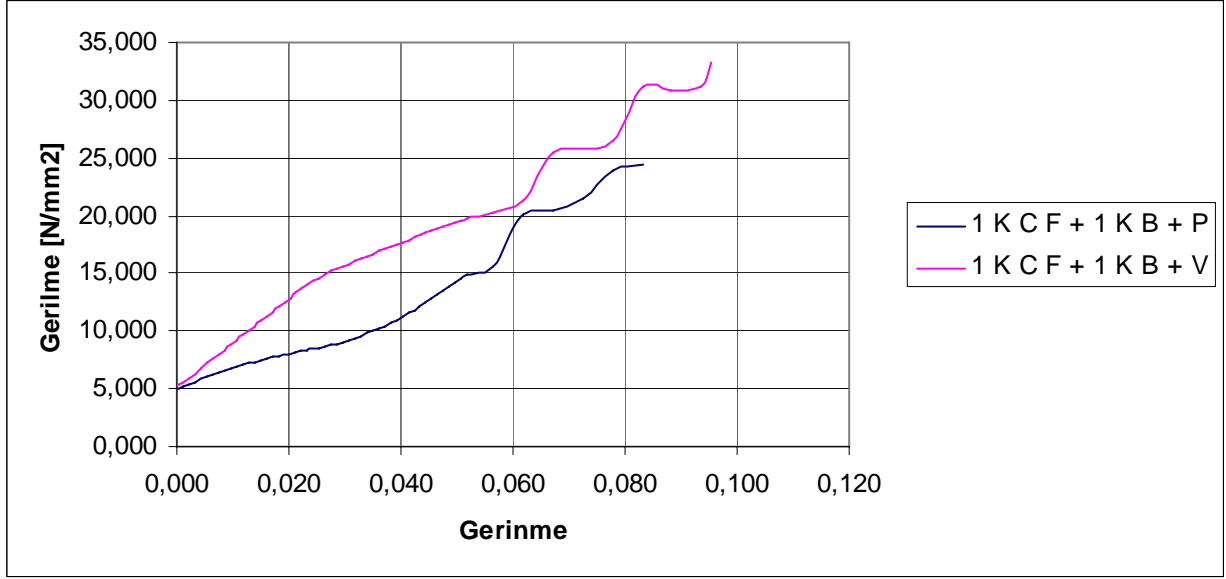
Şekil 6.15 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli İki Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması*



Şekil 6.16 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Üç Kat Cam Fiber Keçe Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması#

* 2 K C F + P : 2 kat cam fiber + polyester, 2 K C F + V : 2 kat cam fiber + vinilester

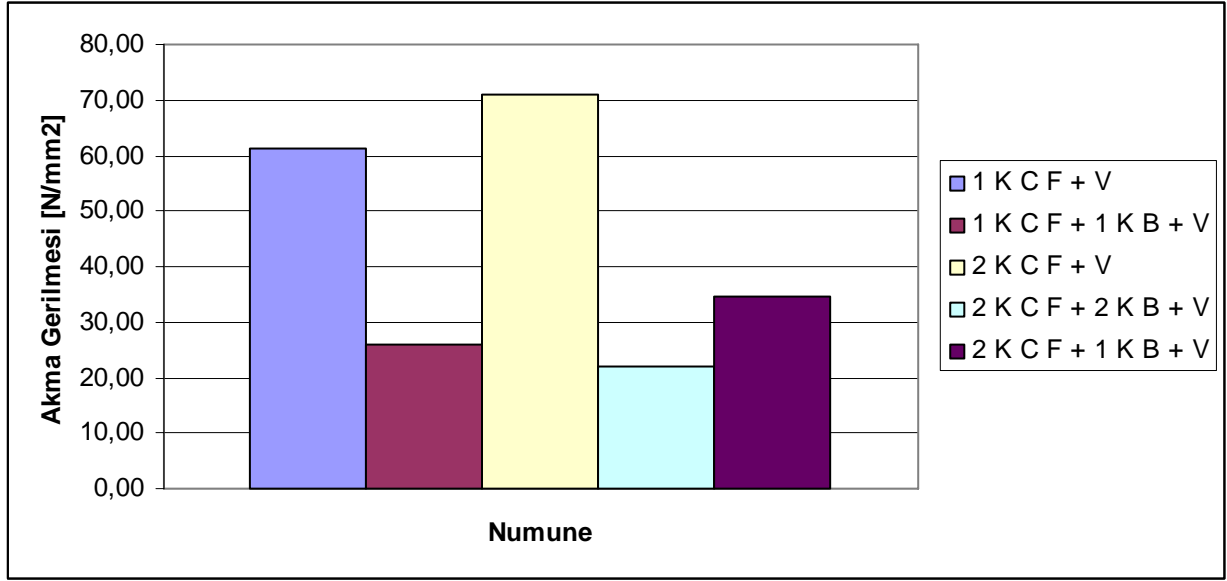
3 K C F + P : 3 kat cam fiber + polyester, 3 K C F + V : 3 kat cam fiber + vinilester



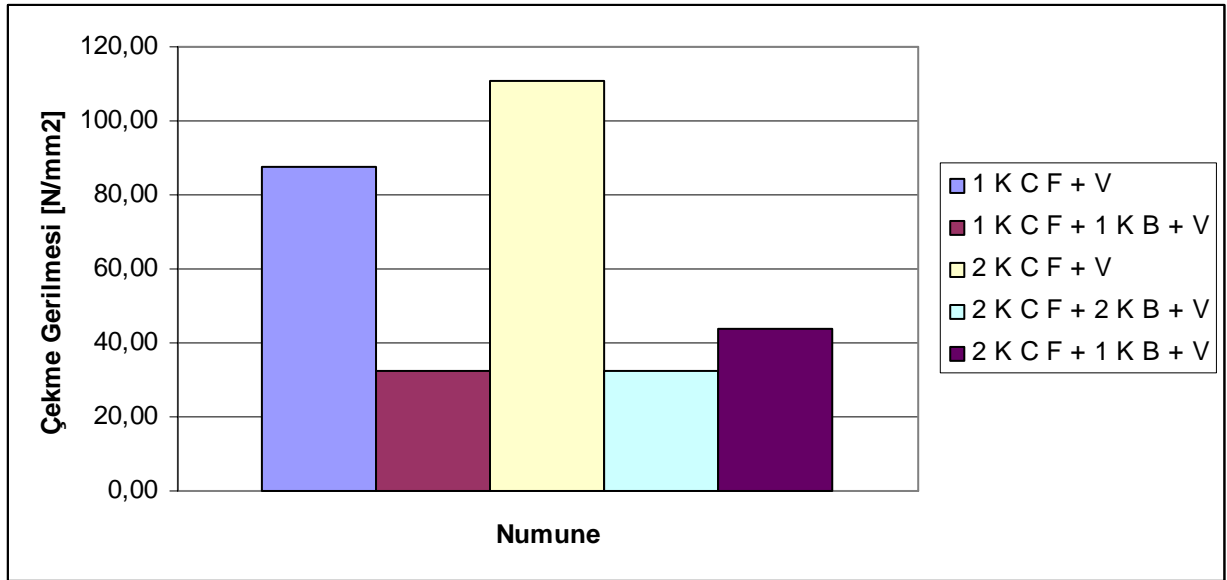
Şekil 6.17 Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Bir Kat Cam Fiber Keçe ve 1 Kat Balsa Takviyeli Kompozit Malzemelerin Gerilme – Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması *

Yapılan deneyler sonucunda vinilester matrisli kompozit malzemelerin gerilme – gerinme karakteristiklerinin, polyester matrisli kompozit malzemelere göre daha üstün olduğu anlaşılmıştır. Şekil 6.18 – Şekil 6.21’de balsa takviyesinin gerilme – gerinme karakteristiklerine etkisi, vinilester matrisli kompozit malzemeler üstünde yapılan deneylere dayanılarak belirtilmektedir. Balsa ve cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin dayanımlarında gözlemlenen düşüş, balsa'nın kompozit malzemenin et kalınlığını arttırmasına rağmen cam fibere oranla düşük dayanıma sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Balsa malzemesi fiyatının ucuz olması nedeniyle, belirli bir et kalınlığına sahip olması gereken kompozit yapılarda dayanımın izin verdiği ölçüde kullanılarak hafiflik sürdürülürken malzemenin maliyetini düşürmek amacıyla takviye elemanı olarak seçilmektedir. Ayrıca, balsa ve cam fiber takviyeli yapıların sadece fiber takviyeli yapılara oranla gerinme değerlerinin fazla olduğu gözlemlenmiştir.

* 1 K C F + 1 K B + P : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + polyester, 1 K C F + 1 K B + V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester

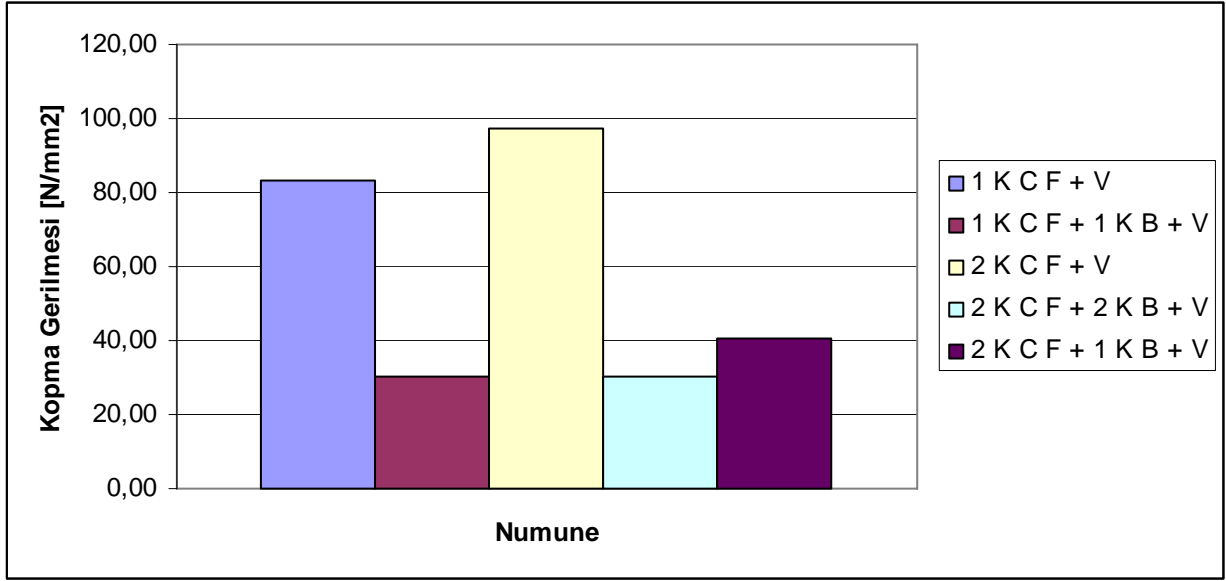


Şekil 6.18 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Akma Gerilmesine Etkisi*

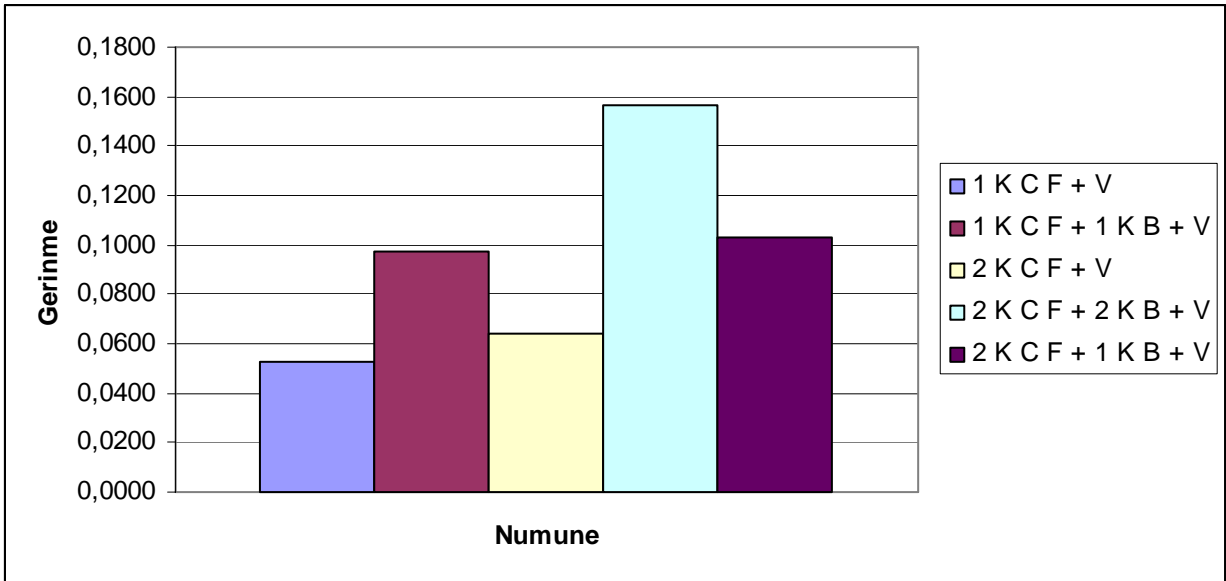


Şekil 6.19 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Çekme Gerilmesine Etkisi*

* 1 KCF + V : 1 kat cam fiber + vinilester, 1 KCF + 1 KB + V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester,
 2 KCF + V : 2 kat cam fiber + vinilester, 2 KCF + 2 KB + V : 2 kat cam fiber + 2 kat balsa + vinilester,
 2 KCF + 1 KB + V : 2 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester



Şekil 6.20 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Kopma Gerilmesine Etkisi*

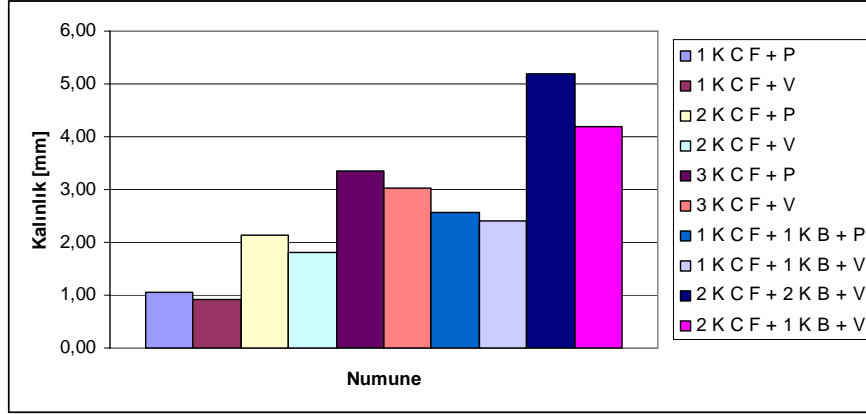


Şekil 6.21 Vinilester Matrisli Yapıda Balsa Takviyesinin Gerinme Değerine Etkisi*

* 1 K C F + V : 1 kat cam fiber + vinilester, 1 K C F + 1 K B + V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester,
2 K C F + V : 2 kat cam fiber + vinilester, 2 K C F + 2 K B + V : 2 kat cam fiber + 2 kat balsa + vinilester,
2 K C F + 1 K B + V : 2 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester

• Üretilen Polyester Matrisli ve Vinilester Matrisli Kompozit Malzemelerin Kalınlık Karşılaştırılması

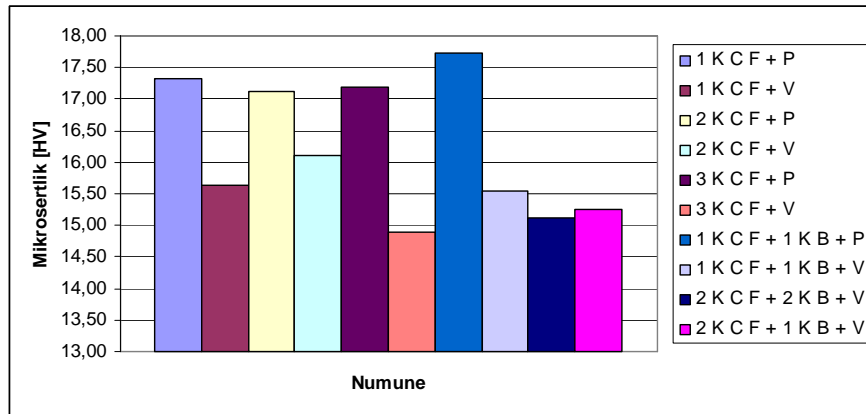
Şekil 6.22'den anlaşıldığı üzere polyester matrisli kompozit malzemeler, vinilester matrislilere göre maks. 0,5 mm daha kalındır. Bunun nedeni ise, vinilester reçinenin viskozite ve yoğunluk değerlerinin daha düşük olmasından dolayı fiber malzemelerin aralarına daha iyi girebilmesidir.



Şekil 6.22 Üretilen Kompozit Malzemelerin Kalınlıklarının Karşılaştırılması *

• Mikrosertlik Deneyi İrdelenmesi

Kat sayısının artırılmasının veya yapıya takviye eleman olarak balsa eklenmesinin mikrosertlik değerlerinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği Şekil 6.23'den anlaşılmaktadır. Ölçümler genel olarak kullanılan matris malzemesinin sertliğini yansıtmaktadır.

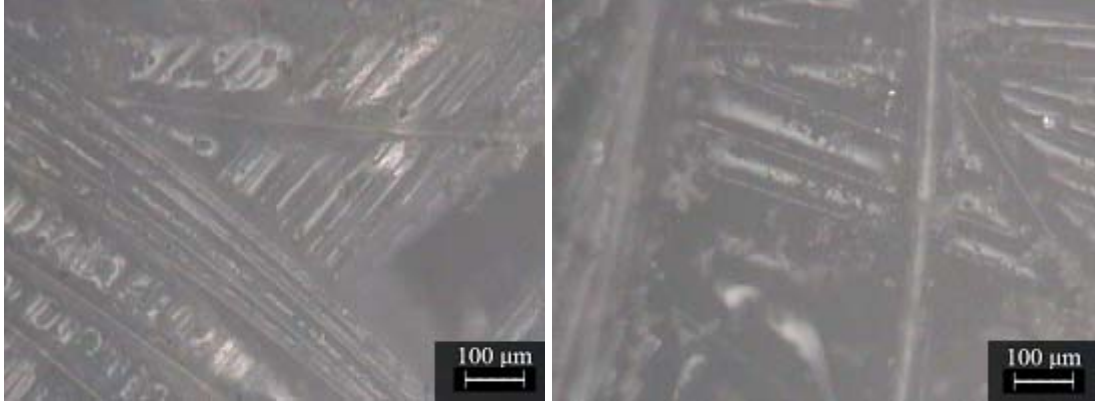


Şekil 6.23 Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikrosertlik Değerlerinin Karşılaştırılması *

* 1 KCF+P : 1 kat cam fiber + polyester, 1 KCF+V : 1 kat cam fiber + vinilester, 2 KCF+P : 2 kat cam fiber + polyester, 2 KCF+V : 2 kat cam fiber + vinilester, 3 KCF+P : 3 kat cam fiber + polyester, 3 KCF+V : 3 kat cam fiber + vinilester, 1 KCF+1KB+P : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + polyester, 1 KCF+1KB+V : 1 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester, 2 KCF+2KB+V : 2 kat cam fiber + 2 kat balsa + vinilester, 2 KCF+1KB+V : 2 kat cam fiber + 1 kat balsa + vinilester

- **Mikroyapı İncelenmesi**

Polyester matrisli ve vinilester matrisli cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin ışık mikroskopuyla 100x büyütme altında çekilen mikroyapı fotoğraflarında, polyester reçineye göre daha düşük viskozite ve yoğunluğa sahip vinilester reçinenin fiberleri daha iyi ıslatarak daha sıkı bir şekilde bir arada tuttuğu Şekil 6.24’de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 6.24 Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Fotoğrafları (100x) a) Polyester Matrisli Yapı, b) Vinilester Matrisli Yapı

6.6 Polyester Matrisli Cam Fiber ve Balsa Takviyeli Kompozit Malzemedan Rüzgar Türbini Kanat Modelinin Üretilmesi

Profil kiriş uzunluğu 400 mm olan rüzgar türbini kanat modeli, matris malzemesi olarak polyester reçine ve takviye elemanı olarak 4 kat cam fiber keçe ve 1 kat balsa (kalınlık < 1 mm) seçilerek üretilmiştir.

6.6.1 Rüzgar Türbini Kanat Modelinin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Kompozit malzemedan kanat modelinin üretilmesi için modele ait kalıp imal edilmiştir. Bu bölümde bu kalıbın ve üretilen kanat modelinin malzemelerinden bahsedilmektedir.

6.6.1.1 Kalıp Malzemesi

Kalıp malzemesi olarak 5083 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Çizelge 6.7’de 5083 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu verilmektedir. Çizelge 6.8’de ise bu alaşıma ait mekaniksel karakteristikleri verilmiştir.

Çizelge 6.7 5083 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu [9]

Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
Minimum	-	-	-	4	0,1	0,05	-	-
Maksimum	0,4	0,4	0,1	4,9	1	0,25	0,25	0,15

Çizelge 6.8 5083 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Karakteristikleri [9]

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Uzama	Brinell Sertlik	Yoğunluk	Isı İletkenliği	Elektrik İletkenliği	Elastisite Modülü	Lineer Isıl Genleşme	Elastisite	Kesme Modülü
min. 290 MPa	min. 145 MPa	maks. %22	min. 70 HB	2,66 kg/dm ³	110 – 120 W/mK	170 m/Ωmm ²	7100 N/mm ²	23,8 10 ⁻⁶ /K	70 GPa	min. 170 MPa

6.6.1.2 Kanat Modeli Malzemesi

Kanat modelinin yapımında, rüzgar türbini endüstrisinde kullanılan fiber türlerinden biri olan cam fiber keçe kompozit takviye elemanı ve bahsedilen endüstride ve genel olarak kompozit malzemelerin üretilmesinde sıklıkla kullanılan polyester reçine matris malzemesi olarak seçilmiştir. Ayrıca balsa malzemesi, rüzgar türbin endüstrisinde kullanıldığı gibi maliyeti düşürmek, deformasyon oranını arttırmak ve kompozitin hafifliğinin sürdürülmesi amacıyla ikinci takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. 100 ml polyester reçineye, jelleşme süresinin kısalması amacıyla hızlandırıcı olarak 1/6 ml %6'lık Co çözültisi ve sertleşmenin gerçekleşmesi için 1 ml %1'lik Mek-P (metil etil keton – peroksit) çözültisi katılmıştır.

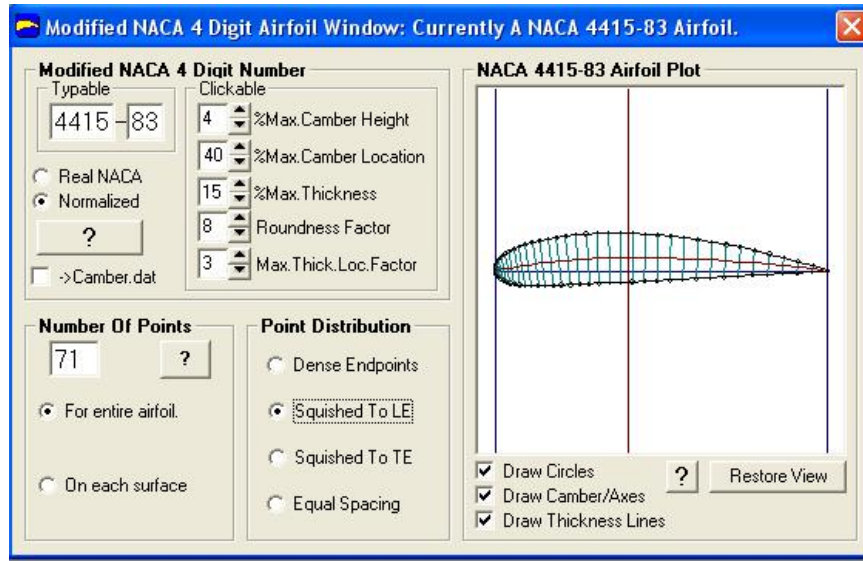
6.6.2 Rüzgar Türbini Kanat Modeli Üretimi

Rüzgar türbini kanat modelinin üretilmesinden önce bilgisayar ortamında kanat modelinin kalıbı tasarlanıp, CNC freze tezgahında alüminyum malzemeden imal edilmiştir. Daha sonra kanat modeli bu kalıp kullanılarak elle yatırma yöntemiyle üretilmiştir.

6.6.2.1 Kanat Kalıbının Tasarım ve İmalatı

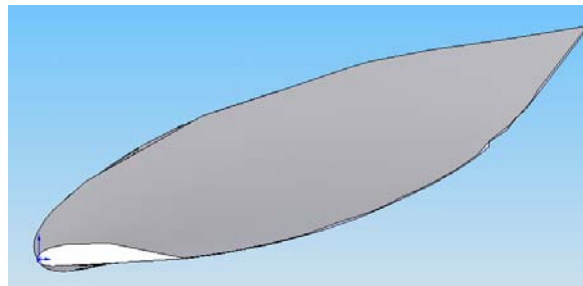
Rüzgar türbini kanat modelinin kalıbına ait çizimler, SolidWorks çizim programı kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. İşletme bazlı elektrik üretiminde kullanılması düşünülen rüzgar türbininin kanat profili olarak, literatürde en iyi profil olarak kabul edilen NACA 4415-83 seçilmiştir (Eker ve Vardar). Rüzgar santrali amaçlı türbinlerden farklı olarak, türbin kanat açılarının türbinin çalışması esnasında sürekli sabit olduğu göz önünde tutulmuştur. Bu profil DesignFoil programıyla belirlenip, SolidWorks programına aktarılmıştır. Şekil 6.25'de NACA

4415-83 kanat profilinin DesignFoil programında seçimi gösterilmektedir. Burada; %Max. Chamber Height: %Maks. Dışbükeylik Yüksekliği, %Max. Chamber Location: %Maks. Dışbükeylik Konumu, %Max. Thickness: %Maks. Kalınlık, Roundness Factor: Yuvarlaklık Faktörü, Max. Thick. Loc. Factor: Maks. Kalınlık Konum Faktörü, Number of Points: Nokta Sayısı, For entire airfoil: Tüm kanat profili için, On each surface: Her yüzeyde, Point Distribution: Nokta Dağılımı, Dense Endpoints: Uç Noktalar Yoğun, Squished To LE: Yuvarlak Uçta Yoğun, Squished To TE: Sivri Uçta Yoğun, Equal Spacing: Eşit Dağılım, Draw Circles: Profil Üstündeki Daireleri Göster, Draw Camber/Axes: Dışbükeyi/Eksenleri Göster, Draw Thickness Lines: Kalınlık Hatlarını Göster anlamına gelmektedir.

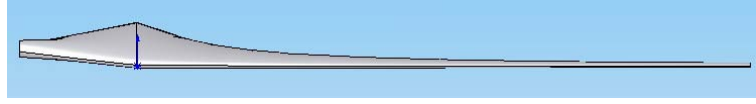


Şekil 6.25 NACA 4415-83 Kanat Profilinin DesignFoil Programında Seçimi

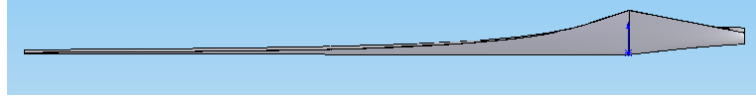
DesignFoil'de hazırlanıp SolidWorks çizim programına profil kiriş uzunluğu 400 mm olan bir rüzgar türbini kanat modeline ait olacak şekilde ölçeklendirilerek aktarılan NACA 4415-83 kanat profili, bu programda öncelikle 3 boyutlu rüzgar türbini rotor kanadı modeline dönüştürülmüştür. Bu kanat modelinin 3 boyutlu çiziminin önden görünümü Şekil 6.26'da, soldan görünümü Şekil 6.27'de, sağdan görünümü Şekil 6.28'de, üstten görünümü Şekil 6.29'da ve izometrik görünümü Şekil 6.30'da gösterilmektedir.



Şekil 6.26 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Önden Görünümü



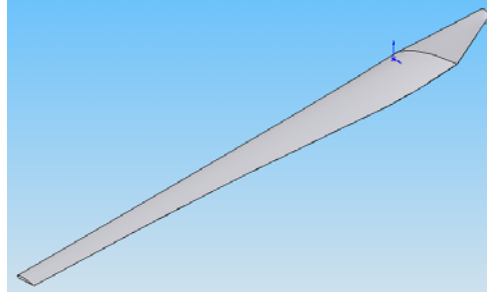
Şekil 6.27 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Soldan Görünümü



Şekil 6.28 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Sağdan Görünümü

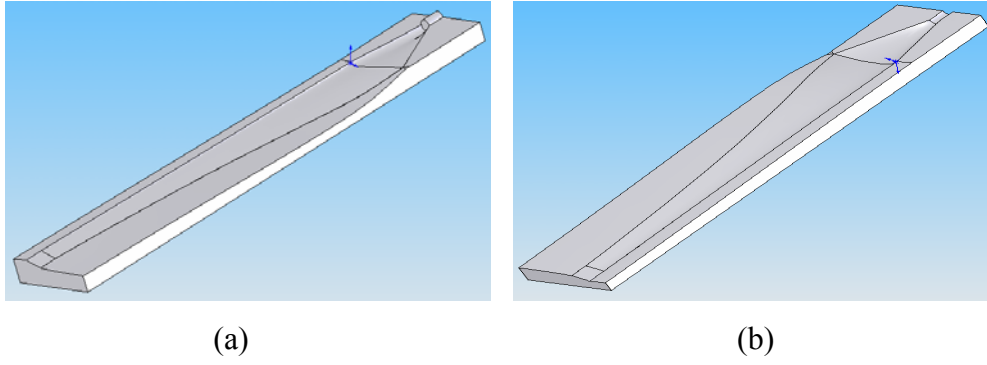


Şekil 6.29 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin Üstten Görünümü



Şekil 6.30 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olan Kanat Modelinin İzometrik Görünümü

Kanat modelinin 3 boyutlu çizim işlemleri tamamlandıktan sonra, bilgisayar ortamında modelin kalıbı iki parça olarak tasarlanmıştır. Şekil 6.31’de kanat modelinin kalıbına ait bilgisayar ortamında tasarım resimleri görülmektedir.



Şekil 6.31 Kanat Modelinin Kalıbına Ait Bilgisayar Ortamında Tasarım Resimleri a) Alt Kalıp, b) Üst Kalıp

Kanat modeline ait kalıbın bilgisayar ortamında çizilmesinden sonra, bir CAM yazılımıyla (Auton CAM programı) takım yolları çıkartılıp CNC freze ile kalıp işlenmiştir. En son olarak da üretilen kalıp yarılarının yüzeyleri zımparalanarak kompozit malzeme üretimine hazır hale getirilmişlerdir. Şekil 6.32’de üretilen kalıp yarıları görülmektedir.



Şekil 6.32 Üretilen Kalıp Yarıları

6.6.2.2 Kompozit Kanat Modeli Üretimi

Kalıp yarıları üretildikten sonra, kanat modelinin her iki yarısı ayrı ayrı elle yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Şekil 6.33 ve Şekil 6.34’de kanat modelinin elle yatırma yöntemiyle üretiminde bazı safhalar gösterilmektedir.



Şekil 6.33 Cam Fiber Keçeye Sürülen Polyester Reçinenin Jelleşmesi



Şekil 6.34 Her İki Model Yarısının Etüv’de Kürülenmesinden Önce Laboratuar Koşullarında Bekletilmesi

Elle yatırma işlemi sırasında, her kat fiber serildikten sonra reçine fibere iyice yedirilmiş ve daha sonraki katın serilme işlemine geçilmiştir. Balsa üzerine de reçine sürülmüştür ve balsa iki cam fiber arasına yerleştirilmiştir. Kanat modelinin her iki yarısı, elle yatırma işlemleri bittikten 1 saat sonra, dayanımı arttırmak ve jelleşme süresini azaltmak için Etüv’de 75 °C’de 2 saat kürlenmiştir. Kürleme işleminin ardından model yarıları, polyester reçineyle birbirine yapıştırılmışlardır ve bu işlemden sonra da model yüzeyi zımparalanarak yüzey kalitesi arttırılmıştır. Şekil 6.35’de profil kiriş uzunluğu 400 mm olacak şekilde üretilen kanat modeli gösterilmektedir.



Şekil 6.35 Profil Kiriş Uzunluğu 400 mm Olacak Şekilde Üretilen Kanat Modeli

6.6.3 Üretilen Modelden Elde Edilen Gücün Hesaplanması

Rüzgardan elde edilecek güç;

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A V^3, \text{ [Watt]} \quad (6.1)$$

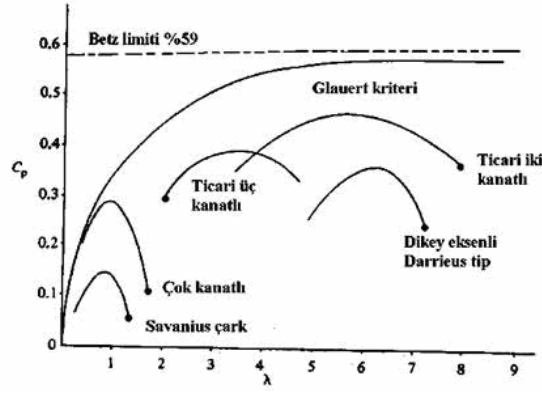
formülüyle hesaplanmaktadır. Burada;

A (kanat süpürme alanı): 502654,82 mm²

ρ : 1,2 kg/m³ (20 °C, 1 bar ve % 50 nem durumunda havanın yoğunluğu)

V: 5 m/s (Türkiye şartlarında ortalama rüzgar hızı)

C_p: 0,35 (Şekil 6.36’dan 3 kanatlı ticari amaçlı rüzgar türbinleri için seçilmiştir)



Şekil 6.36 Güç Katsayısı C_p 'nin Kanat Uç Hız Oranı λ 'ya Göre Değişimi [3]

Bu değerler Denklem 6.1'de yerine konulduğunda üretilen rüzgar türbini kanat modelinden yaklaşık olarak elde edilebilecek güç,

$$P = 0,35 \times 0,5 \times 1,2 \times (502654,82 \cdot 10^{-6}) \times 5^3$$

$P \approx 26,4$ Watt olarak bulunur.

Rüzgardan elde edilecek tork ise;

$$T = 0.5 \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi r^3 V^2, \text{ [N.m]} \quad (6.2)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Burada;

r (türbin yarıçapı): 430 mm (modelin giriş uzunluğu + rotor mesafesi)

λ (uç hız oranı): 3,6 (Şekil 6.36'dan 3 kanatlı ticari amaçlı rüzgar türbinleri için seçilmiştir)

Bu değerler Denklem 6.2'de yerine konulduğunda üretilen rüzgar türbini kanat modelinden dönen mile yaklaşık olarak aktarılacak tork,

$$T = 0.5 \frac{0,35}{3,6} 1,2 \pi 0,43^3 5^2$$

$T \approx 0,364$ N.m olarak bulunur.

7. SONUÇ

Rüzgar enerjisi, çağımızın gelişmeye ve kullanıma en müsait yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Özelliği gereği çevreye en az zarar veren ve dış maliyetleri en düşük enerji kaynağıdır. Rüzgar santrali maliyetleri ve rüzgar enerjisi fiyatları düzenli olarak düşmektedir. Rüzgar hızları, amortisman süresi, santral maliyetleri her yerde farklı olduğundan rüzgar enerjisinin fiyatını belirlemede tek bir unsur bulunmamaktadır. Ancak iyi rüzgar alan yerlerde mevcut rüzgar enerjisi fiyatları diğer birçok enerji kaynaklarının fiyatları ile baş edebilecek düzeydedir. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren teknoloji maalesef büyük sermaye gerektirmektedir, ancak yakıt ve işletme giderlerinin çok düşük olduğu da bir gerçektir. Bu aşamada finansman koşullarının iyi olması rüzgar enerjisinden elde edilecek elektrik enerjisinin diğer bütün bilinen enerji kaynaklarından elde edilenden çok daha ucuza mal edileceğini göstermektedir.

Çalışmada; endüstride kullanılan türbin kanat malzemelerinden seçilen vinilester matrisli ve polyester matrisli cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli kompozit malzemelerin çekme karakteristikleri incelenmiştir. Hangi matris malzemesinin iç yapı içerisinde daha iyi dağılım gösterdiği ve fiberleri daha iyi ıslattığını anlayabilmek için mikroyapı resimleri çekilmiştir. Takviye malzemesi cinsi ve ilave miktarı aynı kalmak koşuluyla matris malzemesinin, kompozit malzemenin mikrosertliğine etkisini anlayabilmek için vinilester matrisli ve polyester matrisli kompozit malzemelerin mikrosertlik değerlerine bakılmıştır.

- Çekme deneyleri sonucunda; vinilester matrisli cam takviyeli plastiklerin çekme dayanımlarının ve deformasyon oranlarının, polyester matrisli cam takviyeli plastiklere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak çalışmakta olan ve üretimi gerçekleştirilen rüzgar türbini rotor kanatlarında; 3 m'e kadar rotor kanatlarında matris malzemesi olarak polyester reçine gerekli dayanımı sağladığından maliyeti düşürmek için tercih edilmektedir. Fakat 3 m'den daha büyük kanatların imalatında polyester reçinelerden daha dayanımlı vinilester veya epoksi reçinelerin matris malzemesi olarak kullanılması gerekmektedir.
- Cam fiber keçe miktarı arttırıldıkça, üretilen kompozit malzemelerin matris malzemesinden bağımsız olarak dayanım ve gerinim değerleri artmaktadır.

- Cam fiber ve balsa takviyeli yapıların; çekme dayanımlarının balsa kullanılmasından dolayı düştüğü fakat deformasyon oranlarının oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda balsa'nın maliyet ve hafiflik avantajından faydalanmak amacıyla, balsa malzemesinin kompozit malzemede meydana getirdiği deformasyon artışı ve dayanım düşüşü değerlerini optimum bir seviyeye çekmek amacıyla cam fiber malzemeler balsa malzemeye oranla daha fazla kullanılmaktadır. Cam fiber ana takviye eleman ve balsa ikinci takviye eleman olacak şekilde üretilen sandviç yapıli kompozit malzemeler, rüzgar türbini rotor kanatlarında istenilen çekme ve deformasyon özelliklerine sahiptirler. Yapılan deneyler sonucunda da görülmüştür ki, vinilester matrisli 2 kat cam fiber keçe ve 1 kat balsa takviyeli kompozit malzemelerin dayanım değerleri eşit katlarda balsa ve cam fiber keçe kullanılan yapılara oranla daha üstün çıkmıştır.
- Mikroyapı incelemeleri sonucunda; polyester reçineye oranla daha düşük viskozite ve yoğunluk değerlerine sahip olan vinilester reçinenin fiberleri daha iyi ıslattığı gözlemlenmiştir. Vinilester reçinenin bu iyi ıslatma özelliği, vinilester matrisli kompozit malzemelerin dayanımlarının polyester matrisli kompozit malzemelere göre daha iyi olmasını sağlamıştır.
- Mikrosertlik deneyleri sonucunda; takviye malzemelerin mikrosertlik değerlerine etki etmediği genel olarak mikrosertliğin matris malzemesine bağıli olarak değiştiği anlaşılmıştır. Polyester reçine, vinilester reçineye göre daha sert olduğundan; polyester matrisli kompozit malzemelerin mikrosertlik değerlerinin, vinilester matrisli kompozit malzemelerin mikrosertlik değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akdoğan A. ve Eker B., “Tarım Mühendisliğinde Plastik Matriksli Kompozit Malzemelerin Kullanımı”, MakinaTek, Sayı 65, 2003
- Akdoğan A., “YTU Kompozit Malzemeler Ders Notları”, 2004
- Berthelot Jean-Marie, “Composite Materials, Mechanical Behavior and Structural Analysis”, Nisan 1997
- Dan A. ve McVeigh J., “Wind Turbine-Materials and Manufacturing Fact Sheet”, Princeton Energy Resources International, LLC, 2001
- Eker B., “Rüzgar Türbini Tesis Yeri Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Kriterler”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildirileri’07, 23-24 Kasım 2007
- Eker B., Akdoğan A. ve Vardar A., 2006 “Using of Composite Material in Wind Turbine Blades”, Journal of Applied Sciences 6 (14): 2917-2921
- Eker B., Akdoğan A. ve Vardar A., “Choosing Suitable Material for Wind Turbine Construction”, Agricultural Engineering Sempodium (AgEng'2004), Leuven, Belçika, 2004
- Eker B., ve Vardar A., “Mathematical Modelling of Wind Turbine Blades Through Volumetric View”, Wind and Structures, Vol 9; Part 6, Pages 493-503, South Korea, 2006
- Enercon Wind Turbines Product Overview, 2006
- Ertürk E., “Rüzgar Enerjisi”, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi, 2005
- Financial Times Gazetesi, Companies&Markets eki, 1999
- Hansen L.H., Madsen P.H., Blaabjerg F., Christensen H.C., Lindhard U. ve Eskildsen K., “Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines,” The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001
- Herakovich C. T., “Mechanics of Fibrous Composites”, University of Virginia, 1997
- Marcus R., “Composites Turn the Blades”, Reinforced Plastics, April 2007
- Mensch J., “Modeling and Analysis of a Wind Turbine Blade with Active Profile Control Using a Shape Memory Alloy”, Stevens Institute of Technology, 2005
- National Academy Press, Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology, 1991
- Onat C. ve Çetin Ş., “Rüzgar Tünelindeki Kanat Profilinin Dikey Hareketinin Modellenmesi”, Mühendis ve Makina, Sayı 522, 2003
- Onat C., Kepçeler T. ve Orgül B.O., “Rüzgar Türbini Kanatlarının Katı Modellenmesi”, Mühendis ve Makina, Sayı 533, 2004
- Patel M. R., “Wind and Solar Power Systems”, 1999
- Poliya, “Polyester, Vinilester ve Jelkot Seçim Kılavuzu”, 2007

Söylemez O., “Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemlerinin Etüdü”, YTÜ Yüksek Lisans Tezi, Tez Danışmanı Doç. Dr. Şükrü Bekdemir, İstanbul, 2005

Şen Z., “Terrain Topography Classification for Wind Energy Generation”, 1999

Şen Z. ve Şahin A.D., “Regional Assesment of Wind Power in Western Turkey By The Cumilative Semiveriogram Method”, Renewable Energy, 1997

Tuncer K. K., “Rüzgar Enerjisi Teknolojileri ve Kullanımının Dünyada ve Ülkemizdeki Gelişimi”, 1999

Tümerdem O., “Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, YTÜ Yüksek Lisans Tezi, Tez Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Burhan Sungu, İstanbul, 2002

Vardar A. ve Eker B., “Rüzgar Türbinlerinde Kompozit Malzemelerin Kullanım Olanaklarının Araştırılması ”, MakinaTek Sayı 94, Ağustos 2005

Walker J. F. ve Jeckins N., “Wind Energy Technology”, 1997

İNTERNET KAYNAKLARI

1. www.windpower.org
2. www.ifb.uni-stuttgart.de
3. www.melikedemir.com
4. www.ewea.org
5. www.gyte.edu.tr
6. www.youthforhab.org.tr
7. www.enercon.de
8. www.camelyaf.com.tr
9. www.referansmetal.com
10. www.ressiad.org.tr

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	27.02.1983	
Doğum yeri	Fatih, İstanbul	
Lise	1997 – 2001	Eyüp Lisesi
Lisans	2001 – 2005	Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006 – Devam	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Ana Bilim Dalı