



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Rüzgar Türbin Kanatları İçin Kompozit Malzeme
Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Yüksek Lisans Tezi

Ad Soyadı: Ozan KEKÜL

Yıl: 2017

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ozan KEKÜL

20152108007

2017

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI İÇİN KOMPOZİT
MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan KEKÜL

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

Aralık 2017

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI İÇİN KOMPOZİT
MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan KEKÜL

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 22/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Hakan ADATEPE
Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr.
Henifi ÇİNİCİ
Üye

Doç. Dr.
Nihat TUĞLUOĞLU
Üye

Prof. Dr.
Başak TAŞELİ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ozan KEKÜL

22 / 12 / 2017

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın tüm aőamalarında her türlü bilimsel desteği sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Nihat TUğLUOğLU' na, bilgi birikimi ve değerli görüőleri ile katkı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Yusuf ARMAN' a ve Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin üretiminde desteklerini esirgemeyen Fibermak Mühendislik Makine Kalıp Kompozit Sanayi Tic.LTD.ŞTİ yetkilisi Sayın Tolga DOğAN' a sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Ek olarak çalışma arkadaşlarım Makine Yüksek Mühendisi Mahmutcan KARSLI ve Makine Mühendisi Samet YAVUZ 'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalıőmam sırasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ailem ve eőime de sonsuz sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Bu tez alıőması Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Baőkanlıęınca desteklenmiőtir. Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Baőkanlıęına (Proje No: FEN-BAP-C-160317-06) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	X
SUMMARY	XI
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1.Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Literatür Özetleri.....	3
BÖLÜM 2.	
RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	11
2.1. Rüzgar Enerjisi	11
2.2. Rüzgar Türbinleri.....	14
2.2.1. Rüzgar Türbini Çeşitleri.....	14
2.2.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
2.2.1.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	17
2.2.2. Rüzgar Türbini Bileşenleri	18
2.2.2.1. Rüzgar Türbin Kanatları	21
2.2.3. Türbin Kanatlarına Etkiyen Kuvvetler ve Gerilmeler.....	23
2.2.4. Türbin Kanatlarının Üretiminde Kullanılan Malzemeler	27
2.2.5. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretim Yöntemleri.....	29
2.2.5.1. Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	29

2.2.5.1.1. Vakum İnfüzyon Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları	32
2.2.5.1.2. Vakum İnfüzyon Sisteminin Bileşenleri	33
2.2.5.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Rüzgar Türbin Kanadı Üretimi	34

BÖLÜM 3.

KOMPOZİT MALZEMELER.....	41
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	44
3.1.1. Sentetik Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler.....	44
3.1.1.1. Takviye Elemanları	46
3.1.1.2. Matris	46
3.1.1.2.1. Termoset Matris	47
3.1.2. Doğal Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler	49
3.1.3. Takviye Geometrisine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	49
3.2. Kompozit Malzemelerde Laminatlar	50
3.3. Elyaf Oryantasyon Açısının Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	53
3.3.1. Koordinat Eksenlerine Göre Elyaf Oryantasyon Açısı	54

BÖLÜM 4.

MATERYALVE YÖNTEM	58
4.1. Malzeme.....	58
4.2. Mikroyapı İncelemeleri	65
4.3. Numunelerin Sertlik Ölçümleri.....	66
4.4. Su Absorpsiyon (Emme) Deneyi	68
4.5. Çekme Deneyi.....	70
4.6. Darbe Deneyi	71
4.7. Eğilme Deneyi.....	73

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	74
5.1. Mikroyapı İnceleme Bulguları	74
5.2. Sertlik Değerleri Bulguları	76
5.3. Su Absorpsiyon Deneyi Bulguları	81

5.4. Çekme Deneyi Bulguları.....	83
5.5. Darbe Deneyi Bulguları	92
5.6. Eğilme Deneyi Bulguları.....	94
5.7. Kırık Yüzeylerin İncelenmesi	101

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR	110
----------------	-----

KAYNAKLAR	113
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	119
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastic
CNC	: Computer Numerical Control
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Plastic
HRE	: Rockwell E
ODTÜ	: Ortadoğu Teknik Üniversitesi
PE	: Polietilen
SEM	: Scanning Electron Microscop
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TUREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
UV	: Ultraviyole
YY	: Yüzyıl
V	: Gerilim, V
A	: Akım, Amper

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 2016 yılı itibariyle Dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi.....	12
Şekil 2.2. 2016 yılı itibariyle Türkiye'deki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı.	13
Şekil 2.3. Yatay eksenli rüzgar türbini ve elektrik enerjisi üretimi	15
Şekil 2.4. Kanat sayısı ve rüzgar yönüne göre yatay eksenli rüzgar türbinleri	16
Şekil 2.5. Dikey eksenli rüzgar türbini	17
Şekil 2.6. Rüzgar türbininin genel yapısı	18
Şekil 2.7. Rüzgar türbini kanatları ve nasele içerisindeki bileşenler	19
Şekil 2.8. Rüzgar türbin kanatlarının görünümü	22
Şekil 2.9. Yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının bölgeleri ve kesiti	22
Şekil 2.10. Kanada etkiyen eğilme kuvvetleri	24
Şekil 2.11. Kanada etkiyen yüklemeler ve geometri.....	25
Şekil 2.12. Koordinat sistemine göre kanadın maruz kaldığı kuvvetler	26
Şekil 2.13. İnfüzyonun genel görünümü	29
Şekil 2.14. Vakum infüzyon sistemi bileşenleri.....	30
Şekil 2.15. Etrafindan vakumlanıp reçinenin ortadan verildiği sistem (Tip1).....	30
Şekil 2.16. Vakum ve reçine hatlarının karşılıklı yerleştirildiği sistem (Tip2).....	31
Şekil 2.17. Rüzgar türbin kanadı kalıbı.....	35
Şekil 2.18. Cam kumaşların kalıba serilmesi	36
Şekil 2.19. İnfüzyon öncesi vakumlanmış parça.....	37
Şekil 2.20. Rulolar ile yapılan yüzey işlemi	38
Şekil 2.21. Püskürtme tabancası ile yapılan yüzey işlemi	39
Şekil 2.22. Robot kolları ile yapılan yüzey işlemi	39
Şekil 3.1. Kompozit malzemenin yapıtaşları	41
Şekil 3.2. Kompozitlerin bazı özelliklerinin farklı malzemelerle karşılaştırılması ...	43
Şekil 3.3. Sentetik elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin bileşenleri.....	45
Şekil 3.4. Tek yönlü laminat	51

Şekil 3.5. Açılı yerleştirilmiş laminat	51
Şekil 3.6. Çapraz katlı laminat	51
Şekil 3.7. Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi	54
Şekil 3.8. Bir tabaka için temel malzeme ve yükleme eksenlerinin tanımlanması ...	55
Şekil 3.9. Sağ el koordinat sistemi eksenleri	55
Şekil 3.10. Çok yönlü elyaf kumaşlarının oryantasyon açılarından örnekler	56
Şekil 3.11. Oryantasyon açısının mekanik özellikler üzerine etkisi	56
Şekil 3.12. Oryantasyon açısı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki	57
Şekil 4.1. Kompozit plakaların üretiminde kullanılan vakum infüzyon tezgahı.....	60
Şekil 4.2. Ayırıcı film	60
Şekil 4.3. Kumaşların yerleştirilmesi	61
Şekil 4.4. Sızdırmazlık sağlanmış sistem	62
Şekil 4.5. Polyester+vinilester matrisli, 30°/60° elyaf oryantasyonuna sahip plaka .	62
Şekil 4.6. Polyester+vinilester matrisli, 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip plaka ...	63
Şekil 4.7. Polyester+vinilester matrisli, ±45° elyaf oryantasyonuna sahip plaka	63
Şekil 4.8. CNC kesim işlemi	64
Şekil 4.9. CNC kesim sonucunda elde edilen deney numuneleri	64
Şekil 4.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve sputter coater.....	65
Şekil 4.11. Sertlik ölçme deney numuneleri boyutları	66
Şekil 4.12. Sertlik ölçüm cihazı	67
Şekil 4.13. Sıcak ortam sağlayıcısı	67
Şekil 4.14. Soğuk ortam sağlayıcısı	68
Şekil 4.15. Su absorpsiyon deneyi için kullanılan sıcak ortam sağlayıcısı.....	68
Şekil 4.16. Su absorpsiyon deney düzeneği	69
Şekil 4.17. Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları	70
Şekil 4.18. Çekme deneyi makinası	71
Şekil 4.19. Darbe deneyi makinası.....	72
Şekil 4.20. Darbe deneyi numune ölçüleri	73
Şekil 4.21. Eğilme deneyi düzeneği	73
Şekil 4.22. Eğilme deneyi numune ölçüleri	73
Şekil 5.1. 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme	74
Şekil 5.2. 30°/60° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme.....	75

Şekil 5.3. +45°/-45° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme	75
Şekil 5.4. Numunelerin oda sıcaklığındaki sertlik değerleri	77
Şekil 5.5. Numunelerin -40 °C'deki sertlik değerleri	78
Şekil 5.6. Numunelerin +60 °C'deki sertlik değerleri	79
Şekil 5.7. PV30/60S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi	79
Şekil 5.8. PV0/90S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi	80
Şekil 5.9. PV+45/-45S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi	80
Şekil 5.10. Numunelerin ortalama çekme dayanımı değerleri	87
Şekil 5.11. Numunelerin ortalama gerinim değerleri	87
Şekil 5.12. PV30/60Ç kodlu numunenin ortalama Gerilme-Gerinim diyagramı	89
Şekil 5.13. PV0/90Ç kodlu numunenin ortalama Gerilme-Gerinim diyagramı	89
Şekil 5.14. PV+45/-45Ç kodlu numunenin ortalama Gerilim-Gerinim diyagramı ...	90
Şekil 5.15. Numunelerin ortalama Gerilme-Gerinim diyagramı	90
Şekil 5.16. Numunelerin ortalama darbe dayanımı değerleri	93
Şekil 5.17. Numunelerin ortalama eğilme dayanımı değerleri	98
Şekil 5.18. Numunelerin ortalama gerinim değerleri	98
Şekil 5.19. PV30/60E kodlu numunenin ortalama E.dayanımı-Uzama diyagramı....	99
Şekil 5.20. PV0/90E kodlu numunenin ortalama E. dayanımı-Uzama diyagramı....	99
Şekil 5.21. PV+45/-45E kodlu numunenin E. dayanımı- Uzama diyagramı	100
Şekil 5.22. Numunelerin Ortalama eğilme dayanımı-Uzama eğrileri	100
Şekil 5.23. Çekme numuneleri örnek kırılma şekilleri	102
Şekil 5.24. Çekme numunelerinde görülen tabaka ayrılmaları	103
Şekil 5.25. Numunelerin Elyaf-Matris bağ kuvvetlerinin karşılaştırılması	104
Şekil 5.26. Darbe deneyi sonrasında numunelerdeki kırılma mekanizmaları	105
Şekil 5.27. 0°/90° elyaf oryantasyonlu numunelerdeki delaminasyonlar	105
Şekil 5.28. 30°/60° ve +45°/-45° oryantasyonlu numunelerdeki elyaf kopmaları...	106
Şekil 5.29. 0°/90° oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri..	107
Şekil 5.30. 30°/60° oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri	108
Şekil 5.31. ±45° oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri	108
Şekil 5.32. ±45° oryantasyonlu numunelerde meydana gelen üst tabaka ayrılması	109

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Rüzgar türbin bileşenlerinin yapıldığı malzemeler.....	20
Tablo 2.2. Bileşenlerin üretim yöntemleri	20
Tablo 2.3. Türbin Kanatlarında kullanılan bazı malzemelerin mekanik özellikleri ..	28
Tablo 4.1. Kullanılan polyester reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri	59
Tablo 4.2. Kullanılan vinilester reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri	59
Tablo 4.3. Kullanılan cam elyafın mekanik ve fiziksel özellikleri	59
Tablo 4.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozitlere ait özellikler	65
Tablo 5.1. Sertlik ölçümü deney numuneleri kodlandırılması	76
Tablo 5.2. Numunelerin oda sıcaklığındaki sertlik değerleri.....	76
Tablo 5.3. Numunelerin -40 °C'deki sertlik değerleri	78
Tablo 5.4. Numunelerin +60 °C'deki sertlik değerleri	78
Tablo 5.5. Numunelerin üç farklı sıcaklıktaki ortalama sertlik değerleri	79
Tablo 5.6. Su absorpsiyon deney numuneleri kodlandırma.....	81
Tablo 5.7. Tüm numunelerin su absorpsiyon oranları	82
Tablo 5.8. Çekme deney numuneleri kodlandırma	84
Tablo 5.9. Çekme deneyi sonuçları.....	85
Tablo 5.10. Ortalama çekme deneyi sonuçları.....	86
Tablo 5.11. Darbe deney numuneleri kodlandırma.....	92
Tablo 5.12. Numunelere ait darbe dayanımı değerleri	93
Tablo 5.13. Eğilme deney numuneleri kodlandırma.....	95
Tablo 5.14. Bütün numunelerin eğilme deneyi sonuçları	96
Tablo 5.15. Numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları	97

RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI İÇİN KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında polyester ve vinilester reçinelerin eşit oranda birlikte bulunduğu hibrit matris elemanlarının farklı elyaf oryantasyonlarına sahip cam elyaf ile takviye edilmesi sonucu üretilen hibrit matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi ile seçilen kompozitler arasında rüzgar türbin kanatları için en uygun malzemenin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece çalışma kapsamında rüzgar türbinleri kanatları için malzeme seçimi konusunda yapılacak olan çalışmalara ışık tutulması amaçlanmıştır. Hibrit matrisli malzemeler, vakum infüzyon metodu ile üretilmiş, elyaf oryantasyonu olarak $0^{\circ}/90^{\circ}$, $30^{\circ}/60^{\circ}$ ve $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ 'lik açılar seçilmiştir. Kompozitlere yapılan mekanik deneyler sonucunda en yüksek mukavemet değerlerine $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler ile ulaşılmış olup, en düşük dayanım değerleri gösteren malzemelerin ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu belirlenmiştir. Ek olarak seçilen hibrit matris elemanının sertlik değerlerinin sıcaklık değişimleri karşısında oldukça kararlı olduğu görülmüştür. Su absorpsiyon deneyi ile en düşük su absorpsiyon oranına sahip kompozitin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu belirlenmiş olup, yapılan tüm deneyler neticesinde seçilen kompozitler içerisinde rüzgar türbin kanatlarında kullanılmak üzere mekanik performans açısından en uygun malzemenin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip olan kompozitler olduğu ve darbe direncinin yüksek olması açısından en üst tabakada $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu takviye elemanının kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar türbini kanadı, Polimer kompozit, Hibrit matris.

PRODUCTION OF THE COMPOSITE MATERIALS USED FOR WIND BLADES AND INVESTIGATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE PRODUCED COMPOSITES

SUMMARY

In this study, it is aimed to determine the most suitable material for wind blades among the selected composites by examining mechanical and physical properties of the hybrid matrix composites which contain equally polyester and vinylester resin with different fiber orientations. Thus, it is aimed to shed light on the material selection of the wind blades within the scope of the study. Hybrid matrix composites were produced by vacuum infusion method and the fiber orientations were selected as $0^{\circ}/90^{\circ}$, $30^{\circ}/60^{\circ}$ and $+45^{\circ}/-45^{\circ}$. According to mechanical tests results, $0^{\circ}/90^{\circ}$ fiber reinforced composites exhibited the best mechanical properties and it has been observed that $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ fiber reinforced composites have the lowest mechanical properties. Furthermore, as a result of hardness test of the composites, it is observed that the hardness of the Polyester/Vinylester hybrid matrix is stable against the temperature changes. According to water absorption test results, $0^{\circ}/90^{\circ}$ fiber reinforced composites have the lowest water absorption rates. As a result of all investigations, it was determined that in terms of mechanical performance the most suitable material is $0^{\circ}/90^{\circ}$ fiber reinforced composites and to get highest impact resistance at the blade, $30^{\circ}/60^{\circ}$ fiber reinforcement must be disposed at the topcoat of the blade.

Keywords: Wind Blade, Polymer Composite, Hybrid Matrix

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyadaki hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için fosil yakıtlara olan bağılılığın azaltılması önemli bir hedeftir. Bu hedefe ulaşabilmek için, yenilenebilir enerji üretimi, özellikle rüzgar enerjisi üretimi şiddetli bir şekilde arttırılmalıdır. Bu hedefe büyük ve ekstra büyük rüzgar türbinlerinin bulunduğu deniz üstü veya karasal rüzgar türbini santrallerinin kurulumu ile ulaşılabilir. Çok büyük, deniz üstü ve uzaktan kontrollü rüzgar türbinlerinin tamiratının ve bakımının yüksek maliyetli olmasından dolayı, ilk olarak en önemli parça olan rotor kanatlarının 20 yıldan fazla süre ile güvenilir olarak çalışmasına devam etmesi gerekmektedir. Eğer rüzgar türbin kanatları düşük ağırlığının yanı sıra çok yüksek sertliğe, mukavemete, yorulma dayanımına, çevresel etkilere karşı yüksek dirence sahip olursa, rüzgar türbininin dayanıklı ve uzun ömürlü olması sağlanabilir. Bu nedenle ileri düzey kompozitler geliştirilmeli ve rüzgar türbinlerinin kanatlarının yapımında bu kompozitlerden yararlanılmalıdır [1].

Yüzyıllar boyu, tüm dünya yakıt, kömür, ağaç, doğal gaz, uranyum vs. gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına bağlı kalmıştır. Tüm bu enerji kaynakları sınırlıdır ve çevresel olarak kirlenmeye neden olmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları ile ilgili problemler nedeniyle güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar enerjisi ve gelgit enerjisi gibi sonu olmayan ve çevresel kirliliği en aza indirgeyen yenilenebilir enerji kaynakları üzerine odaklanılmıştır. Rüzgar enerjisi global enerji problemi karşısında tercih edilebilir bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Rüzgar enerjisinden faydalanmanın en etkili yolu rüzgar türbinleri vasıtasıyla olmaktadır. Rüzgar türbinlerinin kanatları ise en önemli rolü oynayan bileşendir. Rüzgar türbininin verimliliği, kanadın şekline, boyutuna, dayanımına ve kanat malzemesinin yoğunluğuna bağlıdır. Rüzgar türbininin verimliliğini arttırmada kanat malzemesinin seçimi çok önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgar türbini dizaynında seçilen kanat

malzemesinin düşük yoğunluk ve yüksek dayanım gibi özelliklere sahip olması istenmektedir. Bununla birlikte kanat malzemesinin, yüksek aerodinamik yüklemelere ve yorulma yüklemelerine karşı dayanıklı olmasının yanı sıra nem ve parçacıkların oluşturduğu çevresel etkilere karşı da dayanıklı olması gerekmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı rüzgar türbinin kanadı tasarımı sırasında, çevresel şartlar ve mekanik zorlamalara karşı direnç gösterebilecek olan malzeme seçiminin yapılması oldukça önemlidir [2].

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında polyester ve vinilester reçinelerin eşit oranda birlikte bulunduğu hibrit matris elemanlarının farklı elyaf oryantasyonlarına sahip cam elyaf ile takviye edilmesi sonucu üretilen hibrit matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi ile seçilen kompozitler arasında rüzgar türbin kanatları için en uygun malzemenin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece çalışma kapsamında, rüzgar türbin kanatları için malzeme seçimi konusunda yapılacak olan çalışmalara ışık tutulması amaçlanmıştır. Bu amaçla vakum infüzyon metodu ile üretilmiş olan kompozit plakalar, CNC işleme merkezinde ASTM deney standartları ölçülerinde işlenerek yapılacak olan deneyler için hazırlanmıştır.

Mekanik deneyler kapsamında, kompozitlerin sertlik ölçümleri, çekme deneyleri, darbe deneyi, eğilme deneyleri, fiziksel özellikleri incelemek amacı ile su absorpsiyon deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler yardımıyla, literatür çalışmaları ile belirlenen rüzgar türbininin işletilmesi sırasında kanatlarda meydana gelecek olan maksimum gerilmeler göz önüne alınarak, seçilen kompozit malzemeler içerisinde rüzgar türbin kanadı için en uygun elyaf oryantasyonlu ve hibrit matrisli kompozit malzeme belirlenmiştir. Bunların dışında yapılan su absorpsiyon deneyi ile de çalışmaya konu olan kompozitler içerisinde çevresel etkilere karşı rüzgar türbin kanatları için en optimum olarak çalışabilecek malzemenin seçimi yapılmıştır.

1.2. Literatür Özetleri

Yapılan tez çalışması ile ilgili olarak, rüzgar türbinleri, rüzgar türbin kanatlarında kullanılan kompozit malzemeler, farklı elyaf oryantasyon açılarının ve matris malzemelerinin kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkilerini içeren çalışmalar incelenmiştir.

Özdil Kaçan'ın yaptığı çalışmada, yatay eksenli rüzgar türbinleri için on farklı bölgeye ayrılmış polimer esaslı kompozit malzemedan oluşan kanat tasarımı yapılmış, kanatların çalışması sırasında belirlenen tüm bölgeler için, elyaf oryantasyonlarına göre maruz kalacağı gerilme değerleri hesaplanarak en düşük gerilmenin elde edilebileceği optimum oryantasyon açıları belirlenmiştir. Optimum oryantasyon açılarının belirlenmesini müteakiben en çok gerilmenin bulunduğu kanat bölgesi saptanmış olup, bu bölge için $-45^{\circ}/+45^{\circ}/-30^{\circ}/+45^{\circ}/-60^{\circ}/+90^{\circ}/-90^{\circ}/+60^{\circ}/-45^{\circ}$ istiflenme sırasına sahip epoksi matrisli ve cam elyaf takviyeli kompozitler üretilmiş, çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş ve en yüksek gerilmenin (172,57 MPa) bulunduğu kanat bölgesi için belirlenen optimum oryantasyon açısına sahip numunelerin dayanımı bulunarak (200 MPa), $-45^{\circ}/+45^{\circ}/-30^{\circ}/+45^{\circ}/-60^{\circ}/+90^{\circ}/-90^{\circ}/+60^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyon açısına sahip epoksi reçine ve cam elyaf kompozit malzemedan oluşan kanat bölgesinin emniyetli şekilde çalışabileceği görülmüştür [3].

Sentilkumar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, tabaka içi elyaf oryantasyon açısındaki değişimin, sisal lif takviyeli ve polyester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Söz konusu kompozitler basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Çeşitli elyaf oryantasyonları ile üretilen malzemelere yapılan çekme deneyi sonucunda, en yüksek çekme dayanımının $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak her iki tarafın en üst yüzeylerinde 0° elyaf oryantasyonu bulunan kompozitlerin çekme dayanımlarının diğer kompozitlere oranla daha iyi olduğu görülmüştür. Yani $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$, $0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}$, $0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ ve $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$, $90^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlere göre daha iyi çekme dayanım özellikleri

göstermiştir. Bunun nedeninin ise 0° elyaf oryantasyonuna sahip takviye elemanının uygulanan yüke paralel olarak istiflenmiş olduğundan kaynaklı olduğu belirtilmiştir [4].

Meszaros ve Turcsan'ın yaptığı bir çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi-vinilester hibrit matrisli kompozit sistemlerin mekanik avantajlarını incelenmiştir. Epoksi/vinilester esaslı termoset reçineler geliştirilmiş ve tek yönlü karbon takviyeli kompozit malzeme içerisinde matris malzemesi olarak kullanılmıştır. El yatırması yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler üç noktalı eğme, darbe ve yorulma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ortaya konulan yapı, kompozit malzemelerde hibrit reçinelerin kullanılması ile mekanik özelliklerin arttığını ortaya koymuştur. Eğilme deneyleri sonucunda, hibrit reçine içeren kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarının hemen hemen % 10 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Hibrit matrisli kompozitlerde darbe dayanımının %7 'ye varan bir gelişime sahip olduğu sonucuna varılmıştır ve ayrıca yapılan yorulma testleri sonucunda epoksi-vinilester hibrit matris içeren kompozitlerin daha yüksek çevrim sayısına sahip olduğu görülmüştür [5].

Uysal'ın yaptığı bir çalışmada, rüzgar türbini kanat malzemelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacı ile el yatırma yöntemi kullanılarak 1 kat cam elyaf ve polyester, 2 kat cam elyaf ve polyester, 3 kat cam elyaf ve polyester, 1 kat cam elyaf ve 1 kat balsa ve polyester, 1 kat cam elyaf ve vinilester, 2 kat elyaf ve vinilester, 3 kat cam elyaf ve vinilester, 1 kat cam elyaf ve 1 kat balsa ve vinilester, 2 kat cam elyaf ve 2 kat balsa ve vinilester, 2 kat cam elyaf ve 1 kat balsa ve vinilester kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polyester ve vinilester kullanılmıştır. Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak, cam elyaf ve balsa kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, cam elyaf takviyesinin miktarının artırılması ile hem polyester hem de vinilester matrisli kompozitlerin mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak cam elyaf ve balsa ile takviye edilmiş olan kompozit malzemelerin gerilme mukavemetlerinin sadece cam elyaf takviyeli kompozitlere oranla daha düşük olduğu tespit edilmiş, buna karşın cam elyaf ve balsa takviyeli kompozitlerin gerilme değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır [6].

Steigman ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, rüzgar türbini kanat yapıları için uygun olan cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere uygulanan mekanik test sonuçları sunulmuştur. Söz konusu çalışmada, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ ve $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf ortantasyonuna sahip cam elyaf takviyeli ve epoksi matrisli kompozit malzemelere çekme ve kayma deneyleri uygulanmış olup, uygulanan deneyler sonucunda malzemelerin rüzgar türbin kanatlarında kullanılabilir olup olmadığının değerlendirilebilmesi ve elyaf oryantasyonunun etkisini görebilmek için için elastiklik modülü, kayma modülü, poisson oranı, çekme dayanımı gibi parametreler belirlenmiştir. Yerçekimi kuvvetleri, atalet kuvvetleri ve dönmeye bağlı olarak meydana gelen yüklemelerin rüzgar türbin kanatlarının kararlılığını ve rijitliğini etkilediği göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuçlar, çalışmada kullanılan hem $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ hem de $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, rijitlik ve hafiflik gibi özelliklerin kritik olduğu rüzgar türbini kanatlarının yapımında başarılı olarak kullanılabileceğini göstermiştir [7].

Sevim'in yaptığı bir çalışmada, rüzgar türbin kanatlarında farklı polimer yapıların karakterizasyonu için el yatırması yöntemi ile takviye elemanı olarak çok yönlü cam kumaşı kullanmak (ortantasyon sabit tutularak) suretiyle polyester, epoksi ve vinilester polimer matrisli plakalar üretilmiş ve üretilen plakaların çekme deneyi standardına göre boyutlandırılması için su jeti sistemi ile kesilmeye tabi tutulmuştur. Solar simülatörde ve iklimlendirme kabiniinde bozunma işlemine tabi tutulmadan önce, her bir polimer matris grubunun maksimum mukavemet değerlerini elde etmek için çekme deneyleri yapılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerdeki takviyelendirme şartları aynı olduğundan kullanılan matris malzemesine göre çekme deneyinde meydana gelen farklılıklar incelenmiştir ve vinilester-cam elyaf kompozitlerinin çekme dayanımının diğer iki tip kompozit malzemenin çekme dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, küçük ölçekli rüzgar türbin kanatları için vinilester-cam elyaf kompozit malzemesinin, çalışmaya konu olan diğer kompozit malzemelere göre daha uygun olduğu belirlenmiştir [8].

Amico ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin artırılması için istifleme sırasının kontrolünün önemi ortaya konulmuştur. Çalışmanın amacı, elyaf tabakaları farklı istiflenmiş sisal-cam

elyaf/polyester hibrit kompozitlerin eğilme, çekme, sertlik ölçme ve darbe deneyleri yapılarak, farklı takviye tabakalarının kompozitin mekanik davranışları üzerindeki rolü araştırılmıştır. Yapılan çalışmada elyaf oryantasyonu rastgele olacak şekilde kompozit malzemeler üretilmiştir. Sonuç olarak, çeşitli yüklemelere karşı (çekme, eğilme vs.) kompozitlerin tepkisinin istifleme sırası ile değiştiği ve istenilen özellikte kompozit malzemeler elde etmek için istifleme sırasının kontrolünün önemli olduğu ortaya konulmuştur. Eğilme modülünü en üst düzeye çıkarmak için alt ve üst yüzeylerde cam elyaf olması gerektiği ve bununla birlikte malzemenin orta düzleminde de biraz cam elyaf tutulmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Fakat bu istif sırasının çekme mukavemeti için uygun olmadığı görülmüştür. Darbe deneyi sonuçları ile ilgili olarak, en yüksek mukavemet değerinin dört bitişik cam elyaf tabakalarının bulunduğu hibrit kompozit malzemeler tarafından gösterildiği anlaşılmıştır. Sertlik değerlerinin ise kompozit malzemelerin test yüzeylerinde cam elyaf olması durumuna göre etkilendiği görülmüştür [9].

Manjunatha ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, el yatırması yöntemiyle üretilen karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerdeki farklı elyaf oryantasyonları ve elyaf kalınlıklarının mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, kompozit malzemelerdeki mekanik özelliklerin laminatların elyaf oryantasyonuna ve kalınlığına bağlı olduğunu göstermiştir. Elyaf oryantasyonunun etkisini belirlenmesinde $\pm 45^\circ/\pm 60^\circ/\pm 90^\circ$ elyaf oryantasyon açıları seçilmiştir. Yapılan deneylere göre, elyaf oryantasyonun 45° olması durumunda, çekme, eğilme ve basma dayanımının yüksek olduğu, 90° elyaf oryantasyon kullanılması durumunda numunelerin kırılması için daha fazla yük uygulanması gerektiği saptanmış, daha fazla uzama oranı 45° elyaf oryantasyonuna sahip olan kompozitlerde görülmüştür [10].

Daban'ın yaptığı bir çalışmada, reçine transfer metodu ile farklı tabaka sayısı, farklı yapı, farklı istifleme sırası ve farklı oryantasyon açısının bulunduğu polyester matrisli ve cam elyaf takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen plakalardan $0^\circ/90^\circ$, $15^\circ/75^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyon açılına sahip eğilme ve çekme deney numuneleri kesilmiştir. En yüksek mukavemet

değerlerinin elyaf oryantasyon açısı $0^{\circ}/90^{\circ}$ olan numunelerde, en düşük mukavemet değerlerinin ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ ortantasyon açılı numunelerde olduğu görülmüştür [11].

Paiva Ju'nior ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, polyester reçine matris malzemesi ile düz dokuma hibrit rami/pamuk takviye malzemesi kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Rami liflerinin hacim oranı ve oryantasyonunun bir işlevi olarak, üretilen kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri belirlenmiştir. Kompozit malzemeler, rami liflerinin çekme eksenine paralel (0°) ve çeşitli istifleme sırası konfigürasyonları ($0^{\circ}/90^{\circ}$) ile çekme testine tabi tutulmuşlardır. Test sonuçları kompozitlerin çekme dayanımı özelliklerine etki eden ana parametrenin yükleme eksenine paralel olan rami liflerinin hacim oranı olduğunu göstermiştir. Pamuk liflerinin bu olaya katkısının ise çok az olduğu görülmüştür. Aslında, 0° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin çekme dayanımı için elde edilen sonuçların, pamuk liflerinin katkısını dikkate almaksızın karışım kanununun ortak bir kuralını izlediği görülmüştür. Çekme dayanımı değerlerinin matristen %338 oranında daha fazla olması, selülozik lif takviyeli kompozitler içerisinde rami lifinin potansiyelini göstermiştir [12].

Yılmaz İşman'ın yaptığı çalışmada, el yatırması yöntemi ile üretilen polyester dokuma kumaş takviye elemanı ve matris malzemesi olarak vinilester reçine kullanılan kompozit malzemelere çekme, eğilme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Kompozit malzemelerin elyaf oryantasyon açıları 0° , 45° ve 90° olarak seçilmiştir. Yapılan çekme deneyi sonucunda en yüksek mukavemet değerine 0° elyaf oryantasyon açısına sahip kompozit malzemelerin sahip olduğu, en düşük mukavemet değerine ise 45° elyaf oryantasyonuna göre hazırlanmış olan kompozit malzemelerin sahip olduğu görülmüştür. Eğilme deneyi sonucuna göre ise, en yüksek eğilme mukavemetinin 0° doğrultusunda, en düşük eğilme mukavemetinin ise 45° doğrultusunda olduğu görülmüştür. Son olarak darbe testi sonucunda ise, 45° doğrultusundaki darbe mukavemetinin en yüksek, 90° doğrultusundaki darbe mukavemetinin ise en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak üretilen kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri, yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri ile kıyaslandığında yeterli olmadığı görülmüş, ani darbe mukavemeti özelliklerinin ise yeterli olabileceği gözlemlenmiştir [13].

Verma ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, matris elemanı olarak epoksi reçine, takviye elemanı olarak ise kuru bambu kullanılarak soğuk presleme yöntemi ile epoksi-bambu kompozitlerin mekanik özelliklerinin elyaf oryantasyonuna bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda kompozitlerin mekanik özelliklerini tayin edebilmek amacı ile çekme, basma ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Testlerde kullanılmak üzere üretilen kompozit malzemelerdeki elyaf oryantasyon açıları beş katmanlı olacak şekilde 0° , $0^\circ/90^\circ$ ve $0^\circ/45^\circ$ olarak seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çekme ve basma özelliklerinin elyaf oryantasyon açısının artması ile azaldığı görülmüştür. Yine benzer olarak eğilme mukavemetinin de elyaf oryantasyon açısının artışı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak en iyi çekme, basma ve eğilme özelliklerinin elyaf oryantasyon açısının 0° olduğu kompozitlerde bulunduğu belirtilmiştir [14].

Türkmen ve Köksal'ın yaptıkları çalışmada, matris malzemesi olarak polyester reçine ve takviye elemanı olarak farklı katman sayısına sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üretilmiş olup, bu kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen kompozit malzemelere çekme, darbe ve üç noktalı eğme deneyi uygulanarak malzemelerin dayanım değerleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin ortalama dayanım değerleri incelendiğinde, elyaf katman sayısının artması ile kompozit malzemelerin mukavemet özelliklerinin arttığı görülmüştür. Darbe deneyi sonucunda ise elyaf katman sayısının artışı ile mekanik özelliklerin artışı arasında doğrusal bir değişim olduğu belirlenmiştir [15].

Chavan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, el yatırması metodu kullanılarak polyester matrisli ve farklı elyaf oryantasyon açılara sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerdeki elyaf oryantasyon açıları $\pm 45^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ olarak seçilmiş, kompozitlere çekme, darbe ve sertlik ölçme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda $\pm 90^\circ$ elyaf oryantasyon açısına sahip kompozitlerin $\pm 45^\circ$ elyaf oryantasyon açısına sahip kompozitlerden daha iyi mukavemet özellikleri sergilediği görülmüştür [16].

Puttaswamaiah ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, polyester matrisli ve cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çekme, basma, eğilme ve aşınma deneyleri yapılarak, elyaf oryantasyon açılarındaki farklılıkların söz konusu özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Elyaf oryantasyon açıları 30° , 60° ve 90° olan kompozitlerin üretim yöntemi ise el yatırması yöntemi olarak belirlenmiştir. Yapılan mekanik deneyler sonucunda, 90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin en iyi mekanik özellikleri verdiği görülmüştür. Aşınma deneyine göre ise 90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitin aşınma oranının en düşük değerde olduğu belirlenmiştir. En çok aşınma miktarının ise 60° elyaf oryantasyonuna sahip olan kompozitlerde meydana geldiği tespit edilmiştir [17].

Gururaja ve Hari Rao'nun yaptıkları bir çalışmada, farklı elyaf oryantasyonlarına sahip vakum infüzyon tekniği ile üretilmiş hibrit kevlar-cam elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin elyaf oryantasyonuna bağlı olarak nasıl değişeceği incelenmiştir. Kompozitlerde matris elemanı olarak epoksi reçine kullanılmış olup, elyaf oryantasyon açıları ise $0^\circ/90^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ olarak belirlenmiştir. Çekme deneyi sonucunda $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin mukavemet değerlerinin diğer kompozitlere göre önemli ölçüde yüksek olduğu görülmüştür. En düşük mekanik özellik değerine sahip olan kompozitlerin ise $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler olduğu saptanmıştır [18].

Hadzreel ve Aisha'nın yaptıkları bir çalışmada, polimer matrisli kompozitlerin optimum mekanik özelliklerinin ve su absorpsiyon değerlerinin elde edilebilmesi için farklı elyaf oryantasyonlarına sahip kompozitler üzerine deneyler yapılmıştır. Kompozitler el yatırması yöntemi ile üretilmiş olup, matris malzemesi polyester reçine olarak seçilmiştir. Takviye malzemesi ise $0^\circ/90^\circ$ çift yönlü dokunmuş cam elyaf ile çok yönlü cam elyaf olarak belirlenmiştir. Üretilen kompozit malzemeler beş tabakalı çift yönlü, beş tabakalı çok yönlü, yedi tabakalı çift yönlü ve yedi tabakalı çok yönlü olarak üretilmiş ve mekanik özelliklerde meydana gelen farklılıklar belirlenmiştir. Yapılan çekme deneyine göre çift yönlü $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin, çok yönlü elyaf oryantasyonuna sahip numunelerden daha iyi mekanik özellikler gösterdiği saptanmıştır. Son olarak su absorpsiyon deneyi verilerine göre ise,

çift yönlü $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitlere kıyasla çok yönlü elyaf ortantasyonlu kompozitlerin çok daha fazla su emme oranına sahip olduğu görülmüştür [19].

Gururaja ve Hari Rao'nun yaptıkları bir çalışmada, vakum infüzyon metodu ile üretilmiş epoksi reçine matris elemanına sahip kompozitlerin, cam elyaf ve karbon elyaf ile hibrit olarak farklı elyaf oryantasyonları ile takviye edilmesinin mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma için seçilen elyaf oryantasyonları $0^{\circ}/90^{\circ}$, $45^{\circ}/45^{\circ}$ ve $30^{\circ}/60^{\circ}$ 'dir. Yapılan çekme deneyi sonucunda malzemelerin çekme dayanımları, elastisite modülleri gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf ortantasyonuna sahip kompozitlerin mekanik özelliklerinin $45^{\circ}/45^{\circ}$ ve $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerden daha üstün olduğu görülmüştür. En düşük mekanik özellikler ise, $45^{\circ}/45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlarına sahip malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir [20].

Literatür taraması sonucunda, rüzgar türbin kanatlarının üretildiği kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemesinin polyeester, vinilester ve epoksi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, elyaf takviyeli kompozit malzemeler ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda, çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak üretilen kompozitlerin, matris türü, elyaf oryantasyon açısı, elyaf türü, kompozitin kalınlığı, tabakaların istiflenme sırasına bağlı olarak mekanik özelliklerinde meydana gelecek değişimler incelenmiştir. Yapılan tez çalışmasının diğer çalışmalardan farkı ise, rüzgar türbin kanatları için seçilen polyeester ve vinilester matris elemanlarının ağırlıkça eşit oranda kullanmak suretiyle polyeester/vinilester hibrit matrisli kompozitlerin üretilmesi ve farklı elyaf oryantasyonları ile meydana gelecek mekanik ve fiziksel özellik değişimlerinin incelenerek, rüzgar türbin kanatları için kullanılacak en uygun malzemenin seçilmesine ışık tutabilecek nitelikte olmasıdır.

BÖLÜM 2. RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Dünyamızdaki enerji tüketimi göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalar sonucunda, mevcut fosil enerji kaynaklarının 21. yy içerisinde biteceği ortaya konulmuştur. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Yapılan çalışmalara göre, eğer dünyadaki enerji tüketim hızı aynı şekilde devam ederse, petrol rezervleri 2040, doğalgaz 2060, kömür ise 2050 yılında büyük bir ihtimalle tükenecektir [21,22].

20. yüzyılın sonu itibariyle dünya üzerinde kurulmuş olan elektrik enerjisi gücü kapasitesinin yalnızca beşte biri, hidrolik enerji santralleri vasıtasıyla üretilmektedir. Dörtte birlik kısım ise, buhar türbinlerinin kullanıldığı termik santral ile üretilmektedir. Fakat termik santrallerin CO₂ emisyonunun fazla olması dünya atmosferinde kalınlaşmaya ve bunun sonucunda, dünyadaki ortalama sıcaklık artışına, buzulların erimesine, okyanusların su sıcaklığının artmasına ve buzulların erimesi sonucunda deniz suyu seviyelerinin yükselmesine ve iklim değişikliklerine yol açmaktadır. Toplumlar için çok önemli olan elektrik enerjisinin üretiminde, ekolojik dengenin bu şekilde bozulması kabul edilmesi zor bir olaydır. Bu nedenle, toplumsal ve çevresel kriterler göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda çalışmalar hızla devam etmektedir [23].

2.1. Rüzgar Enerjisi

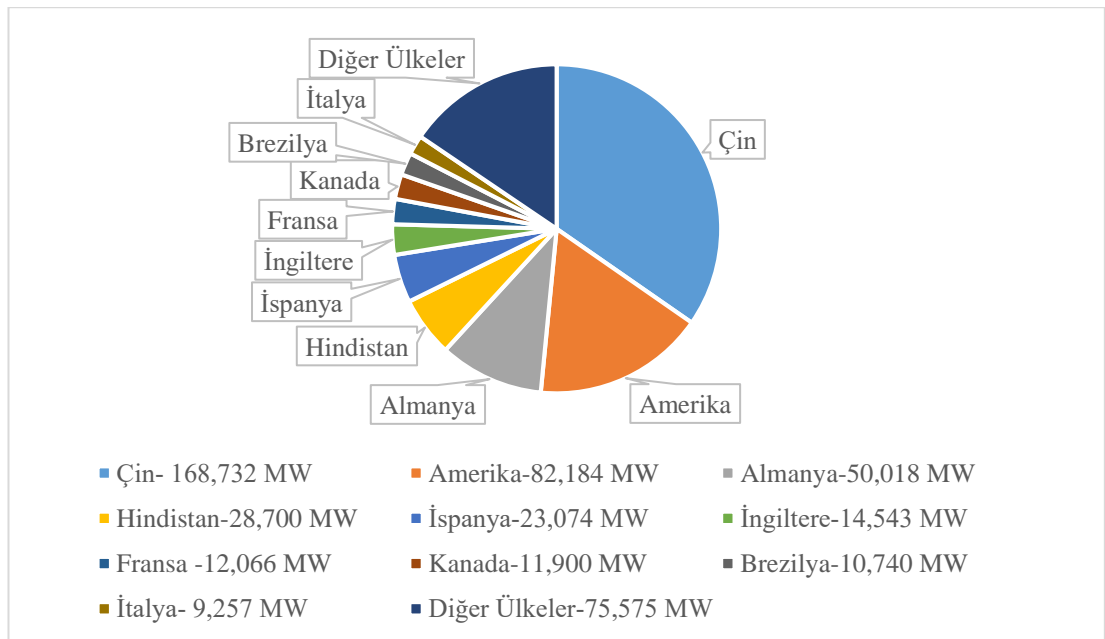
Dünyanın yüzeyi değişken olduğundan dolayı, Güneş enerjisi dünya yüzeyini eşit olarak ısıtamaz ve bunun sonucunda ortaya çıkan sıcaklık, yoğunluk ve basınç farkları ile meydana gelen yatay hava hareketleri rüzgar olarak tanımlanabilir. Bu tanımlamadan yola çıkarak güneş var oldukça rüzgarın ve rüzgar enerjisinin var olacağı sonucuna ulaşılmaktadır [26].

Başka bir tanımlamayla rüzgarlar, Güneş ısısının yeryüzünde farklı şekilde dağılması nedeniyle meydana gelen basınç ve sıcaklık farklarının dengeli bir hale gelmesiyle oluşan hava akımlarıdır [27].

Rüzgar enerjisi, doğal ve tükenmeyen, sürekli aynı oranda elde edilebilecek, karbondioksit yayını olmayarak, atmosferik ısınmaya neden olmayan, doğaya ve insan sağlığına herhangi bir olumsuz etkide bulunmayan, teknolojik olarak gelişime uygun bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinin kullanımında taşıma problemleri bulunmaz ve yüksek teknoloji gerekmez [24,25].

Rüzgar enerjisi havada bulunan kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilmektedir. Daha başka bir deyişle, rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin değişime uğramış halidir. Güneşten gelen enerjinin rüzgar enerjisine dönüşme oranı yaklaşık olarak %1-2' dir [25,26].

Çağımızda kullanılan enerji kaynaklarının çoğunun tükenbilir enerji kaynağı olmasından dolayı, çalışmalar yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmıştır. Rüzgar enerjisi sektörü, son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde en hızlı gelişen küresel endüstriler arasında yerini almaktadır. Şekil 2.1'de 2016 yılı itibariyle dünyadaki kurulu kümülatif rüzgar enerjisi kapasitesi gösterilmiştir.



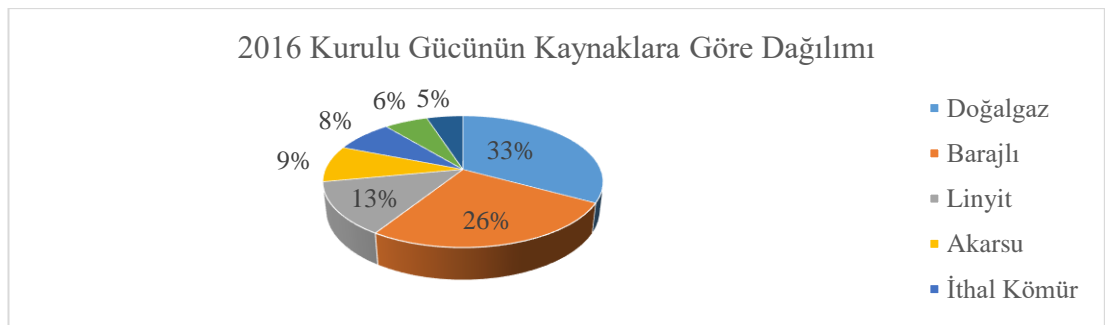
Şekil 2.1. 2016 yılı itibariyle Dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi [28]

Ülkemizde rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan ilk bilimsel çalışmalar, Ankara Üniversitesi tarafından 1960 'da, Ege üniversitesi tarafından 1970' de, daha sonraki yıllarda ODTÜ de yapılmasını müteakiben, 1980 yılında TÜBİTAK bünyesinde yapılmıştır [29].

Teorik olarak hesaplandığında, Türkiye'deki enerji kaynakları ile gerekli olan tüm elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir. Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyeli incelendiğinde, bir an önce kullanılması gereken azımsanmayacak şekilde bir rüzgar enerjisi potansiyeli olduğu görülür. Buradan yola çıkarak, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) kurulmuş olup, böylece akademisyenler, üreticiler, yatırımcılar bir araya gelerek Türkiye'de rüzgar enerjisi gelişimini destekleme çalışmaları yapmışlardır. Türkiye Rüzgar Enerjisi birliğinin çalışmaları neticesinde, Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanımı konusunda bir farkındalık oluşmuş ve söz konusu rüzgar enerjisi potansiyeli kabul görmeye başlamıştır [30].

Ayrıca ülkemizde yapılan ham petrol ithalinin miktarı yıllık bazda 20 milyon tondur. 20 milyon ton petrol ithalatı için yaklaşık 2,5 milyar dolar ödenmektedir. Bu nedenle, ülkemiz ekonomisinin gelişimi açısından petrol yerine, kendi öz kaynaklarımıza yönelmemiz gerekmektedir. Rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmalara göre, bilim adamları Türkiye'de elektrik enerjisi tüketiminin en az iki kat fazlasını karşılayacak kadar rüzgar enerjisi potansiyeli olduğunu savunmaktadırlar [31].

2016 yılı Nisan ayı itibariyle, Türkiye'nin kurulu gücü 73.852 MW olup, kurulu gücün kaynak türlerine göre dağılımı Şekil 2.2'de verilmiştir [32].



Şekil 2.2 2016 Yılı itibariyle Türkiye' deki kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı [32]

2.2. Rüzgar Türbinleri

Günümüzde rüzgar enerjisinden elektrik üretimi rüzgar türbinleri vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bölgesel olarak da kullanılabilen elektrik enerjisi, şebeke bağlantısı ile birlikte de kullanılabilir. Elektrik şebekesinin olmadığı ormanlık, dağlık ve kırsal kesimlerde rüzgar türbinleri ile üretilen elektrik enerjisinden yararlanılabilmektedir [33].

Rüzgar türbinleri, en basit tanım ile rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Küçük ölçekli olan rüzgar türbini sistemleri iki gruba ayrılabilir. Bu gruplar elektrik şebekesi ile paralel çalışan ve şebekeden bağımsız çalışan sistemlerdir. Şebekeden bağımsız olarak çalışan sistemlere otonom sistem adı verilmektedir. Otonom sistemler ürettikleri elektrik enerjisini aküler vasıtasıyla depolamaktadır. Küçük ölçekli rüzgar türbinleri kırsal bölgelerde aydınlatmada, yatlarda, tarla sulamada ve baz istasyonlarında kullanılmaktadırlar [34].

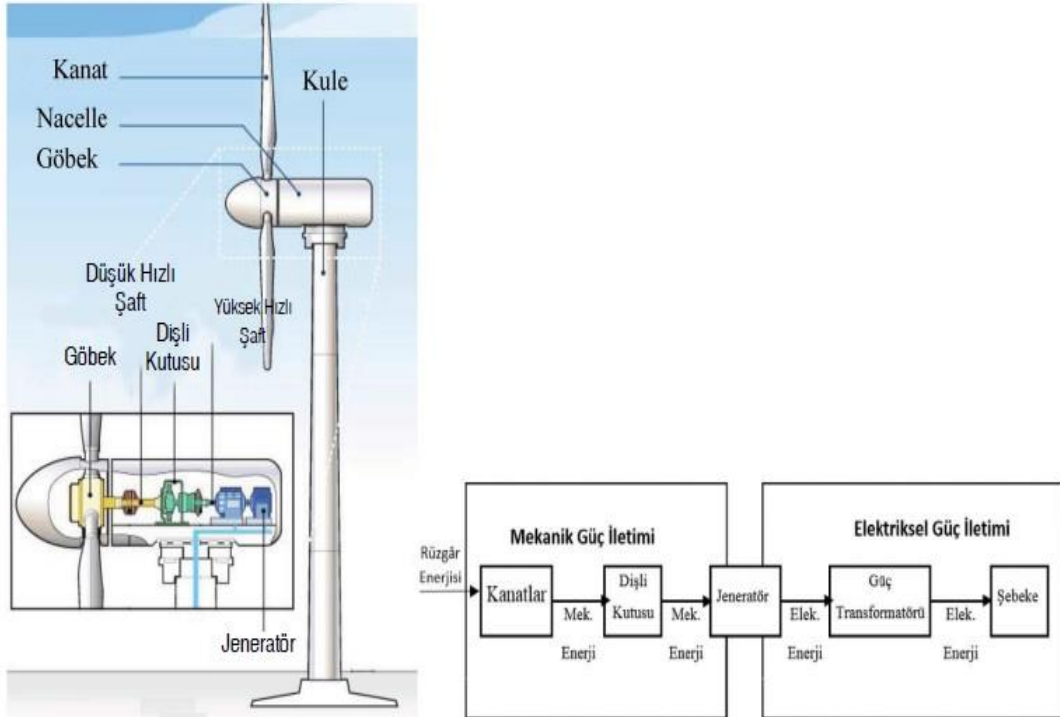
Rüzgar enerjisinden faydalanarak enerji üretimi sağlayan rüzgar türbinleri komplike makinalar değildir. Çalışma şekli basit olup, çalışması için bir operatöre ihtiyaç duyulmaz. Çalışma şekline göre bütünüyle otomatik olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Periyodik bakımlarının yapılması durumunda, 20-30 yıl ömürleri bulunmaktadır. Rüzgar türbinleri deniz üzerinde de kurulabildiği için kara üzerinde yer kaplamaz. Atmosfere veya denize ısı yayılımında bulunmazlar. Rüzgar türbinleri bir ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığı önemli ölçüde azaltır. Rüzgar türbinleri radyasyon yayılımı olmayan ve patlama tehlikesi bulunmayan makinalardır. Rüzgar türbinlerinin işletmeye alınması kısa bir sürede gerçekleşebilir. İnşaatın başlamasından bitimine kadar yaklaşık 3 ay gibi bir sürede, rüzgar türbinleri işletmeye alınabilir. Son olarak ise, tek başına kurulabileceği gibi bir çok rüzgar türbini santral şeklinde grup olarak da kurulabilmektedir [6].

2.2.1. Rüzgar Türbini Çeşitleri

Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre, dikey eksenli, yatay eksenli ve eğik eksenli ayrıca yatay eksenli rüzgar türbinleri de rüzgar alış şekline bağlı olarak rüzgarı arkadan alan ve rüzgarı önden alan rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir [35].

2.2.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

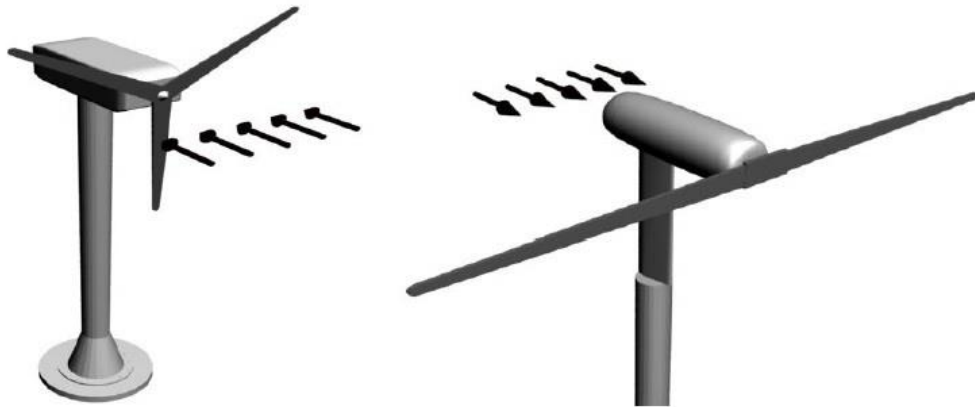
Yatay eksenli rüzgar türbinleri günümüzde en çok kullanılan rüzgar türbini tipidir ve kule, kanatlar, jeneratör, dişli kutusu, elektrik ile elektronik elemanlar ve göbek parçalarından meydana gelmektedir. Bu tip rüzgar türbinlerinde elektrik üretimi prensibi, kinetik enerjinin mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin de elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Rüzgarın kinetik enerjisi rotor kanatları yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülüp düşük hızlı şafta iletilmektedir. Daha sonra dişli kutusu yardımıyla momenti düşürülüp hızı artırılan mekanik enerji yüksek hızlı şafta aktarılmaktadır. Son olarak da yüksek hızlı şafttan jeneratöre aktararak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Jeneratör ünitesi içerisinde üretilen elektrik enerjisi daha sonra şebekeye gönderilmektedir. Ek olarak yatay eksenli rüzgar türbinleri bazı araçlar kullanılarak rüzgara doğru yönlendirilmelidir. Genel olarak büyük rüzgar türbinleri bir servomotora bağlı durumda olan rüzgar sensörleri ile rüzgara doğru yönlendirilirken, küçük rüzgar türbinleri için basit rüzgar kanadı kullanılmaktadır. Şekil 2.3’ de tipik bir yatay eksenli rüzgar türbini ve kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü gösterilmiştir [36,37].



Şekil 2.3 Yatay eksenli rüzgar türbini ve elektrik enerjisi üretimi [36]

İlk olarak üretilen rüzgar türbinleri tek kanatlı veya iki kanatlı olarak üretilmiş olup, günümüzde kullanılan modern rüzgar türbinleri genelde üç kanatlı olarak tasarlanmaktadır. Üç veya daha fazla kanatlı rüzgar türbinlerinin avantajı, pervanenin değişken olmayan atalet momentine sahip olmasıdır. İki kanatlı rüzgar türbinlerinin normal şartlar altında üç kanatlı rüzgar türbinleri ile kıyaslandığında maliyetinin daha düşük olması gerektiği düşünülebilir. Fakat iki kanatlı rüzgar türbinlerinde kulenin yatay eksenine göre bir atalet kuvvetine sahip olmasından dolayı rüzgar türbini üzerinde fazladan bir yük meydana gelir ve bu yükün giderilebilmesi için ek ekipmanlara ihtiyaç olduğundan hemen hemen maliyetleri üç kanatlı rüzgar türbinleri ile aynı olmaktadır. Ek olarak iki kanatlı rüzgar türbinlerinde düşük rüzgar hızlarında kanatlar çalışmamaktadır. Tek kanatlı rüzgar türbinlerinde amaç, kanatlara etkiyen yüksek döngüsel kuvvetlerin azaltılmasıdır. Fakat aerodinamik açıdan dengesiz olan tek kanatlı rüzgar türbinlerinde bu durumdan kaynaklanan ek yükler de meydana gelir. Ayrıca tek kanatlı rüzgar türbinlerinde gürültü seviyesi diğer çok kanatlı rüzgar türbinlerine göre fazladır [38].

Sonuç olarak rüzgar türbinlerinde kanat sayısı azalır ise dönüş hızı artar, kanat sayısı artar ise rotorun torkunun artmasına karşın dönüş hızı azalır [39]. Şekil 2.4’de rüzgarı alma yönüne bağlı olarak iki kanatlı ve üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Kanat sayısı ve rüzgar yönüne göre yatay eksenli rüzgar türbinleri [35]

2.2.1.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

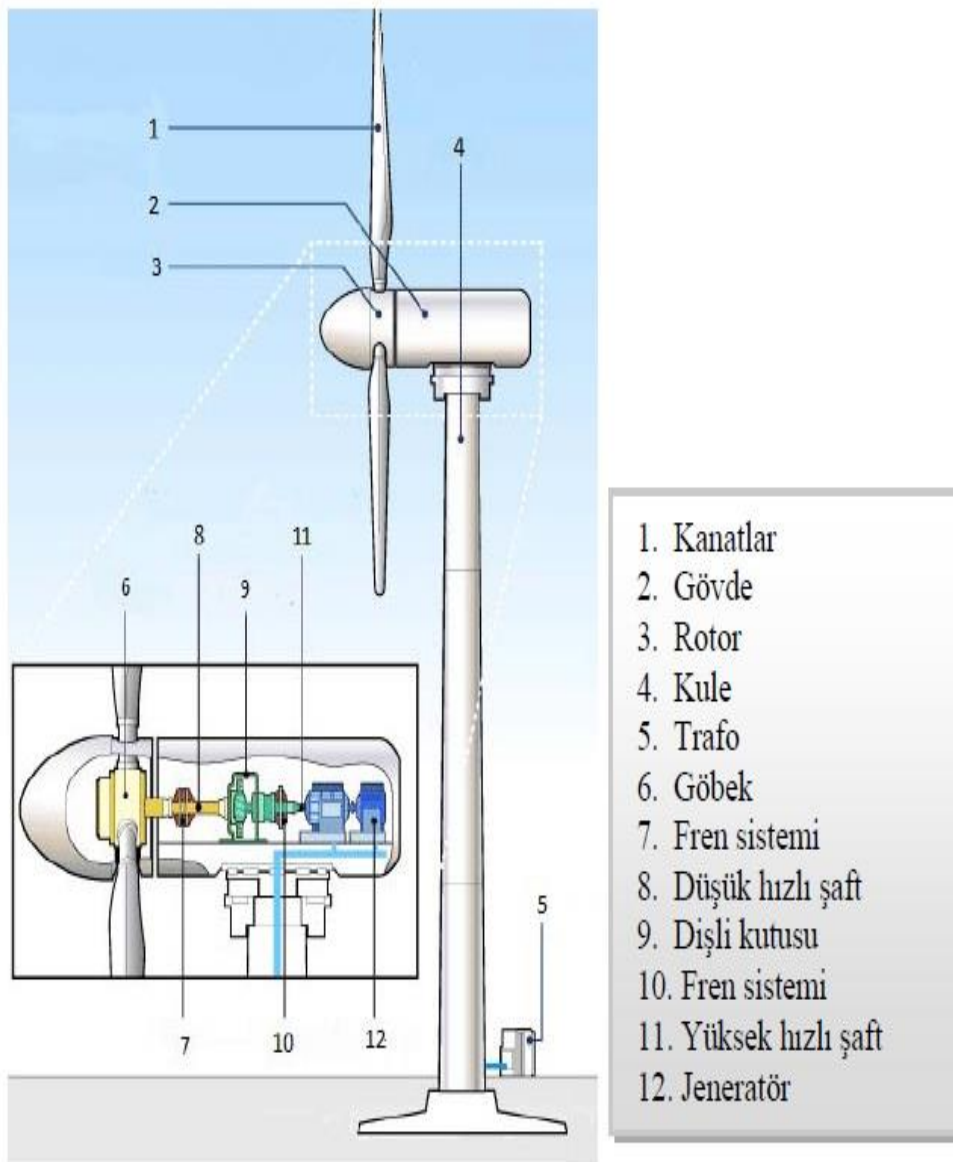
Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde ana rotor mili dikey olarak çalışır. Ana rotorun dikey olarak çalışmasının avantajı, dişli kutusu ve jeneratör gibi ekipmanlar yere yerleştirilebilir ve bunların desteklenmesi için bir kuleye ihtiyaç olmaz. Ek olarak dikey eksenli rüzgar türbinlerinin rüzgara göre yönlendirilmesine gerek yoktur. Bu tip rüzgar türbinlerinde genel olarak dezavantajlar ise, her bir dönüş sırasında meydana titreşim ile birlikte dikey eksenli rüzgar türbinlerinin bir kule üzerine monte edilmesindeki zorluklar ve bunun neticesinde yere yakın bölgelerde rüzgarın düşük hızlı olmasından dolayı verimde düşüklükler meydana gelmesidir. Şekil 2.5’de dikey eksenli bir rüzgar türbini gösterilmiştir [37].



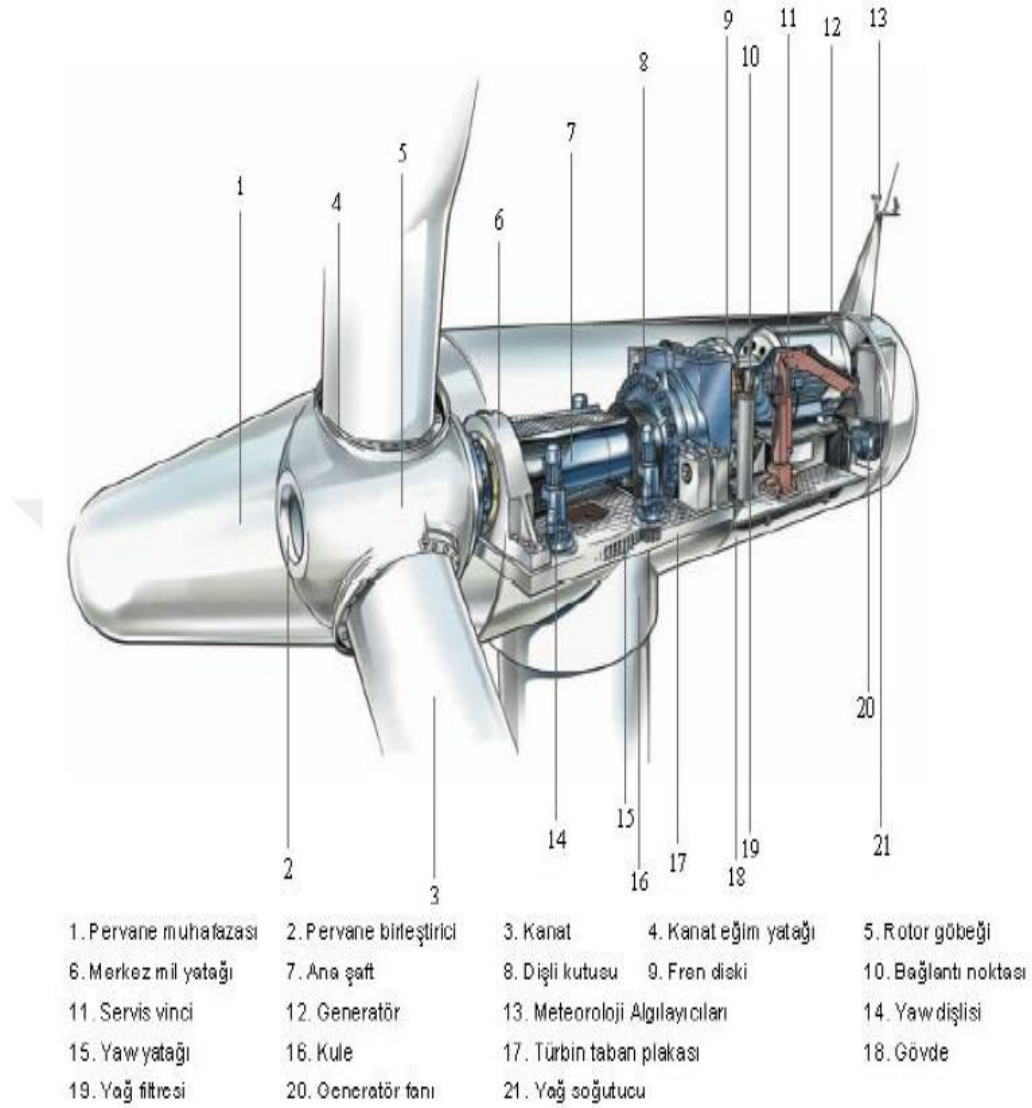
Şekil 2.5 Dikey eksenli rüzgar türbini [40]

2.2.2. Rüzgar Türbini Bileşenleri

Bir rüzgar türbininin başlıca elemanları, rotor kanatları, anemometre, frenleme düzeneği, dişli kutusu, yaw mekanizması ve kuledir. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de genel olarak rüzgar türbini elemanları ve bu elemanların bulunduğu konumlar gösterilmiştir [41].



Şekil 2.6 Rüzgar türbininin genel yapısı [42]



Şekil 2.7 Rüzgar türbini kanatları ve nasele içerisindeki bileşenler [35]

Son zamanlarda türbinlerde kullanılan malzemelerde ekonomik ve teknolojik gelişmeler sonucunda daha büyük rüzgar türbinleri tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde malzeme kullanımı, türbinin büyük veya küçük olmasına bağlı olarak farklılıklar gösterebilir [6].

Örnek olarak Tablo 2.1’de 2 MW güç üreten bir rüzgar türbini bileşenlerinin yapıldığı malzemeler verilmiştir.

Tablo 2.1 Rüzgar türbin bileşenlerinin yapıldığı malzemeler [43]

Bileşen	Malzeme
Kule	Düşük Karbonlu Çelik
Kule, Katodik Koruma	Çinko Alaşımı
Nasel, Dişliler	Paslanmaz Çelik
Nasel, Jeneratör Göbeği	Dökme Demir
Nasel, Jeneratör İletkenleri	Bakır
Nasel, Transformator Göbeği	Dökme Demir
Nasel, Transformator İletkenleri	Bakır
Nasel, Gövde	GFRP
Nasel, Ana Şaft	Dökme Demir
Nasel, Diğer Dövme Bileşenler	Paslanmaz Çelik
Nasel, Diğer Döküm Bileşenler	Dökme Demir
Rotor, Kanatlar	GFRP, CFRP
Rotor, Demir Bileşenler	Dökme Demir
Temel, Platform	Beton
Temel, Çelik Parçalar	Düşük karbonlu Çelik
Aktarma, Kondüktörler	Bakır, Alüminyum Alaşımı
Aktarma, Yalıtım	Polietilen (PE)

Ek olarak Tablo 2.2 'de ise rüzgar türbini bileşenlerine ait üretim yöntemleri verilmiştir.

Tablo 2.2 Bileşenlerin üretim yöntemleri [43]

Bileşen	Üretim Prosesi
Kule	Dövme, Çekme
Kule, Katodik Koruma	Döküm
Nasel, Dişliler	Dövme, Çekme
Nasel, Jeneratör Göbeği	Dövme, Çekme
Nasel, Jeneratör İletkenleri	Dövme, Çekme
Nasel, Transformator Göbeği	Dövme, Çekme
Nasel, Transformator İletkenleri	Dövme, Çekme
Nasel, Gövde	Kompozit Şekillendirme
Nasel, Ana Şaft	Döküm
Nasel, Diğer Dövme Bileşenler	Dövme, Çekme
Nasel, Diğer Döküm Bileşenler	Döküm

Tablo 2.2. (Devamı)

Bileşen	Üretim Prosesi
Rotor, Kanatlar	Kompozit Şekillendirme
Rotor, Demir Bileşenler	Döküm
Temel, Platform	İnşa etme
Temel, Çelik Parçalar	Dövme, Çekme
Aktarma, Kondüktörler	Dövme, Çekme
Aktarma, Yalıtım	Polimer Ekstrüzyon

2.2.2.1. Rüzgar Türbin Kanatları

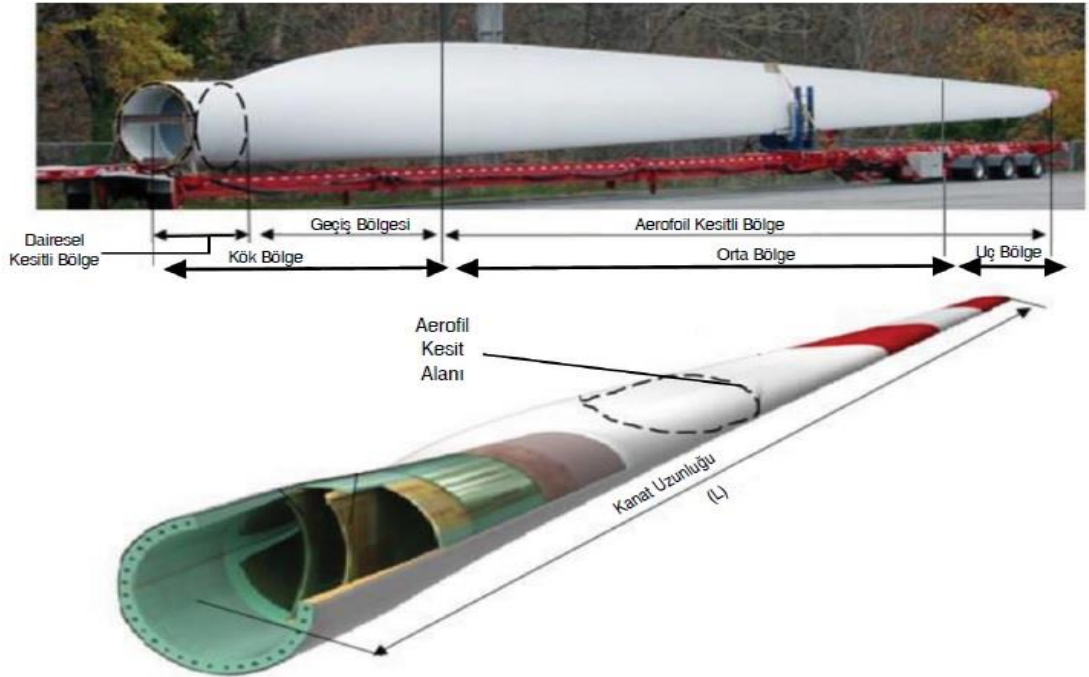
Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve bu enerjiyi mil aracılığı ile dişli kutusuna ileten rüzgar türbini elemanıdır. Rotor kanatlarına etkiyen rüzgar, rotor merkezine ve kanatların gövdesine doğru yöneldiğinde, rüzgar tarafından oluşacak kaldırma kuvveti azalır. Rotor kanatları, rüzgar etkisi ile burulmak zorundadır ve dolayısı ile rotor kanatlarının arka uçları, rüzgar ile aynı yönde olacak şekilde itilir. Şekil 2.8’de verilen rüzgar türbini kanatları GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) malzemelerden, yani cam elyaf ile güçlendirilmiş polimer esaslı malzemelerden yapılır. Ek olarak karbon elyaf takviye elemanı da kullanılabilir. Fakat karbon elyaf, cam elyafa göre daha pahalı bir malzemedir [43].

Kanatlar mekanik ve aerodinamik özellikleri ile rüzgar türbininin çalışma ömrünü ve performansını etkileyen en önemli rüzgar türbini parçasıdır. 3 yıl içerisinde bir rüzgar türbini kanadının arıza oranı yaklaşık olarak %20 civarındadır. Bu kuşkusuz çok fazla bir orandır. Rüzgar türbin kanatlarının güvenilirliğini ve çalışma ömrünü arttırmak, türbin geliştiricileri için önemli bir problemdir [1].



Şekil 2.8 Rüzgar türbini kanatlarının görünümü [43]

Rotor kanatları yapısal olarak kök bölge, orta bölge ve uç bölge olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Kanadın kök bölgesi kanadın profilinin şeklini aldığı yer ile kanadın bağlantı noktası arasında kalan bölgedir ve kanadın en çok zorlanmaya maruz kalan bölgesidir. Kanat kök bölgesinin üst kısmında ise kanat orta bölgesi bulunur ve kanadın aerodinamik parametreler göz önünde bulundurularak tasarlanan bölümü olup güç üretiminde en önemli kısımdır. Kanat uç bölgesi ise kanat orta bölgesi kadar güç üretiminde kritik olmasa bile bu konuda önemli bir rol oynamaktadır. Kanadın en narin bölgesi kanat uç bölgesidir [36].



Şekil 2.9 Yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının bölgeleri ve kesiti [36]

Rüzgar türbininin verimliliği ile ilgili olarak rotor kanatları, verimliliği etkileyen en önemli elemanlardır ve verim kaybı en fazla rotor kanatlarında meydana gelmektedir. Günümüzde üretilen rüzgar türbinlerinin verimi %70-80 oranında değişmektedir. Kanatların boyları türbinin gücü ile yakından ilgilidir. Bir rüzgar türbininde üretilen gücün miktarı, rotor kanatlarının boylarının karesi ile doğru orantılıdır [44].

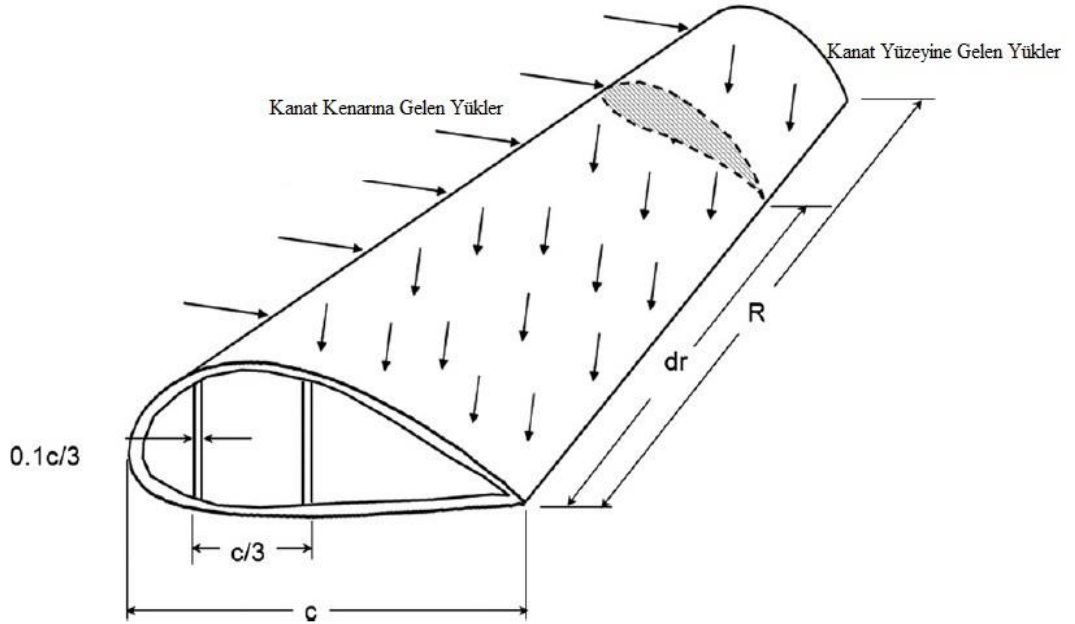
Rüzgar türbin kanatları çalışma ömrü boyunca dış ortamda çalışacağından kompozit yapıya zarar veren, nem, UV, yağmurlar ve sıcaklık farklarına maruz kalmaktadır. Bu çevresel etkenler kanatların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [45].

2.2.3. Türbin Kanatlarına Etkiyen Kuvvetler ve Gerilmeler

Rüzgar türbinleri ile enerji üretebilmek için rüzgarın kinetik enerjisinden faydalanılır. Bu nedenle rüzgar türbinleri sürekli hızı azalıp artan rüzgarla etkileşim halinde olup, rüzgarın meydana getirdiği güçlere maruz kalmaktadır. Bu güçler tarafından en çok zorlanan rüzgar türbini parçası ise rotor kanatlarıdır. Rotor kanatları gibi, sürekli olarak eğilme ve bükülmeye maruz kalan parçalarda, zaman içerisinde zorlamaya bağlı olarak çatlak başlamasına müteakiben kopmaya kadar giden durumlar ile karşılaşabilmektedir. Kanatlar, rüzgarın kuvveti ve kanatların dönmesi ile ortaya çıkan atalet kuvvetlerinin teğetsel ve nominal kuvvetler etkisi altında kalmaktadır [6,38].

Genel olarak rüzgar türbinleri minimum bakım ile tamire ihtiyaç duyulmadan 20-25 yıl arasında çalışmalıdır. Rüzgar türbininin bu şekilde çalışması için rüzgar türbini kanatlarının deformasyonunun çok düşük olması ve bunun sonucunda kanatlarının aerodinamik özelliklerini sürdürebilmesi gereklidir. Rüzgar türbini kanatlarının dönmeden kaynaklı yerçekimi kuvvetlerine ve rüzgar tarafından uygulanan tekrarlı yüklemeye ve aynı zamanda aşırı rüzgar yüklemelerine dayanması gerekmektedir. Büyük ve çok büyük rüzgar türbinleri için yüksek rüzgar ve yerçekimi kuvvetlerinden karşı güvenilirlik sağlanması önemli bir problem olmaktadır [1].

Denizüstü ve karasal rüzgar türbin kanatlarında görülen en önemli yüklemeler kanat yüzeyi ve kenarı ile ilgili olan eğilme yükleridir. Kanatların normal çalışma döngüsü sırasında, kanatların giriş kenarlarının (leading edge) rüzgarı karşılayacak şekilde yönlendirilmesi söz konusudur. Ek olarak gerçek rüzgar yönünün rotor dönme yüzeyine dik olmasına karşın, rüzgar türbini kanatları için etkili rüzgar yönü rotorun dönme düzleminde dir. Bu nedenle, rotor kanatlarının kenarlarındaki eğilme (edgewise bending) dönme düzleminde meydana gelirken, yüzeysel eğilme yüklemeleri rotorun dönme eksenine paralel yönde düzlem dışı deformasyon meydana getirmeye eğilimi gösterir. Kanadın kenarlarındaki eğilme zorlanmaları dış kabuk yapısı tarafından taşınırken, yüzeysel eğilme zorlanmaları ana giriş tarafından karşılanmaktadır. Kanat üzerine etkiyen eğilme yükleri Şekil 2.10’da gösterilmiştir [46].

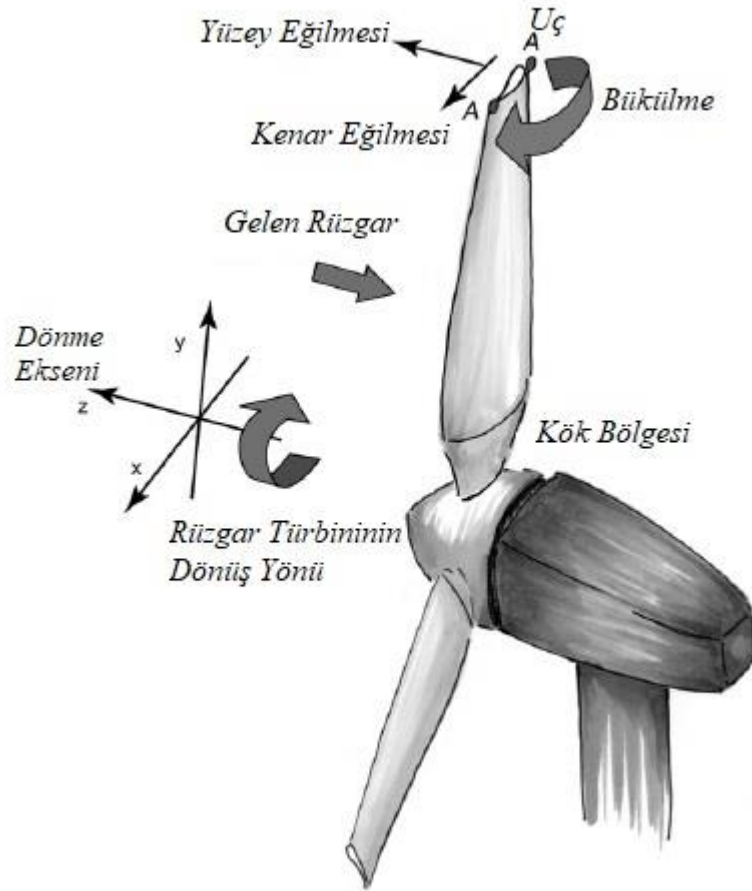


Şekil 2.10 Kanada etkiyen eğilme kuvvetleri [46]

Şekil 2.10’den görüldüğü gibi, rüzgar türbin kanatları yüzey ve kenara etkiyen eğilme yüklemeleri gibi dış yüklemelere, yerçekimsel yüklemelere, atalet kuvvetlerine ve burulma yüklemelerine maruz kalmaktadır. Kenar yüklemesi hem yerçekimsel yüklemeye hem de dönmeden gelen zorlamalardan kaynaklanırken, yüzey yüklemesi rüzgar basıncından dolayı kaynaklanmaktadır. Kenar yüklemelerine bağlı olarak meydana gelen en büyük moment, kanadın kökünde meydana gelmektedir. Yüzey ve

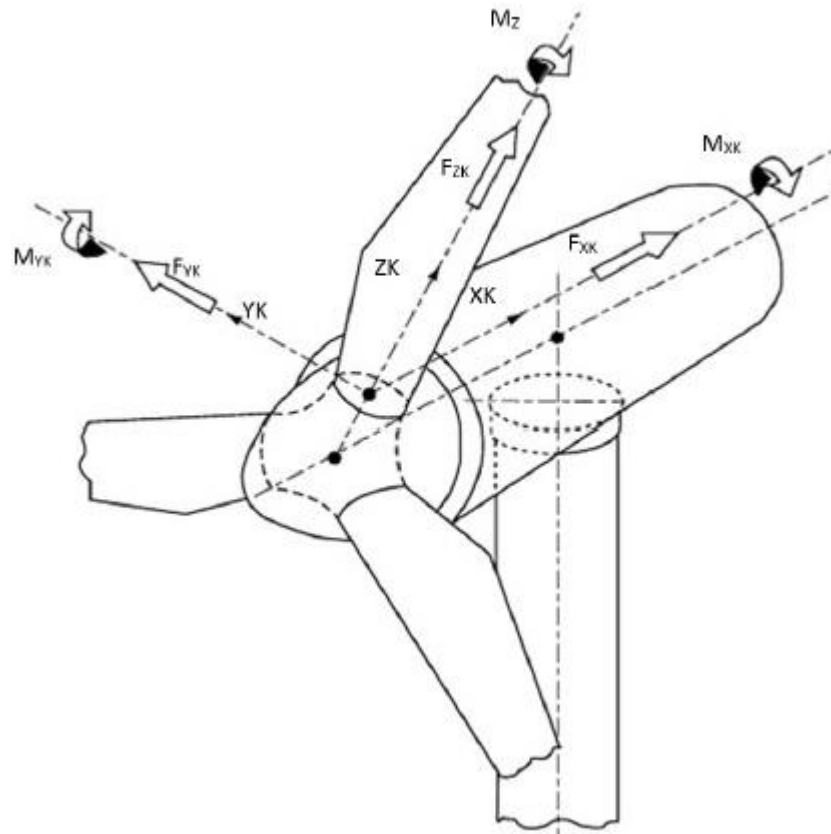
kenar eğilme yükleri malzemede yüksek boylamsal, çekme ve basma gerilmelerine neden olmaktadır. Rüzgar türbini kanadının bazı kenarları çekme gerilmelerine, bazı kenarları ise basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Yüzey ve kenar eğilme momentleri yüksek yorulma hasarlarına neden olmaktadır. Genel olarak rüzgar türbini kanatlarının arızalarının % 97 'si bu iki momentin etkisi ile meydana gelmektedir [1].

Şekil 2.11' e bakıldığında rüzgar türbini z ekseninde dönmektedir. Gelen rüzgarın yönünün negatif z yönünde olduğu kabul edilir. Aerodinamik yükleme y ekseninde kanadın bükülmesine neden olur ve sırasıyla kenar ve yüzey eğilmeleri de x ve z ekseninde meydana gelir. Merkezkaç yüklemelerden dolayı kanadın ucu y yönünde bükülmeye zorlanacaktır. Bu bükülme kanadın aerodinamik özelliklerini değiştirmedikinden ve yapıyı tehlikeye atmadığından dolayı ihmal edilir. Büyük kanatlı rüzgar türbinlerinde, her bir kanadın ağırlığı da hesaba katılmalıdır [47].



Şekil 2.11 Kanada etkiyen yüklemeler ve geometri [47]

Rüzgar türbin kanatlarına etkiyen kuvvetlerle ilgili bir toparlama yapacak olursak, rüzgardan kaynaklanan aerodinamik kuvvetler, rotor kanatlarının hareketleri nedeniyle oluşan santrifüj yüklemeleri, kanadın yön değiştirmesi ile ilgili olan jiroskop kuvvetleri ve işletme koşulları ile ilgili olan farklı yükler olarak sınıflandırılabilir. Kanada etkiyen aerodinamik yükler nedeniyle kanat, rüzgar yönünde ve etkiyen yer çekimi kuvveti nedeniyle yerçekimi ivmesi yönünde olmak üzere eğilme zorlanmasına maruz kalmaktadır. Rüzgar türbini kanadının maruz kaldığı kuvvetler bir koordinat düzleminde gösterilmek istense, ZK yönünde yerçekimi ile santrifüj kuvvetleri, YK yönünde yerçekimi ve aerodinamik kuvvetler, XK yönünde ise aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj kuvvetleri şeklinde belirtilebilir. Şekil 2.12’de sözü edilen koordinat sistemi görsel olarak verilmiştir [42].



Şekil 2.12 Koordinat sistemine göre kanadın maruz kaldığı kuvvetler [42]

Yukarıda verilen koordinat sisteminde, XK, YK, ZK koordinat düzlemleri, F_{XK}, F_{YK}, F_{ZK} , sırasıyla XK, YK, ZK koordinat düzlemleri yönündeki kuvvetleri ve

son olarak da M_{XK}, M_{YK}, M_{ZK} ise sırasıyla XK, YK, ZK koordinat düzlemleri yönündeki momentleri göstermektedir [42].

Çalışma süresince, kanadın şeklinin kararlılığı yani aerodinamik profili, yüksek dayanıklılığı ve güvenilir olması sağlanmalıdır. Şekil kararlılığı, kanadın rüzgar yükü altında minimum eğilmesini ifade etmektedir. Şekil kararlılığının sağlanması, kanat malzemesinin eğilmeye karşı rijitliğinin artırılması ile elde edilir [1].

Sonuç olarak rüzgar türbin kanatlarında olması gereken ana gereksinimler aşağıdaki gibi olmalıdır [1].

- a. Yüksek dayanım (Yerçekimi ve aşırı rüzgar yüklerine dayanmalıdır.)
- b. Yüksek yorulma direnci (20 yıl ve 10^8 çevrim sayısından fazla kararlı şekilde çalışmalıdır.)
- c. Düşük Ağırlık (Yerçekimsel yüklemelerin etkisini ve kule üzerindeki yüklemeyi azalmak için)
- d. Yüksek sertlik (Kule ve kanat arasındaki güvenliği sağlamak ve çalışma süresi boyunca aerodinamik olarak optimum şekil kararlılığını sağlamak için)

2.2.4. Türbin Kanatlarının Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Rüzgar türbin kanatları önceki yıllarda metal malzemelerden yapılmakta idi. Metallerin yorulması, ağır olması ve korozyona karşı direncinin düşük olmasından dolayı rotor kanatları daha sonra alüminyum malzemelerden yapılmaya başlanmıştır. Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte mühendislik malzemeleri üzerinde yapılan ar-ge çalışmaları neticesinde metal veya alüminyum kadar dayanıklı, hafif ve korozyona direnci yüksek polimer esaslı kompozit malzemeler elde edilmiş olup, modern rüzgar türbinleri kanatları elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerden üretilmeye başlanmıştır. Tablo 2.3' de kanat üretiminde kullanılan bazı malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.3 Türbin kanatlarında kullanılan bazı malzemelerin mekanik özellikleri [36]

	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Kopma Mukavemeti (N/mm ²)	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Yorulma Mukavemeti (10 ⁷ N/mm ²)
Çelik (St52)	7,85	520	210	60
Alüminyum Alaşımı (AlMgs)	2,7	480	70	40
Cam Elyaf/Epoksi Kompozit	1,7	420	15	35
Karbon Elyaf/Epoksi Kompozit	1,4	550	44	100
Ağaç (Sitka Spruce)	0,38	~65	~68	~20

Rüzgar türbini kanatlarında en çok tercih edilen malzemeler cam elyaf takviyeli veya karbon elyaf takviyeli, polyester, vinilester veya epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerdir. Karbon elyafın, cam elyafa göre pahalı olmasından dolayı türbin tasarımında maliyet parametresi önemli bir etken olduğundan genel olarak cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılır. Rüzgar türbini kanatlarında karbon elyafın da çok kısıtlı da olsa bir kullanım alanı bulunmaktadır. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere göre daha yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen, dezavantajı ise yüksek maliyetidir [6].

Kanatların yapımında kullanılan kompozit malzemelerde, matris malzemeleri kırılma tokluğu, katman ayrılmasına karşı dayanıklılık ve kompozitin sertliğini etkilemekte iken, uzun elyaflar boylamsal sertlik ve dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Takviye malzemesi olarak çok yönlü olarak dokunmuş kumaşlar kullanılmaktadır. Dokunmuş kumaşların kullanımı ile elyaf açıları istenilen şekilde yerleştirilebilir ve kuvvetin homojen olarak dağılım göstermesi sağlanabilmektedir [1,48].

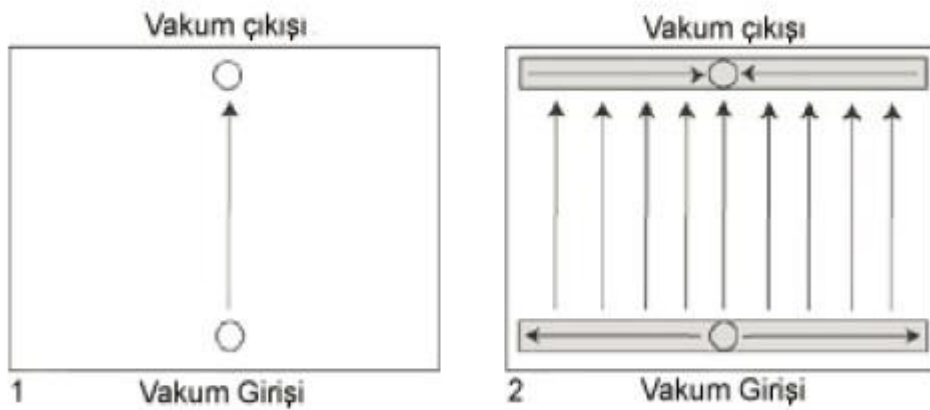
2.2.5. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretim Yöntemleri

Rüzgar türbin kanatları üretiminde genel olarak kullanılan yöntemler, el yatırması yöntemi, vakum infüzyon yöntemi ve reçine transfer yöntemidir. Özellikle rüzgar türbin kanadının performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri de, kanadın yapımında kullanılan malzemeler ile seçilen üretim yöntemi arasındaki ilişkidir [8].

Tez çalışması kapsamındaki testlerde kullanılan numuneler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş olduğundan, vakum infüzyon yöntemi detaylı olarak anlatılacaktır.

2.2.5.1. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, sanayinin farklı kollarında 1980'li yılların başından beri başta Amerika'da ve dünyanın diğer ülkelerinde yaygın olarak kullanılan bir çeşit kompozit malzeme üretme yöntemidir. Vakum infüzyon yönteminde, vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi ile el değmeden kompozit malzeme üretimi amaçlanmaktadır. Komplike yapıda kompozit malzemelerin üretilebildiği bu yöntemde malzemeler içerisine emdirilen reçinenin viskozitesinin uygun olması önem teşkil etmektedir. Reçine, özellikle uzun akışlı bölgelerde mümkün olan en kısa süre içerisinde elyaf içerisine emdirilmelidir. Vakum infüzyon sistemi kapalı ortam içerisinde reçinenin vakum deliğine doğru ilerlemesi şeklinde tanımlanabilir. İnfüzyonun genel görünümü Şekil 2.13'deki gibidir [49].

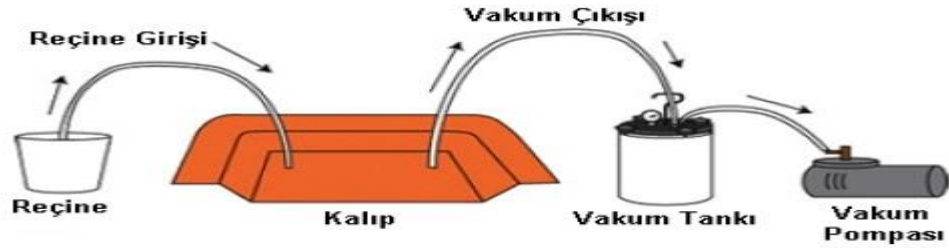


Şekil 2.13 İnfüzyonun genel görünümü [49]

Vakum infüzyon sistemini oluşturan bölümler aşağıdadır [49];

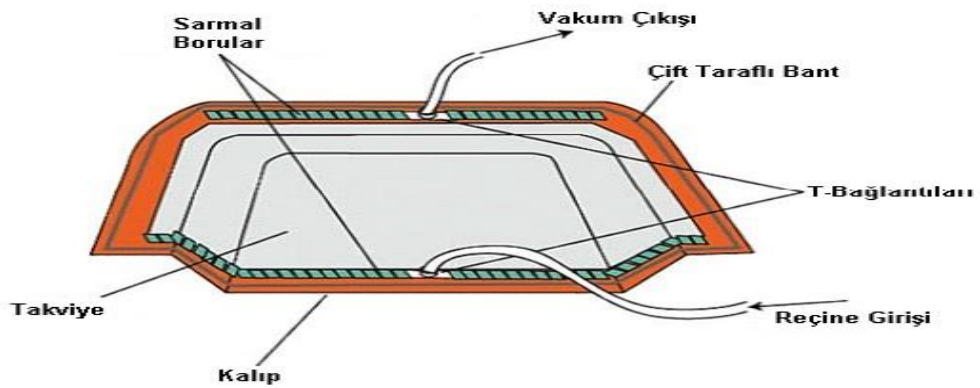
- Vakum pompası
- Vakum tankı (reçine pompalama tankı)
- Kalıp
- Reçine kovası

Genel sistemin mantığı hep aynı olmasına rağmen bu dört bölüm arasındaki bağlantı şekilleri değişkenlik gösterebilir. Şekil 2.14’de vakum infüzyon sisteminde kullanılan elemanlar gösterilmiştir.

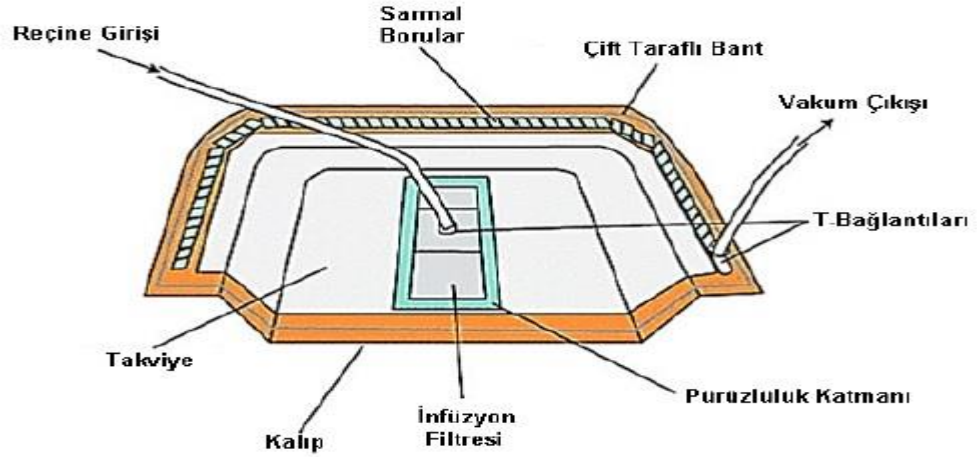


Şekil 2.14 Vakum infüzyon sistemi bileşenleri [50]

Proses açısından iki tip vakum infüzyon yöntemi vardır. Bu prosesler arasındaki en temel fark reçinenin kalıba girdiği yerin değişmesidir. Şekil 2.15’de ortasından reçine verilen ve etrafından vakumlanan bir ürün imalatı görünmektedir. Şekil 2.16’da ise aynı ürünün farklı bir şekilde üretilmesi gösterilmiştir. İkinci yolda reçine ve vakum hatları karşılıklı olarak yerleştirilmek suretiyle üretim yapılmaktadır [49].



Şekil 2.15 Etrafından vakumlanıp reçinenin ortadan verildiği sistem (Tip1) [49]



Şekil 2.16 Vakum ve reçine hatlarının karşılıklı yerleştirildiği sistemi (Tip 2) [49]

Vakum infüzyon metodu ile kompozit malzeme üretim aşamaları aşağıda verilmiştir [49].

- Kalıp yüzeyi tüm yağ, toz, çizik gibi yabancı maddelerden arındırılmalıdır. Kalıp daha önceden kullanılmış ise kalıntısı olması muhtemel kalıp ayırıcı gibi malzemeler kalıp yüzeyinden temizlenmelidir.
- Kalıbın temizlenmesini müteakiben kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanır.
- Uygun olarak seçilen jelkot püskürtme veya fırça yardımı ile yüzeye uygulanır.
- Cam elyaf, karbon elyaf vs. takviye malzemeleri istenilen oryantasyona göre üst üste konulur ve kaymayı önlemek için aralarına yapıştırıcı püskürtülür. Takviye malzemesi kalıp boyutlarına göre kesilir.
- Yüzey pürüzlüğünü sağlamada kullanılan katman (peel ply) kalıp yüzeyinin tamamına serilir ve yapıştırıcı kullanılarak takviye malzemesinin üzerine yapıştırılır.
- Vakum hatları ile reçine hatları kalıbın çevresine göre ayarlanır ve infüzyon macunu kalıbın çevresine yapışacak şekilde uygulanır ve vakum tankları hatlara bağlanır.
- Kumaşın üzerine delikli bir tabaka yerleştirilir.
- Vakum torbası kalıba göre kesilerek kalıp üzerine yeterli derecede baskı yapması sağlanır. Derin kalıplar için özellikle elyaf yüzeyine tam olarak baskı yapması gerektiğinden derinlik faktörü hesaplanarak kesilmelidir. Kesilme

işlemi bittikten sonra, vakum torbası kalıp çevresine sızdırmaz şekilde yapıştırılır.

- i. Vakum pompası çalıştırılır ve vakum göstergesi vakum infüzyon sistemine bağlanır. Vakum torbasında kaçak kontrolü yapılarak, kaçak olup olmadığı tespit edilir.
- j. Sistem üzerine reçine geçişini sağlayacak olan portlar eklenir.
- k. Üretim için gerekli olan reçine miktarı hesaplanır, reçine içerisine eklenmesi gerekli olan katkı maddeleri katılarak karıştırılır.
- l. Hortumların portlara bağlanması ile reçine akışı başlatılır. Kalıbın bütün yüzeyi reçine ile ıslanana dek işleme devam edilir. Tüm noktaların ıslanmasını müteakip reçine besleme hatları kapatılır.
- m. Parça tamamen sertleşene kadar vakum altında tutulur. Sertleşme tamamlandıktan sonra sızdırmaz bant ayrılır, reçine kalıptan sökülür ve reçine akış hatları temizlenir. Bu işlemden sonra parça kalıptan çıkarılır.

2.2.5.1.1. Vakum İnfüzyon Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları [51];

- a. El yatırması yöntemine kıyasla, daha yüksek hacimli elyaf içeren kompozit malzemeler üretilebilir. Böylece üretilen kompozit malzemelerde elyaf oranının fazla olması malzeme yapısının daha sağlam ve uzun ömürlü olmasına olanak sağlamaktadır.
- b. Vakum infüzyon yönteminde üretilen kompozit malzemeler için harcanan reçine oranı aynı şartlar içinde üretilen her malzeme için eşit orandadır. El yatırması yönteminde harcanan reçine miktarı kişiye bağlı olarak değişir.
- c. Vakum infüzyon yönteminde reçinenin elyaf tarafından her yerde eşit olarak emilmesi ve dağılması sonucunda reçine birikmesi elyaf katlanması olayları meydana gelmez. Bu da üretilen kompozit malzemedeki homojenlik sağlar.
- d. Vakum naylonu kullanılarak üzeri kapatılmış olan takviye elemanlarına reçine takviyesi boru yardımıyla vakum naylonu altından yapıldığından

çevreye ve ürün yüzeyine reçine bulaşmaz ve tepkime sonrasında meydana gelen gazların çevreye yayılımı söz konusu değildir.

- e. Kalıp tek taraflıdır.
- f. Kalıp malzemesinin yüksek mukavemetli olmasına gerek yoktur.
- g. Bu yöntem ile büyük boyutlu parçalar üretilebilir.
- h. El yatırması yöntemindeki kalıplar, vakum infüzyon için uygun hale getirilerek kullanılabilir.

Dezavantajları [51];

- a. Diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha fazla ekipman gerektiğinden, iş gücü ihtiyacı ve maliyeti daha yüksektir.
- b. El yatırması yöntemine kıyasla işlem aşamaları daha komplekstir.
- c. Takviye elemanı tarafından reçine emilimi olmayan bölgeler olabilir. Bu da atık malzeme miktarını artırır.
- d. Düşük viskoziteli reçine kullanılması gerekliliği, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini düşürebilir.

2.2.5.1.2. Vakum İnfüzyon Sisteminin Bileşenleri

Vakum infüzyon sistemi bileşenleri, vakum pompaları, ayırıcı kumaş, hava geçirici kumaş, vakum naylonu, sızdırmaz macun ve vakum infüzyon tesisatıdır. Aşağıda bu bileşenlerin işlevleri açıklanmıştır.

Vakum Pompaları, Vakum infüzyon sistemin en önemli ekipmanları vakum pompalarıdır. Vakum pompalarının çalışma şekli mekanik olarak kompresörlere benzer fakat çalışma yönleri terstir. Vakum pompaları havanın emilmesini ve atmosfere verilmesini sağlamaktadır. Vakum pompaları kendi aralarında gücüne, debiye ve vakum basınç değerlerine göre farklılıklar gösterirler [52].

Ayırıcı Kumaş, Bu kumaş reçineye yapışmaz ve sistem havasının emiliminde kolaylık sağlamakla görevli hava alıcı kumaşın yapışmasına engel olur. Fazla matris malzemesi bu kumaşın üzerine çıkar ve laminasyonun kürleşmesinden sonra kumaşla birlikte laminasyon yüzeyinden soyulur. Ayırıcı kumaşın, laminasyon yüzeyinde

tırtıklı bir yüzey bırakmasından dolayı, laminasyon yüzeyine yapılacak ekstra bağlamalar için yüzey hazırlığına gerek yoktur. Ayırıcı kumaşlar üretilirken yüksek sıcaklıkta çalışma şartları göz önünde bulundurularak üretilirler [52].

Hava Geçirici Kumaş, Bu kumaş havanın sistem içerisinde kollektöre toplanmasını sağlamakla birlikte laminasyon ile vakum naylonu arasında ince bir hava katmanı kalmasına olanak verir. Hava geçirici kumaş hava geçişi sırasında fazla reçinenin emilmesini de sağlamaktadır [52].

Vakum Naylonu, Vakum naylonunun görevi, laminasyonun bir yüzeyini sararak sistemin hava izolasyonunu sağlamaktır. Laminasyonun kürlenip kürlenmediğinin kontrol edilmesi açısından opak bir naylon yerine şeffaf bir naylon tercih edilebilir. Oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklık değerlerinde çalışma yapılacak ise, kullanılacak olan vakum naylonunun özel olarak üretilmiş olması gerekmektedir. İyi bir naylon kullanılması hava izolasyonunu iyi sağlayacağından dolayı sistemde kullanılacak olan pompanın küçük olmasına olanak sağlamaktadır. Sistem içerisinde hava kaçağına izin veren malzemelerin kullanılması ve izolasyonun iyi yapılmaması daha yüksek kapasiteli vakum pompalarının kullanılmasını gerektirir [52].

Sızdırmaz Macun, Bu macunun görevi, vakum naylonu ile kalıp çevresindeki sızdırmazlığı sağlamaktır. Sızdırmaz macunun yapıştırıcı özelliği vardır [52].

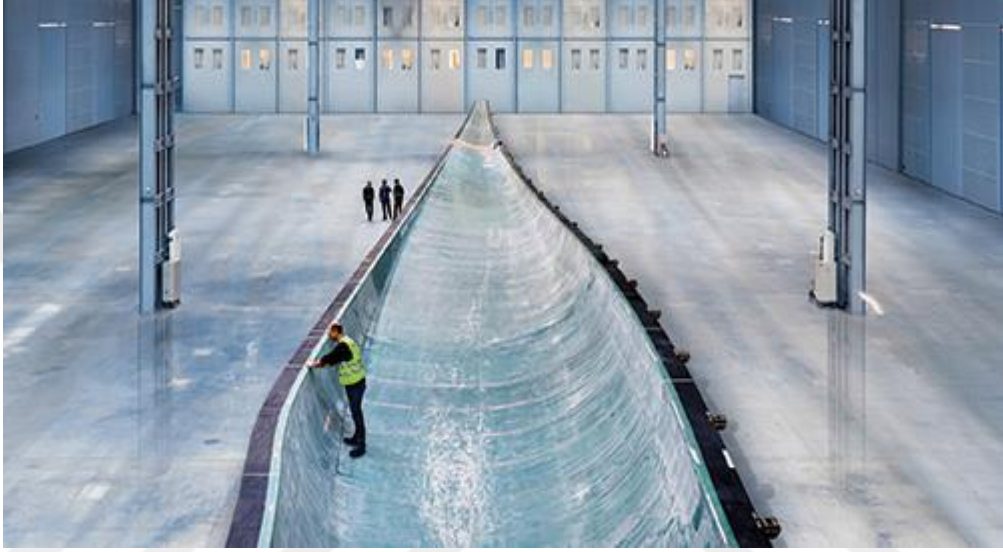
Tesisat, Sistem içerisindeki hava basıncının düşürülmesi ve vakum pompasının sistem içerisindeki havayı emmesi için, vakum pompası ile düzeneğin arasında bir tesisat olması gereklidir. En basit sistem, tesisatın sisteme bağlanmasını sağlayan bağlantı kanalı, kapan ve hortum ile oluşturulabilir [52].

2.2.5.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Rüzgar Türbin Kanadı Üretimi

Vakum infüzyon yöntemi ile rüzgar türbin kanadının üretim aşamaları aşağıda açıklanmıştır.

Üretim sırasında kullanılacak olan hammadde, sarf malzeme, el aleti gibi ekipmanlar ile birlikte, ürünlerin yapımında kullanılacak olan kalıpların önceden

tedarik edilmesi gereklidir. Bu malzemeler ile ilgili ihtiyaç planlaması üretim aşamaları sırasında ortaya çıkabilecek olan malzeme ihtiyaçları konusundaki problemleri engellemesi açısından oldukça önemlidir. İyi planlama daha az maliyet ve daha yüksek kaliteyi de beraberinde getirir. Bu aşamaya ekipman ve malzeme tedarik aşaması denilebilir [53]. Şekil 2.17’de bir rüzgar türbin kanadının kalıbı görülmektedir.



Şekil 2.17 Rüzgar türbin kanadı kalıbı [54]

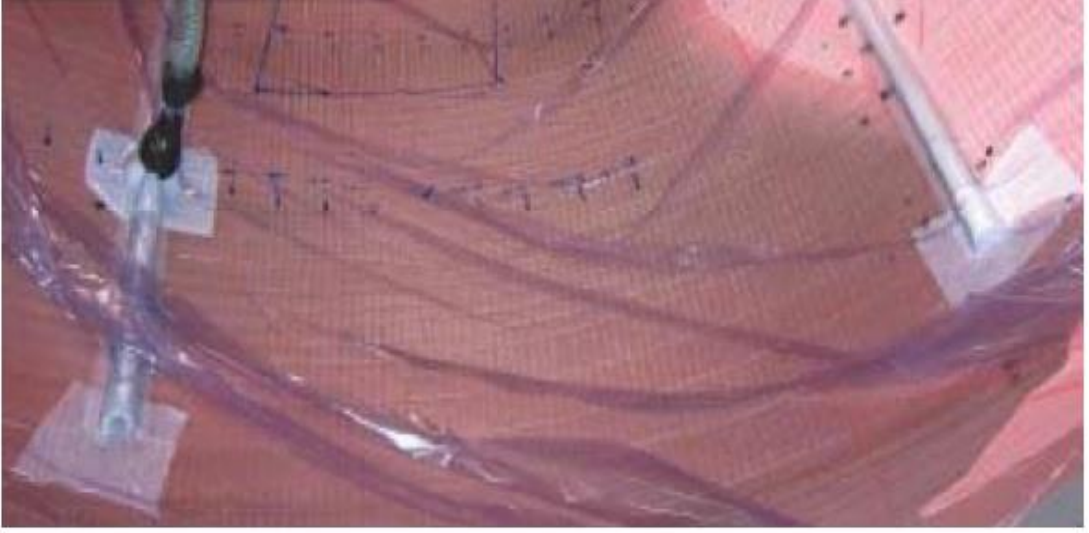
Rüzgar türbini kanadı imalatında kullanılan matris malzemeleri, takviye malzemeleri ve ara malzemeler genellikle tedarikçilerden elde edilir. Bu malzemeler ambalajlanmış bir şekilde ve belirli ölçülerde gelmektedir. Malzemelerin, kullanılacak olan kalıba uygun hale getirilmesi ve ön hazırlıklar yapılması gereklidir. Hammaddeler ile ilgili hazırlıklar eğer önceden yapılmaz ise, işin süresinde uzama ile karşı karşıya kalınabilir. En önemli ön hazırlık ise, takviye elemanlarının kullanılacak olan kalıba göre kesilmesi işlemidir. Bu konuda endüstride otomatik kesme makinaları kullanılmaktadır. Bu makinaların kullanılması hem hızlı kesime olanak sağlar hem de takviye elemanlarındaki fire oranını oldukça azaltır. Aynı şekilde eğer hazır alınması mümkün değilse, ara malzemeler (köpük ve balsa) ile ilgili yapılacak olan ön hazırlıklar da oldukça önemlidir. Bunun dışında reçine ve sertleştiriciler de malzeme hazırlığı açısından önemli bir unsurdur. Bu aşama, hammadde hazırlık aşamasıdır [53].

Kanadın kalıplanması aşamasında ise, kanat iki yüzeyden oluştuğundan her iki yüzey için de iki farklı kalıp yapılmaktadır. Bu kalıplar vasıtasıyla yüzeylerin kompozit malzeme imalatı yapıldıktan sonra, “omurga” adı verilen ara perde şeklindeki parçalar yapıştırılır ve bu iki kabuk “yapıştırma kepleri “ kullanılarak ve hamur şeklindeki reçine ile dışardan ısı verilmek suretiyle kürlenir. Kanadın emme ve basma yüzeylerinin imalatına başlanmadan önce kalıp yüzeyine “kalıp ayırıcı” ismi verilen kimyasallar sürülür. Kalıp ayırıcının kullanılma sebebi, kanadın üretim aşamaları bittikten sonra kanat yüzeylerinin kalıba yapışmasını engellemek ve kanadı kolayca kalıptan çıkarmaktır. Daha sonra önceden kalıba göre hazırlanmış olan cam kumaşlar veya karbon kumaşlar, planlarına göre kuru halde olmak kaydıyla kalıba serilir. Daha sonra sandviç yapıyı meydana getiren balsa veya köpük ara malzemeleri yerleştirilir. Ara malzemelerin üzerine tekrar cam kumaşı ve karbon kumaşı serilerek kumaş serme işlemi sonlandırılır [53]. Şekil 2.18’de cam kumaşların kalıba serilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Cam kumaşların kalıba serilmesi [55]

Takviye elemanlarının kalıba serilmesinden sonra, infüzyon yöntemi reçine hortumlarının açılması ile başlar. Şekil 2.19’da vakumlanmış kalıp görülmektedir.



Şekil 2.19 İnfüzyon öncesi vakumlanmış parça [53]

Takviye elemanının reçine tarafından hiç kuru yer kalmadan ıslatılıp doyurulmasına kadar reçine takviyesi yapılır ve işlem kesilmez. Daha sonra kalıp ısıtılır ve reçinenin sertleşmesi beklenir. Sertleşme meydana geldikten sonra, ürün üzerinde bulunan yardımcı ekipmanlar sökülür ve “omurga” adı verilen parçalar yüzeylerden birbirlerine yapıştırılır. Daha sonra iki yüzey, kıvamı hamur şeklinde olan reçine ile birleştirilir. İki yüzeyin üst üste getirilme işlemi, ya bir hidrolik sistem ile birbiri üzerine kapatılarak ya da köprülü vinç kullanılarak bir yüzey ters çevrilmek suretiyle yüzeyler üst üste getirilerek yapılır. Daha sonra kalıp sökülme işlemi yapılır. Kalıp sökülme işleminden sonra, kanat yüzeylerinin birleştiği bölgelerde meydana gelen reçine artıklarının temizlenmesi gerekmektedir. Bu işleme taşlama işlemi adı verilir ve kesme taşları kullanılan el aletleriyle yapılır. Bu işlem yapılırken ortama çok yüksek miktarlarda toz ve gaz yayılacağından, söz konusu işlem özel emiş sistemi olan kabinler içerisinde yapılır [53].

Kanadın taşlama kabini içerisindeki işlemlerinin bitmesini müteakiben kök bölgesinin flanş yüzeyi ölçüsünde olması için kesilmesi ve kullanılacak olan bağlantı elemanlarına göre delme işleminin yapılması için, kanat özel makinalara yerleştirilir.

Otomatik bir program vasıtasıyla çalışan büyük kesme taşları ve matkaplar kesme ve delme işlemini yapar. Kanat delme ve kesme işlemlerinden sonra montaj hattına alınır ve özellikle yıldırımsavar bağlantılarının montaj işlemleri yapılır. Yıldırımsavar montajı teknik olarak çok önemli bir konudur ve yanlış şekilde yapılması maliyeti çok yüksek sonuçlara neden olabilmektedir. Ek olarak çok soğuk bölgelerde çalışacak olan rüzgar türbin kanatları için bazı üreticiler buzlanma önleyici ısıtma sistemleri monte etmektedir [53].

Yukarıda anlatılan işlemlerden sonra yüzey işlemlerine geçilir. Yüzey işlemleri kanat ile ilgili yapılan son işlemlerdir. Yapılan yüzey işlemleri, kanadın dış etkilerden korunmasını sağlar ve yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Bu işlemler genel olarak özel boyalar ile yapılmaktadır. Rüzgar türbin kanadı yüzeyine yapılan kaplama işlemleri kanadı, güneşin zararlı etkilerinden (UV), kar, yağmur ve rüzgarın yıpratıcı etkilerinden ve hava içerisinde bulunan toz, gaz ve asitlerin aşındırıcı etkilerinden korumaktadır. Yüzey kaplama için kullanılan boya jelkot adı verilen poliüretan esaslı kimyasal malzemelerdir. Boyama öncesi yapılan yüzey zımparalama işlemi ile boyanın yüzeye daha iyi tutulması amaçlanmaktadır. Söz konusu yüzey boyama işlemleri önceleri rulo ile yapılmakta idi, fakat daha sonraları gelişen sistemler ile birlikte robot kolları vasıtasıyla yapılmaktadır. Şekil 2.20, Şekil 2.21 ve Şekil 2.22 'de rulo, sprey ve robot kolları ile yapılan bir uygulama görünmektedir [53].



Şekil 2.20 Rulolar ile yapılan yüzey işlemi [56]



Şekil 2.21 Püskürtme tabancası ile yapılan yüzey işlemi [57]



Şekil 2.22 Robot kolları ile yapılan yüzey işlemi [53]

Yüzey işlemlerinin yapılmasından sonra üretilen kanatlar bazı testlerden geçirilmektedir. Bu testler, statik, dinamik, çarpışma ve aerodinamik testleridir. Statik test, kanadın aşırı yüklerle karşı sahip olduğu dayanıklılığı ölçmek amacıyla yapılmaktadır. 30 dk. ila 60 dk. arasında kanat maksimum yüke maruz bırakılır. Kanadın en az 10 saniye kırılmadan bu pozisyonda beklemesi gerekmektedir. Dinamik test, statik testten daha fazla zaman almaktadır. Dinamik test ise, kanadın 20 yıldan fazla çalışma süreci boyunca maruz kalacağı yorulma yüklerine karşı olan dayanımını test etmektir. Bu test bazen üç ay süre alabilmektedir. Kanadın kalın kenarına 3 milyon osilasyon uygulandığında flap tarafından da 3 milyon osilasyon gözlemlenmelidir. Statik ve dinamik testlerden sonra çarpışma testi yapılmaktadır. Çarpışma testi aslında kanada yapılan statik testin daha fazla şiddetli halidir. Yani kanat kırılana kadar bu testin yapılmasına devam edilir. Çarpışma testi ile kanadın kırılmasından sonra, kanadın kırıldığı yer açılarak hatanın neden kaynaklandığı tespit edilmeye çalışılır. Aerodinamik test, rüzgar tünellerinde yapılmaktadır. Genel olarak rüzgar türbin kanatları için özel olarak tasarlanmış laboratuvarlarda yapılır. Bu testin yapılma amacı aerodinamik verimin en yüksek seviyede alınıp alınamayacağını tespit edilmesidir. Test sırasında 200-300 adet sensör kullanılarak hava akışının karakteristiği bulunur [34].

BÖLÜM 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Tanım olarak kompozitler, farklı kimyasal özellikte iki veya daha fazla bileşen içeren malzemelerdir. Kompozitler birçok metal ve alaşımlı malzemeler ile kıyaslandığında üstün mekanik yapı, yüksek dayanım ve düşük ağırlık özellikleri sayesinde inşaat ve makine mühendisliğinde, otomotiv endüstrisinde ve enerji uygulamalarında yaygın olarak kullanılır [1].

Kompozit malzemeler, tek başına herhangi bir malzemedan elde edilemeyen yüksek özgül mukavemet, sertlik, yüksek dayanım ve tokluk gibi mekanik özelliklerin farklı kombinasyonlarına sahip yapay malzemelere olan ihtiyaç üzerine geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler iki ana bileşene sahip olan mühendislik malzemeleridir. Bu bileşenlerden bir tanesi sürekli faz diğeri ise süreksiz fazdır (Şekil 3.1). Süreksiz faz, matris olarak bilinen sürekli faza dahil edilen takviye olarak bilinir. Genel olarak takviye, matrise göre daha dayanıklıdır ve iki faz birbiri içerisinde çözünmezdir. Kompozit malzeme farklı geometrilerde takviye elemanları içerebilir. Kompozit malzemelerin potansiyel olarak avantajları çok fazladır ve bu nedenle malzeme biliminin en hızlı gelişen araştırma ve geliştirme alanlarından biri haline gelmiştir [59].



Şekil 3.1 Kompozit malzemenin yapıtaşları [59]

Kompozit malzemeler doğada mevcut olan farklı malzemelerin çeşitli oranlarda karıştırılması ile elde edilirler. Kompozit malzeme üretilmesindeki ana amaç, tek başına istenen mekanik özelliklere sahip olmayan malzemelerin

birleştirilmek suretiyle mekanik özellikleri yüksek mühendislik malzemeleri meydana getirmektedir. Bu mekanik özellikler, yaşlanma dayanımı, aşınma dayanımı, kırılma tokluğu, ağırlık, korozyon direnci, mukavemet, iletkenlik ve termal özelliklerdir [6].

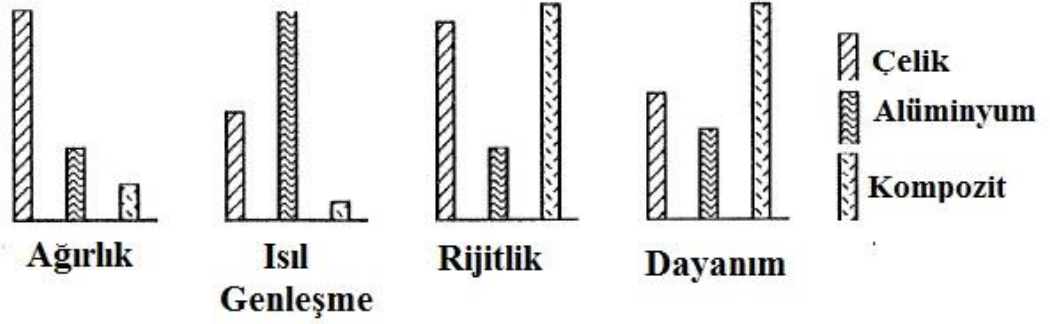
Bir malzemeye kompozit malzeme denilebilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması gereklidir [11].

- a. Üretilen kompozit malzemenin özellikleri kendisini meydana getiren bileşenlerin özelliklerinden farklı olmalıdır.
- b. Kimyasal olarak yapıları birbirlerinden farklı en az iki farklı malzemenin kombinasyonu gereklidir.
- c. Farklı malzemelerin  boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması gereklidir.
- d. Doğal bir malzeme olmaması, yani insan yapısı olması gereklidir.

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre avantajlarına bakıldığında hafiflik, elektriksel yapı, yüksek dayanıklılık, ısıya karşı dayanım, korozyona karşı dayanıklılık, renklendirilme, titreşim sönümleme gibi özellikler bakımından daha üstün oldukları görülür. Hafiflik özelliği ile kompozitler, birim alan açısından metal ve diğer malzemeler ile kıyaslandığında daha yüksek mekanik özellikler vermektedir. Elektriksel yapısı ile kompozit malzemeler uygulama alanlarına göre çok iyi bir iletken ya da çok iyi bir yalıtkan olabilmektedir. Yüksek dayanıklılık özelliği ile kompozit malzemelerin birçok metal malzemeye göre çekme ve eğilme dayanımları daha yüksektir. Ek olarak kompozit malzemenin üretim şekline ve kalıplanmasına göre malzemenin istenilen bölgelerinde daha yüksek dayanım elde edilebilir. Kompozit malzemeler, ısı iletim katsayısı düşük malzemelerden meydana gelmektedir. Isıya karşı dayanım özelliği ile yüksek ısının mevcut olduğu uygulamalarda kullanılabilirler. Özellikle polimer esaslı kompozit malzemeler korozyona, havanın etkilerine ve kimyevi maddelere karşı oldukça dayanıklı yapıdadırlar. Renklendirilebilme özelliği ile kompozit malzemelere kalıplama sırasında renklendirici katılarak, üretilen kompozit malzemenin hiçbir işçilik gerektirmeden kalıcı olarak renklendirilmesi sağlanabilir. Bu zellik sayesinde metal ve diğer malzemelerin renklendirilmesine karşı maliyetin düşmesi sağlanır. Kompozit

malzemeler sünek malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı doğal olarak titreşimli uygulamalarda sönümlenme özelliğine sahiptirler. Titreşimi sönümlenme özelliği sayesinde çatlak ilerlemesi oldukça minimum seviyededir [11].

Şekil 3.2’de kompozitlerin ağırlık, ısı genleşme, rijitlik ve dayanım özellikleri açısından diğer malzemeler ile karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kompozitlerin bazı özelliklerinin farklı malzemelerle karşılaştırılması [60]

Kompozit malzemelerin avantajlarının yanında, dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerin olumsuz özellikleri kompozit malzemeye yansımaktadır. Günümüzdeki çalışmalar bu olumsuzlukların giderilmesi ilgili olarak hızla yapılmaktadır. Kompozit malzemelerin dezavantajları ile ilgili olarak;

- Kompozit malzeme üretimi sırasında, malzemenin içerisinde kalması muhtemel olan hava kabarcıkları malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.
- Üretilen kompozit malzemenin takviye yönüne göre, kompozit malzemeler farklı doğrultuda farklı mukavemet özellikleri gösterebilirler.
- Üretim maliyetleri
- Yüksek yüzey kalitesi istenen parçalarda gerekli yüzey kalitesinin elde edilememesi
- Metal, alüminyum gibi malzemelere oranla geri dönüşüm olayının zor olması gibi durumlar söylenebilir [11].

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler ya içerdikleri matris malzemesinin tipine göre ya da kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye elemanının geometrisine göre sınıflandırılırlar. Kullanılan matris malzemesinin çeşidine göre üç tip kompozit tipi bulunmaktadır. Bunlar, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitlerdir [59].

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak alüminyum, magnezyum ve bakır kullanılabilir. Takviye elemanı olarak ise silikon karbür, alüminyum oksit ve tungsten kullanılır [59].

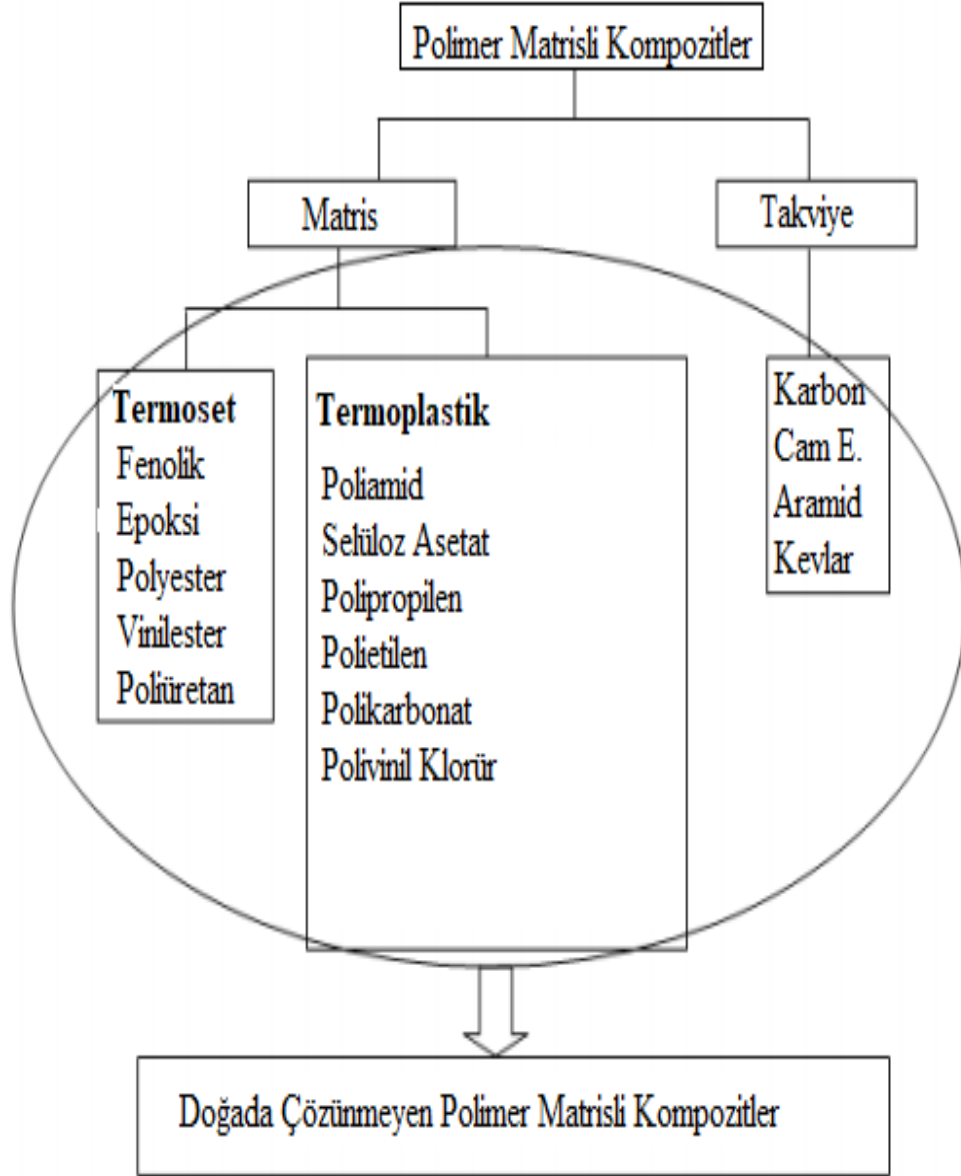
Seramik matrisli kompozitlerde adından da anlaşılacağı üzere matris malzemesi olarak seramikler kullanılır. Kullanılan takviye elemanı ise, silisyum karbür, alümina, silisyum nitrürdür [59].

En yaygın kullanılan kompozit malzemeler ise polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Matris malzemesi olarak çeşitli polimerler kullanılır. Polimer matrisli kompozitlerde termoplastik veya termoset matris malzemesi içerisinde takviye elemanı olarak cam, karbon veya diğer yüksek mukavemetli elyaflar kullanılır. Sonuç olarak elde edilen malzeme korozyon direnci yüksek, dayanıklı ve sert malzemedir. Polimer matrisli kompozit malzemeler geleneksel metal ve alaşımlardan farklı olarak tasarımda esneklik, kolay işleme ve son istenilen ölçülere yakın şekilde ürün üretilme yeteneği açısından birçok avantaj sunmaktadır. Polimer matrisli malzeme ailesi oldukça geniştir. Bu nedenle aşağıdaki iki ana gruba ayrılmaktadır [59].

- a. Sentetik elyaf takviyeli polimer kompozitler
- b. Doğal elyaf takviyeli polimer matris kompozitler

3.1.1. Sentetik Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

Sentetik elyaf takviyeli kompozitler, termoset veya termoplastik matris malzemeleri ile takviye elemanı olarak sentetik elyaflar içermektedir. Polimer matrisli kompozitlere ait bileşenler Şekil 3.3 'de verilmiştir [61].



Şekil 3.3 Sentetik elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin bileşenleri [61]

Polimer matrisli kompozitlerin korozyon direncinin yüksek olmasından dolayı denizcilik uygulamaları ve boru sistemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitler son yıllarda rüzgar enerjisi sektöründe, rüzgar türbin kanatlarının üretiminde kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin yüksek yapısal özelliklere ve halen geniş bir uygulama alanına sahip olmasına rağmen bu kompozitlerin doğada biyolojik olarak parçalanamaz olması dezavantajından dolayı çevre dostu doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeler geliştirilmiştir [61].

3.1.1.1. Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerin dayanıklılığı takviye elemanının dayanıklılığı veya takviye elemanının hacim içeriği ile belirlenir. Çoğunlukla kompozitlerde ana takviye elemanı olarak E- tip cam elyaf (yüksek elektrik direncinden dolayı “E-glass” ya da elektrik camı olarak adlandırılır) kullanılmaktadır. E-cam elyafların ana özellikleri aşağıdaki gibidir [1];

- a. Young modülü (elastisite modülü) : 70....77 GPa
- b. Yoğunluk : 2.55.....2.64 kg/m³
- c. Kopma Uzaması: 4.5.....4.9 %

Polimer kullanılan tüm işlerin % 90’ında cam elyaf kullanılmaktadır. Bunun en temel nedeni, E tipi cam elyafların ucuz olması ve ağırlığın düşük olmasına ters orantılı olarak yüksek mukavemet değerleri vermesidir. Cam elyaf, çeşitli taşların yaklaşık 1600 °C’de sıvı hale getirildikten sonra birleşerek camı oluşturmaları ve bu sıvının çok ince bir kovandan geçmek suretiyle 9 ila 25 mikron çapında cam elyaf iplikleri haline gelmesiyle oluşmaktadır. Bu ipliklerin aşınmaya karşı direncinin artırılması için çeşitli kimyasallar ile kaplanarak kullanılması uygun olmaktadır. Cam elyafların en iyi özelliği çekme mukavemetlerinin mükemmel olmasıdır [52].

Mevcut E-Tipi cam elyaflardan daha dayanıklı takviye elemanlarının bulunmasına ilişkin çalışmaların sonucunda, daha güçlü elyaf yapıları bulunmuştur. Yüksek dayanımlı elyaflar, S- Tipi cam elyaf, R tipi cam elyaf, karbon elyaf, bazalt ve aramid elyaflardır. Söz konusu takviye elemanları halen pratikte nadir olarak kullanılmasına rağmen, kompozit malzemelerin gelişimi konusunda umut vadeden kaynaklardır [1].

3.1.1.2. Matris

Rüzgar türbin kanatlarının düşük ağırlığa sahip olma gereksinimi nedeniyle, kanatların kullanımında kullanılan kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polimerler ana seçim olarak göze çarpmaktadır. Bir kompozit malzemenin matris elemanı kırılma tokluğunu, biçim bozulmasına karşı dayanımını, kompozit

malzemenin sertliğini ve kompozit malzemenin yorulma ömrünü belirlemektedir. Genel olarak rüzgar türbin kanatlarının yapımında kullanılan kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak termosetler (epoksi, polyester, vinilester) ya da termosetlere oranla nadir olarak termoplastikler kullanılmaktadır [1].

Polimer esaslı kompozit malzemelerde, matris malzemesinin ana işlevi aşağıdaki gibi özetlenebilir [8];

- a. Takviye elemanı olarak kullanılan elyafların bir arada kalmasını sağlamaktır.
- b. Takviye elemanını dış etkilere karşı korumaktır.
- c. Kompozit yapıda meydana gelen yükün, takviye elemanı üzerinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktır.

Bir kompozit malzeme için matris seçimi konusunda, mekanik özellikler, geniş bir sıcaklık aralığında boyutsal kararlılık ve sıvılardan etkilenmeme gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır [65].

3.1.1.2.1 Termoset Matris

Termoset esaslı kompozitler, takviyeli polimerler pazarının yaklaşık % 80'inde kullanılmaktadır. Termosetlerin avantajları, oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıkla kürlenebilmesi ve daha az viskoziteye sahip olmasıdır. Viskozitenin az olması daha iyi emilebilme ve adezyona olanak sağlamaktadır. İlk olarak kompozit kanatlarda polyester reçineler kullanılmıştır. Çok büyük rüzgar türbin kanatlarının üretilmesi ile birlikte, epoksi reçine kullanımı da artmıştır. Polyester reçineler, epoksiye oranla daha ucuzdur ve proses daha kolaydır. Bunun yanında epoksi reçineler ise daha iyi yorulma özellikleri vermektedir. Şuandaki güncel çalışmalara göre, daha hızlı çevrim süresi ve daha iyi üretim verimliliği ile doymamış polyester reçineler çok büyük rüzgar türbin kanatları için gerekli olan dayanıklılık ve mukavemet gereksinimlerini karşılayacak durumdadır [1].

Uygulamalarda, en sık kullanılan termoset matrisler, polyester, vinilester ve epoksidir. Termoset matris olarak kullanılan kompozitler, üstün elektrik yalıtımı, yüksek sertlik, alevlenmeye dayanım, yüzey parlaklığı ve estetik görünüm, üstün ses

yalıtımı, iyi boyutsal kararlılık, kimyasal direnç ve yüksek ısı absorpsiyonu gibi özelliklere sahiptirler. Sertlik, iyi boyutsal kararlılık, kimyasallara direnç vb. özellikler termosetlerdeki zincirler arası yoğun çapraz bağların sonucudur [65]. Tez çalışması kapsamında matris malzemesi olarak seçilen termosetler polyester ve vinilester reçinedir.

Polyester matrisler, takviye elemanı olarak cam elyaf kullanılan kompozit malzemelerin üretiminde en çok kullanılan matris malzemesidir. Kompozit endüstrisinde kullanılan reçinelerin %75' i polyester reçine olarak seçilmektedir. Polyesterin depolama ömrü kısıtlıdır. Kalıplama işlemlerinde kullanılması durumunda eğer üretici tarafından eklenmemişse, katalizör gibi katkı maddelerine ihtiyaç duyulur. Ani yüklemelerin olduğu durumlarda kimyasal özelliğinden dolayı gevrek davranış gösterebilmektedir. Ama yine de büyük rüzgar türbin kanatları için diğer termoset reçineler ile mekanik özellikler açısından rekabet edebilmektedir [2,8].

Polyester reçinelerin avantajları, kullanım kolaylığı ve diğer termoset reçinelere göre daha uygun maliyet iken dezavantajları ise epoksi ve vinilestere göre daha düşük mekanik özellikler ve açık kalıpta yüksek stiren emisyonudur [66].

Vinilester reçineler, epoksi gibi üstün mekanik özellikleri bünyesinde bulundurmaktadır. Vinilester reçinelerin üretim şekilleri polyester reçineninki ile benzerdir ve sertleşme özellikleri olarak epoksi reçine ile aynı davranışı göstermektedir. Epoksi reçinelerin mekanik özellikleri ile çok yakın mekanik özelliklere sahip olan vinilester reçinelerin maliyet açısından epoksi reçinelere kıyasla çok daha ucuz olması önemli bir avantajıdır. Vinilester reçineler, epoksilerin iyi kimyasal direnç, yüksek kopma dayanımı ile doymamış polyesterlerin düşük viskozite ile hızlı pişirme özelliklerini birlikte taşırlar. Buna karşın pişirilme sırasındaki büzülme oranları epoksilerden yüksektir. Cam elyaflara iyi yapışırlar. Vinilester reçinelerin yapı olarak polyester reçinelerden farkı, vinilester reçinelerde reaktif bölgenin sadece molekül zincirlerinin uç kısımlarında mevcut olmasıdır. Molekül zincirleri ani zorlamaları absorbe edebilir ve bu sayede vinilester reçine daha dayanıklı, tokluğu yüksek ve esneklik gibi özelliklere sahip olur. Ek olarak vinilester reçinelerin darbe dayanımı ve yorulma mukavemeti de yüksektir [8,13,65].

Vinilesterin çok yüksek kimyasal ve çevresel direnç, polyesterden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması gibi avantajlarının yanı sıra, yüksek stiren oranı, polyestere göre daha yüksek maliyet ve yüksek kür fire oranı gibi dezavantajları bulunmaktadır [66].

3.1.2. Doğal Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

Petrol bazlı sentetik elyaflar, reçineler ve kompozit malzemeler doğada biyolojik olarak parçalanamayan malzemelerdir ve büyük ekolojik, çevresel ve global enerji krizine neden olurlar. Bu günlerdeki yüksek çevresel bilinçlenme, sıkı çevresel kurallar ve düzenlemelerden dolayı sentetik elyaf takviyeli kompozitlere alternatif olarak biyolojik esaslı kompozitler geliştirilmiştir. Çalışmaların büyük çoğunluğu cam elyaf gibi sentetik elyafların tamamen biyolojik olarak parçalanabilir çevre dostu lignoselülozik doğal elyaflar ile değiştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bununla birlikte, doğal elyaflar pahalı ve yenilenemeyen sentetik elyaflara karşı uygulanabilir ve bol miktarda kullanılabilir ikame maddesi sağlarlar. Doğal elyaf takviyeli (keten, manila kendiri, şeker kamışı küspesi, muz, kapok, kenaf, kendir otu, hint keneviri, heneguen, ananas yaprağı elyafı, sisal) polimer matris içeren “yeşil kompozitler” , sentetik elyaf (cam elyaf, karbon elyaf, aramid) takviyeli kompozit malzemelere çok iyi bir alternatif olacaktır. Doğal elyaf takviyeli biyokompozitler, ekolojik ve global enerji problemlerinden dolayı çok fazla ilgi çekmektedir. Doğal elyafların düşük maliyetli olması, geri dönüşüme uygun olma yetenekleri, düşük ağırlık ve karşılaştırılabilir özelliklerinden dolayı, araştırmacılar en iyi kalitede doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bunun sonucunda polimer esaslı kompozit malzemelerde doğal lif kullanım oranı artmıştır [61].

3.1.3 Takviye Geometrisine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

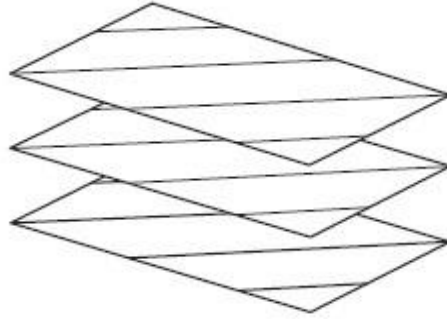
Yukarıdaki bölümde tartışılan tüm kompozit türleri aynı zamanda kullanılan takviye tipine göre daha ileri şekilde sınıflandırılabilir. Elyaf esaslı kompozitler lif şeklinde takviye içeren malzemelerdir. Sürekli elyaf kompozitler uzun lifler içermektedir. Uzun lifler sadece bir doğrultuda yönlendirilebilirler. Bu tip takviye elemanı içeren kompozitler tek yönlü takviye edilmiş kompozitler olarak bilinirler. Elyafın dokuma formunda takviye edildiği kompozit malzemeler ise çift yönlü

kompozitler olarak bilinirler. Süreksiz elyaf kompozitler ise kısa lifler içermektedirler. Bu kısa lifler rastgele olarak yönlendirilebileceği gibi, istenilen doğrultuda da yönlendirilebilir. Partikül esaslı kompozitler, matris malzemesi içerisindeki takviyenin, parçacıklı şekilde olduğu malzemelerdir ve bu parçacıklı takviyelendirme matris içerisinde rastgele veya istenilen doğrultuda yönlendirilebilir. Dolgu yapıları kompozitler, ana takviye elemanı ile birlikte ikinci bir materyal ile doldurulur. Dolgu malzemesinin yüzdesi ana takviye elemanından oldukça azdır. Matris malzemesinin özelliklerini arttırmak için kullanılan dolgu malzemeleri içerisinde en yaygın olanı parçacıklı dolgu malzemeleridir. Tabaka yapıları kompozitler, tabaka şeklinde takviye elemanları içermektedir. Bu tabakalar esasen iki boyutlu bir geometriye ve kayda değer bir kalınlığa sahiptir. Tabakalı kompozitlerde matris malzemesi düğümlenmiş formda takviye elemanı ile güçlendirilir. Tabakalı kompozitlerde takviye elemanının oryantasyon şekli rasgele, tek yönlü ya da çift yönlü olabilir. Hibrit kompozitler ise matris malzemesi içerisinde iki veya daha fazla farklı takviye elemanı içerirler. Hibrit kompozitlerin yapılmasındaki amaç, üretilen kompozit malzemenin özelliklerinin istenilen özel şartlara uygun olarak değiştirilmesidir [61].

3.2.Kompozit Malzemelerde Laminatlar

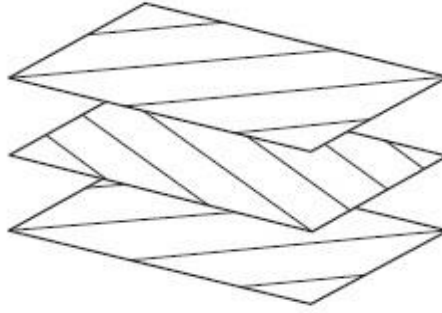
Kompozit malzemelerde bir laminat, çok sayıda tabakanın z eksenine yönünde istiflenmesi ile meydana getirilir. Laminatların bazı özel şekilleri ve standart kodlamaları aşağıda verilmiştir [48].

Tek yönlü laminat: Tek yönlü bir laminatta elyaf oryantasyon açıları hepsi her tabakada aynıdır. Örnek olarak elyaf oryantasyon açısı $\theta=0^\circ$ olan bir laminatta, tüm tabakalardaki elyaf oryantasyon açısı $\theta=0^\circ$ dır. Şekil 3.4’de tek yönlü bir laminata ait örneklendirme yapılmıştır [48].



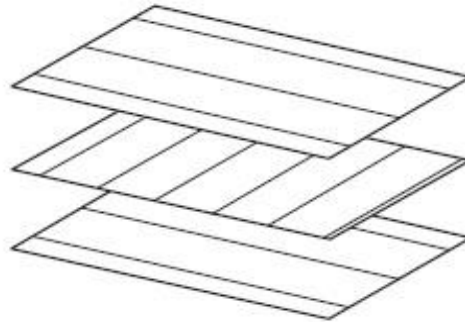
Şekil 3.4 Tek yönlü laminat [48]

Açılı Yerleştirilmiş Laminat: Elyaf oryantasyon açısı $\theta \neq 0^\circ$ veya $\theta \neq 90^\circ$ olduğu durum için, tabakalardaki elyaf oryantasyon açılarının $\theta / -\theta / \theta / -\theta /$ şeklinde olduğu laminatlardır [48].



Şekil 3.5 Açılı yerleştirilmiş laminat [48]

Çapraz katlı laminatlar: Şekil 3.6’da gösterilen çapraz katlı laminatlarda elyaf oryantasyon açısı $/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/$ şeklindedir.



Şekil 3.6 Çapraz katlı laminat [48]

Simetrik Laminatlar: Simetrik lamnatlarda, elyaf oryantasyonu laminatın merkez çizgisine göre simetriktir. Orta düzlemin üzerindeki her bir katman için laminatın orta düzleminin altında ve orta düzleme eşit uzaklıkta bir özdeş katman bulunur (malzeme, kalınlık ve elyaf oryantasyon açısı özellikleri bakımından). Böylece bir simetrik laminat için, $\theta(z) = \theta(-z)$ yazılabilir. Burada “z” laminatın orta düzleminin olan uzaklıktır. Aşağıda simetrik laminatların kodlanması ile ilgili bazı örnekler verilmiştir [48].

$$\begin{array}{l}
 - \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \\
 \quad [0/ +45 /90/ 90/ +45/ 0] \\
 \text{Kod: } [0/45/90]_s
 \end{array}$$

(Kod içerisinde bulunan altsimge “s” tabakanın orta düzlemine göre simetriyi gösterir.)

$$\begin{array}{l}
 - \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \\
 \quad [0/ +45 /90/ +45/ 0] \\
 \text{Kod: } [0/45/\overline{90}]_s
 \end{array}$$

(Kod içerisinde bulunan 90° üzerinde çubuk, simetri düzleminin 90° ’lik tabakanın ortasından geçtiğini göstermektedir.)

$$\begin{array}{l}
 - \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \\
 \quad [0/ +45/-45/90/-45/+45/ 0] \\
 \text{Kod: } [0/\pm 45/\overline{90}]_s
 \end{array}$$

(Bitişik olan $+45^\circ$ ve -45° ‘lik tabakalar $\pm 45^\circ$ olarak gruplandırılmıştır.)

$$\begin{array}{l}
 - \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9 \quad 10 \\
 \quad [0/ +45/-45/+45/-45/-45/+45/-45/+45/0] \\
 \text{Kod: } [0/(\pm 45)_2]_s
 \end{array}$$

(İki bitişik $\pm 45^\circ$ lik tabaka $(\pm 45)_2$ olarak gösterilmiştir.)

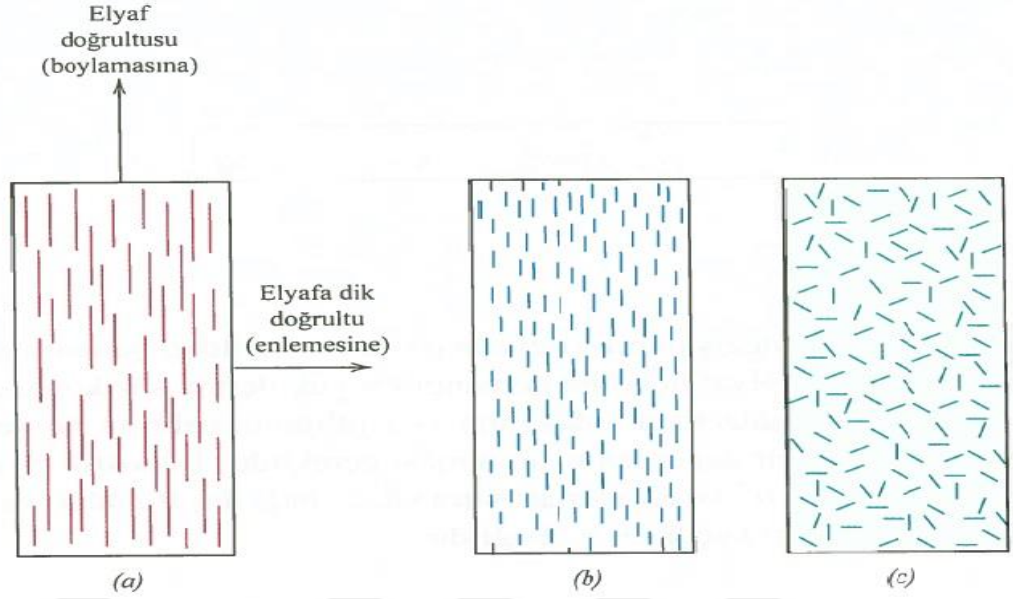
Antisimetrik Laminatlar: Antisimetrik laminatlarda, elyaf oryantasyonu laminatın merkez hattına göre antisimetrik durumdadır. Yani laminatın orta düzlemi üzerindeki elyaf ortanyasyon açısı θ 'nın her bir tabakası için, laminatın orta düzlemi altında aynı kalınlıkta ve merkez hattına aynı uzaklıkta elyaf oryantasyon açısı $-\theta$ olan özdeş bir tabaka bulunur. Örnek olarak, $\theta/ -\theta/ \theta/ -\theta$ bir antisimetrik laminattır. Aksine, $\theta/ -\theta/ -\theta/ \theta$ ise bir simetrik laminattır [48].

Simetrik olmayan Laminatlar: Simetrik olmayan laminatlarda, ne bir simetri ne de bir antisimetri durumu söz konusudur. Örnek olarak, $0^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ ve $0^\circ/\theta^\circ/-\theta^\circ/90^\circ$ simetrik olmayan laminatlardır [48].

Yarı izotropik laminatlar: Bu laminatlar her bir bitişik tabakanın arasında eşit açı olan özdeş kalınlık ve malzemeye sahip üç veya daha fazla tabakadan yapılıdır. En yaygın olarak kullanılan yarı izotropik simetrik istifleme sırası $[0/\pm 45/90]_s$ 'dir [48].

3.3.Elyaf Oryantasyon Açısının Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkileri

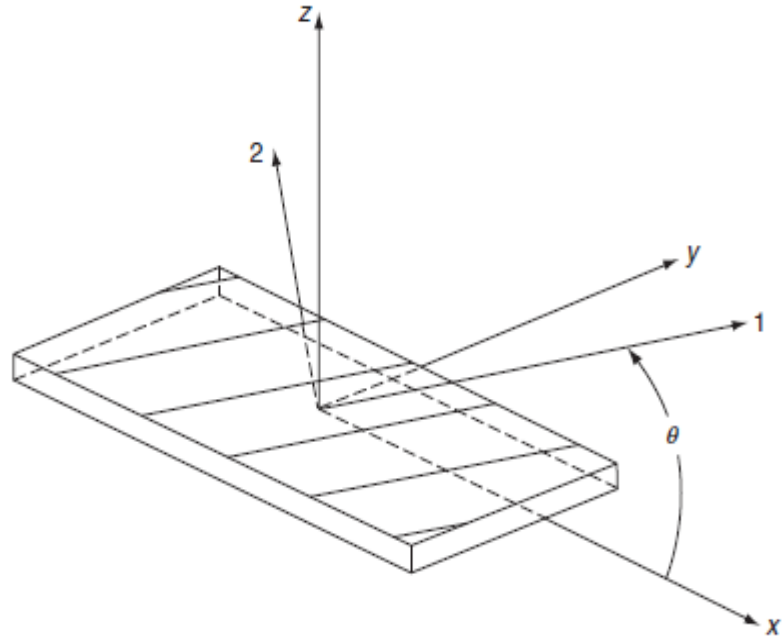
Elyaf oryantasyonu ve dağılımı gibi parametreler, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dayanımını ve diğer birçok özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Elyaf oryantasyonu konusunda, elyafın sadece paralel olarak çekme kuvveti yönünde yönlenmesi veya tamamen rastgele yönlenmesi gibi iki durum söz konusu olabilir. Sürekli elyaf, uygulanan yüke paralel, süreksiz elyaf, uygulanan yüke paralel veya rastgele oryantasyon yapmak mümkündür. Kompozit malzemedeki mekanik özellik açısından daha iyi bir cevap alınabilmesi için elyaf dağılımının düzgün olması gerekmektedir. Şekil 3.7'de elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi mevcuttur [62].



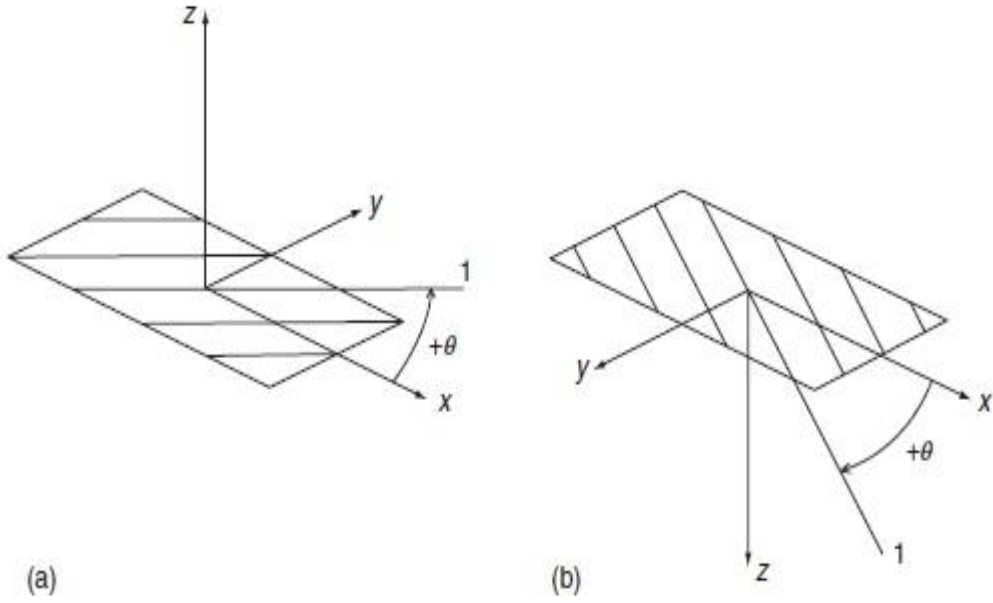
Şekil 3.7 Takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi. a) sürekli ve çekme yönünde yönlendirilmiş, b) süreksiz ve çekme yönünde yönlendirilmiş, c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş [62]

3.3.1. Koordinat Eksenlerine Göre Elyaf Oryantasyon Açısı

Şekil 3.8'de gösterildiği gibi matris malzemesi içerisinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş elyafların olduğu ince bir tabaka düşünelim. Bu tabakanın elastik özelliklerini tanımlayabilmek için, ilk olarak sırasıyla 1-2-z ve x-y-z eksenlerinden oluşan iki farklı koordinat sistemi belirlenmiştir. Hem 1-2 hem de x-y eksenleri tabaka düzleminde olup, z eksenine ise tabaka düzlemine dikey durumdadır. 1-2-z sisteminde, 1 eksenine elyaf uzunluğu doğrultusundadır ve tabakanın uzunlamasına olan yönünü temsil eder. 2 eksenine elyaf uzunluğu doğrultusuna diktir ve tabakanın enlemesine olan yönü temsil eder. Bu eksenlerin bütünü genel olarak temel malzeme yönlerini oluştururlar. x-y-z sistemi içerisindeki x ve y eksenleri yük doğrultusunu temsil etmektedir. Pozitif x eksenine ile 1 eksenine arasında kalan açı elyaf oryantasyon açısı olarak isimlendirilir ve θ ile gösterilir. θ açısının işareti seçilmiş olan sağ el koordinat sistemine bağlıdır. Eğer z eksenine tabaka yüzeyinden dikey olarak yukarı yönde dönük ise, θ açısı pozitif x ekseninden saat yönünün tersine göre ölçüldüğünde pozitiftir (Şekil 3.9.a). Diğer taraftan eğer z eksenine dikey olarak aşağı yönde ise, θ açısı pozitif x ekseninden saat yönünde ölçüldüğünde pozitiftir (Şekil 3.9.b). 0° 'lik bir tabakada 1 temel materyal eksenine, x yükleme eksenine ile çakışır. Ama 90° 'lik bir tabakadaki 1 temel materyal eksenine x yükleme eksenine ile 90° lik bir açı yapar [48].

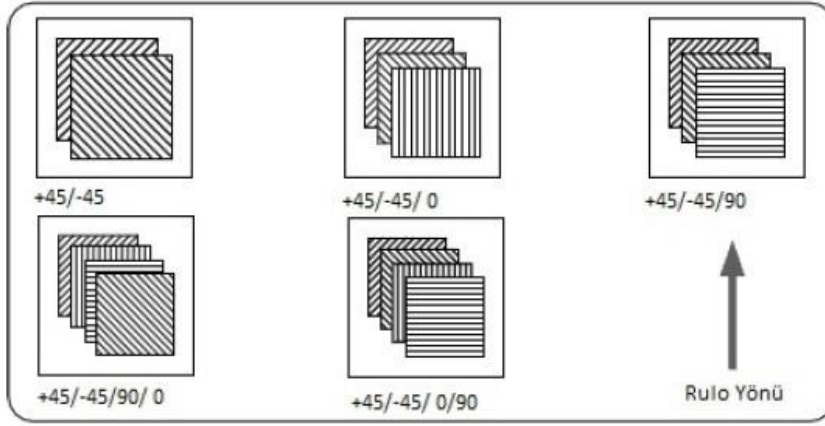


Şekil 3.8 Bir tabaka için temel malzeme ve yükleme eksenlerinin tanımlanması [48]



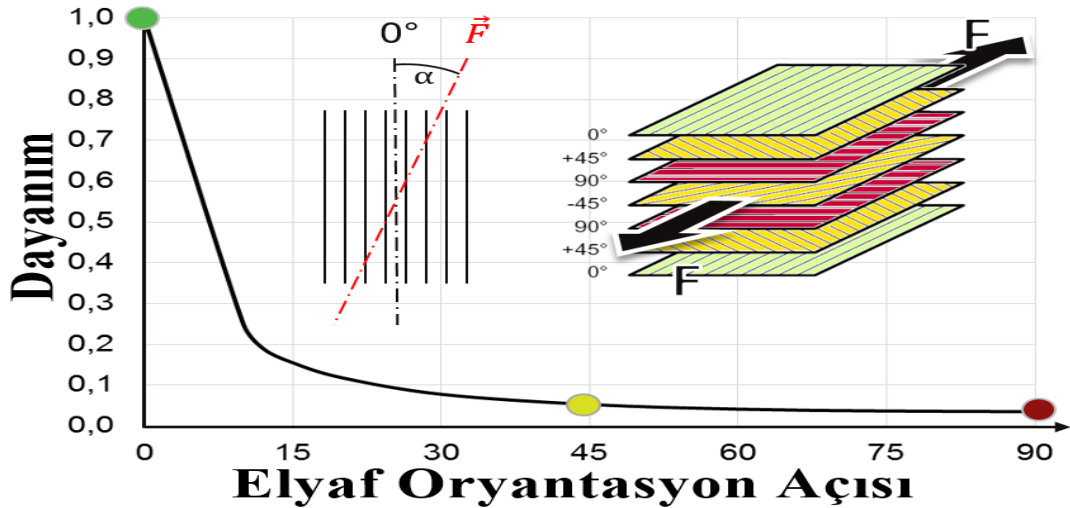
Şekil 3.9 Sağ el koordinat sistemi eksenleri [48]

Şekil 3.10 'da çok yönlü takviye elemanlarının yön açılarından örnekler verilmiştir.



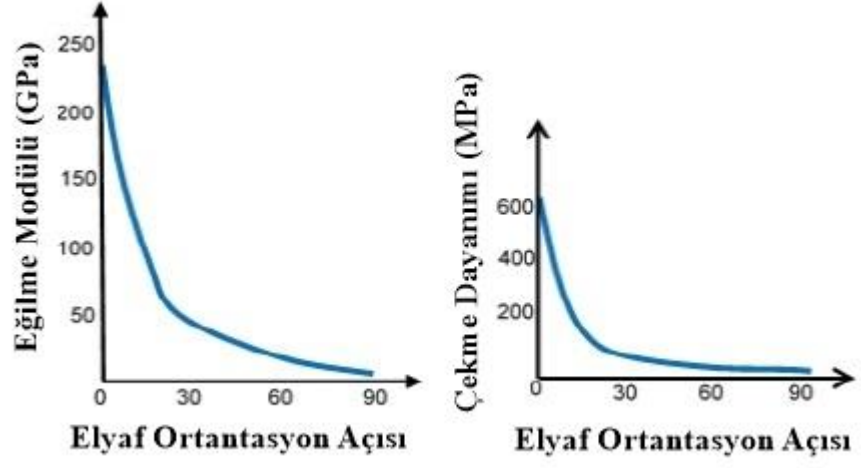
Şekil 3.10 Çok yönlü elyaf kumaşlarının oryantasyon açılarından örnekler [53]

Elyaf oryantasyon açılarının kompozit malzemenin mukavemeti üzerindeki etkileri çok fazladır. Genel durum itibariyle, elyafların yönü ile aynı doğrultuda iyi en yüksek mukavemet değerleri, elyafların yönüne dik doğrultuda ise, en düşük mukavemet özellikleri elde edilir. Örnek vermek gerekirse, 0° elyaf ortanyasyonlu bir kompozit malzemede, çekme mukavemeti en yüksek değerinde iken, 90° elyaf oryantasyonuna sahip bir kompozit malzemede çekme mukavemeti en düşük değerindedir. Şekil 3.11 'de elyaf oryantasyon açısının mukavemete olan etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir [11,63].



Şekil 3.11 Oryantasyon açısının mekanik özellikler üzerine etkisi [64]

Ek olarak çekmede kompozitin dayanımı ile elyaf yönlendirilmesi arasındaki ilişki de Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 Oryantasyon açısı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki [63]

BÖLÜM 4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

Yapılan tez çalışmasında, rüzgar türbini kanatları için malzeme seçimine ışık tutmak amacı ile polimer esaslı kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen kompozit malzemeler ile mekanik ve fiziksel deneyler yapılmıştır. Söz konusu malzemelerde hibrit matris malzemesi olarak polyester reçine ve vinilester reçine, takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Kompozit malzemeler İzmir’de yerleşik Fibermak Mühendislik Makine Kalıp Kompozit Sanayi ve Tic. Ltd. Şti’nde vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş olup, malzemelerin ASTM deney standartları numune boyutlarına göre kesim işlemi ise CNC işleme merkezinde yapılmıştır. İstenilen kompozit malzemelerin üretilmesi için, ağırlıkça oranı %50-%50 olarak karıştırılan polyester ve vinilester reçineler kullanılmış, böylece hibrit yapıda matris elemanları elde edilmiştir. Söz konusu hibrit matris elemanları 30°/60°, 0°/90°, +45°/-45° elyaf ortanyasyonu elde edecek şekilde dokunmuş cam elyaf ile takviye edilerek, çalışmada kullanılacak olan kompozit malzemeler üretilmiştir.

Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak, Boytek BRE 3024 Ortoftalik/DCPD bazlı doymamış polyester reçinesi ile Boytek BVE 783 Bisfenol A bazlı vinilester reçinesi, takviye malzemesi olarak Şişecam WR6-300 kodlu E sınıfı 300 gr/m² dokunmuş cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Ayrıca vinilester reçinede hızlandırıcı olarak %1’lik kobalt kullanılmış olup, 100 gr reçineye 2 gr kobalt konulmuştur. Sertleştirici olarak ise Mekperoksit (Butanox M50) kullanılmış, 100 gr reçineye 2 gr sertleştirici konulmuştur. Polyester reçine kendinden kobaltlı olduğundan ek bir hızlandırıcı kullanılmamış olup, sertleştirici olarak Mekperoksit (Butanox M50) 100 gr reçineye 1 gr olarak kullanılmıştır. Kompozit plakalar vakum infüzyon tezgahında 100 °C ‘de 2 saat olarak kürlenmiştir. Kompozit malzemenin üretiminde kullanılan reçine ve takviye elemanlarına ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan polyester reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri [67]

Ortoftalik DCPD bazlı doymamış Polyester reçinesi	Takviyesiz Reçinenin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	
	Değer	Metod
Çekme Dayanımı	65 MPa	ISO 527
Kopma Uzaması	% 2	ISO 527
Çekme Modülü	3900 MPa	ISO 527
Eğilme Dayanımı	100 MPa	ISO 178
Eğilme Modülü	3800 MPa	ISO 178
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı	65 °C	ISO 75A
Depolama Sıcaklığı	25 °C	
Raf Ömrü	3 Ay	
Sıvı Haldeki Özellikleri		
Viskozite	150-250 cp	
Solid İçeriği	58-62 %	
Asit Değeri mgKOH/g	max. 30 mg KOH/g	
Jel Zamanı	25-30 dakika	
Pik Egzotermi	140-160 °C	

Tablo 4.2 Kullanılan vinilester reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri [68]

Bisfenol A bazlı Vinilester reçinesi	Takviyesiz Reçinenin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	
	Değer	Metod
Çekme Dayanımı	80 MPa	ISO 527
Kopma Uzaması	% 5	ISO 527
Çekme Modülü	3200 MPa	ISO 527
Eğilme Dayanımı	135 MPa	ISO 178
Eğilme Modülü	3700 MPa	ISO 178
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı	100 °C	ISO 75A
Depolama Sıcaklığı	25 C	
Raf Ömrü	4 ay	
Sıvı Haldeki Özellikleri		
Viskozite	170-250 cp	
Solid İçeriği	50-55 %	
Asit Değeri mgKOH/g	max. 10 mgKOH/g	
Jel Zamanı	20-25 dakika	
Pik Egzotermi	145-160 °C	

Tablo 4.3 Kullanılan cam elyafın mekanik ve fiziksel özellikleri [58]

Takviye Malzemesi	
Ürün Kodu	WR-6
Birim Alandaki Ağırlık (gr/m ²)	300
Elyaf Çapı	17 µm
Cam Tipi	E
Bağlayıcı Türü	Silan
Çekme Modülü	81,5 GPa ISO 9163
Çekme Dayanımı	2306 MPa ISO 9163
% Uzama	% 2,97 ISO 9163

Üretilen kompozit malzemelere ait deney numuneleri mekanik ve fiziksel deneylere maruz bırakılarak rüzgar türbini kanatları için malzeme seçiminde kullanılmak üzere, hibrit matrisli ve farklı elyaf açılara sahip kompozitlerin davranışları incelenmiştir. Şekil 4.1’ de vakum infüzyon prosesinin gerçekleştirildiği tezgah gösterilmiş olup, üretim prosesi hakkında bilgilendirme yapılmıştır.



Şekil 4.1 Kompozit plakaların üretiminde kullanılan vakum infüzyon tezgahı

Kompozit plakaların üretiminde ilk olarak, istenilen plaka boyutlarından daha büyük olmak şartı ile ayırıcı film yerleştirilmesi işlemi yapılmıştır.



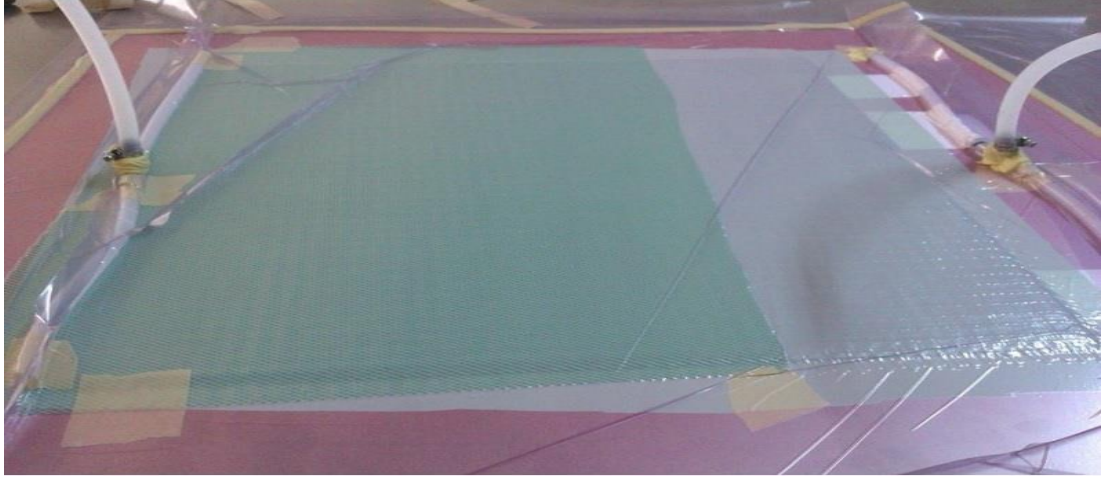
Şekil 4.2 Ayırıcı film

İstenilen boyutlarda, kesilmiş olan cam elyaf kumaşlar filmin üzerine yerleştirilmiş ve filmin etrafında sızdırmazlık macunu yapıştırılmıştır. Filmin altına hava girmesini engellemek amacı ile macunun 1-2 mm'si ayırıcı filmin üzerine diğer kısmı da kalıba gelecek şekilde yapıştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin amacı, vakum verildiğinde kabarcıksız ve homojen bir reçine dağılımı ile vakum basıncının yüksek olması ve düz bir yüzey elde etmektir.



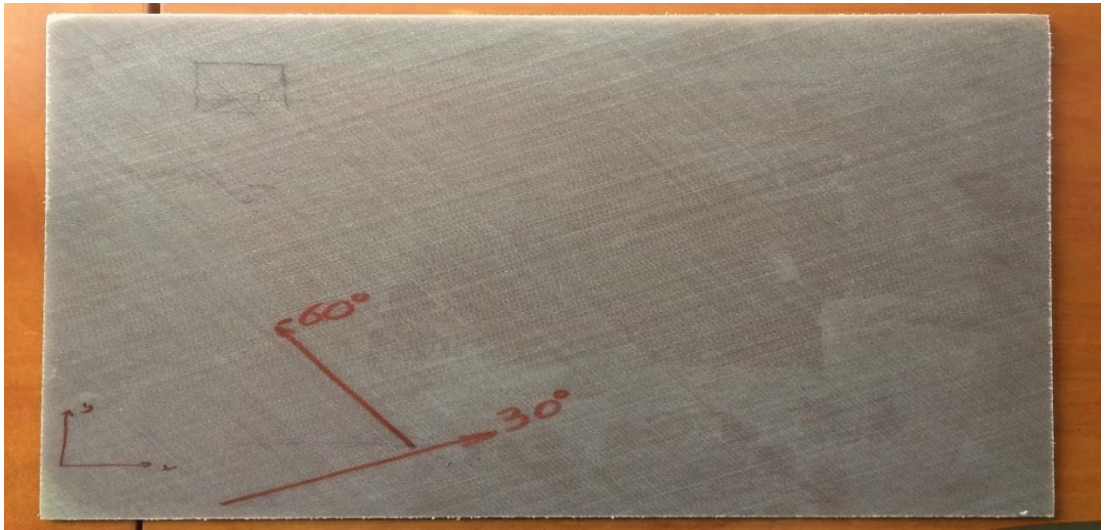
Şekil 4.3 Kumaşların yerleştirilmesi

Kumaşların yerleştirilmesi işleminden sonra, kumaşların boyutundan daha büyük olacak şekilde soyma kumaşı yerleştirilmiştir. Soyma kumaşı üzerine reçine giriş tarafına, daha uzun olmak üzere akış filesi konulmuştur. Akış filesinin boyu vakum hattı tarafında kumaşları geçmeden 5 cm geride kalacak şekilde yerleştirilmelidir. Daha sonra T bağlantı parçası vasıtasıyla reçine hattı ve vakum hattı bölümlerine spiral hortumlar yerleştirilmiştir. Sızdırmazlığı engellemek amacı ile T bağlantı parçalarının etrafına sızdırmazlık macunu konulmuştur. Sızdırmazlık macunu konulması işleminden sonra kağıt bantlar yardımıyla reçine ve vakum hatları sabitlenmiştir. Oluşturulan sistem üzerine hava kaçağı olmayacak şekilde vakum torbası yapıştırılmış, T bağlantı uçları vakum torbasının delinmesi vasıtasıyla çıkarılmış ve bu bölgelerde hava kaçağı olmaması için sızdırmazlık macunu ile işlem yapılmıştır.

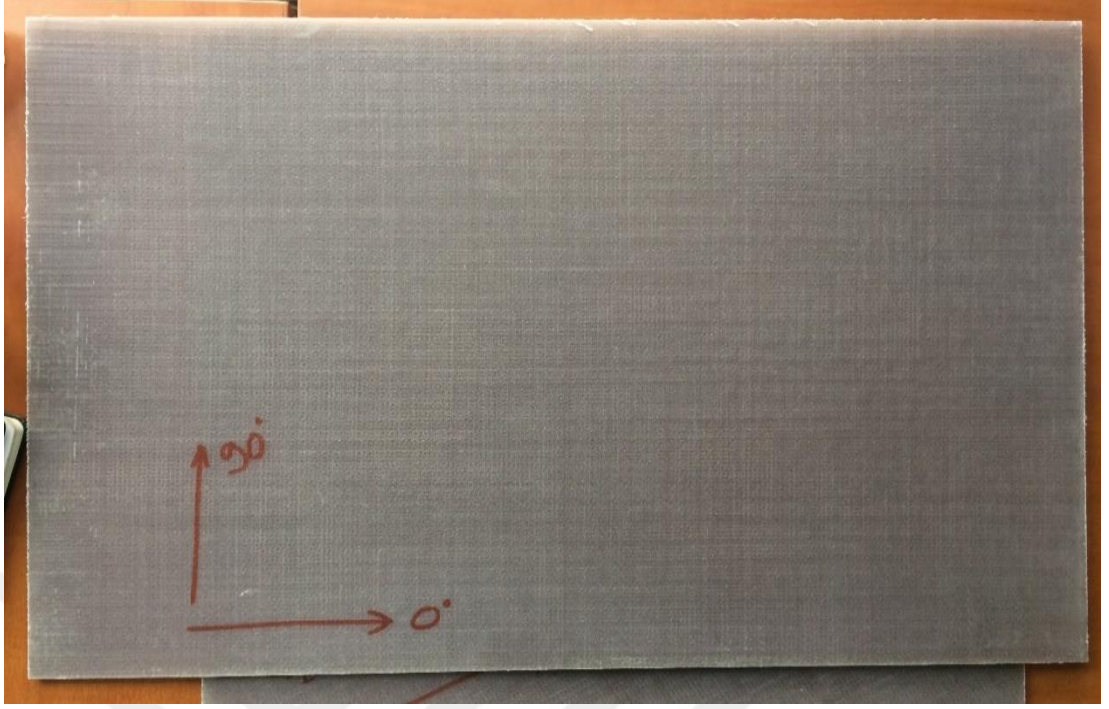


Şekil 4.4 Sızdırmazlık sağlanmış sistem

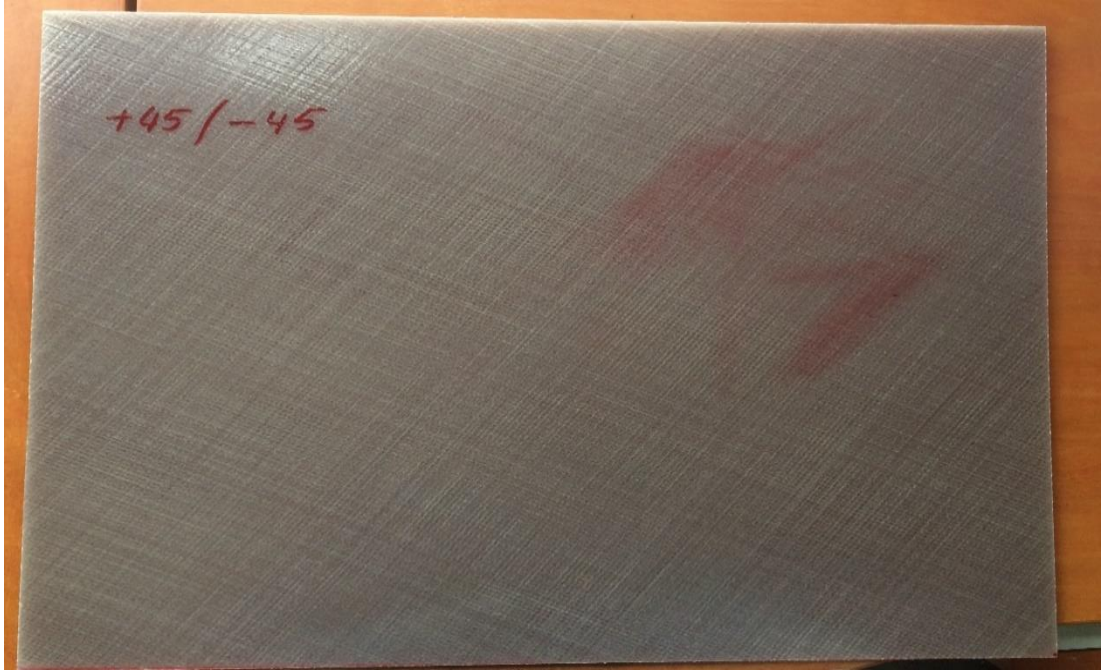
Sistemde tamamen sızdırmazlık sağlanmasından sonra, infüzyon hortumları yerleştirilmiş, reçine tarafındaki infüzyon hortumu kapatılarak vakum motoru çalıştırılmıştır. Bu işlemin amacı sistemde kaçak olup olmadığını görmektir. Eğer tespit edilen kaçak varsa giderilmelidir. Sistemin hava kaçağı olmadığına tamamen emin olunduktan sonra, hazırlanmış olan hibrit vinilester+polyester matris elemanı reçine hattında bulunan infüzyon hortumu ile sisteme verilmiştir. Reçinenin istenilen elyaf oryantasyonuna göre istiflenmiş cam elyafları tamamen ıslatmasından sonra reçine hortumu kapatılmış ve kürlenme işlemi 100 °C de 2 saat boyunca yapılmış olup, oda sıcaklığında plakalar sökülüştür. Aşağıdaki şekillerde plaka halinde üretilen kompozitler gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Polyester+vinilester matrisli, 30°/60° elyaf ortantasyonuna sahip plaka

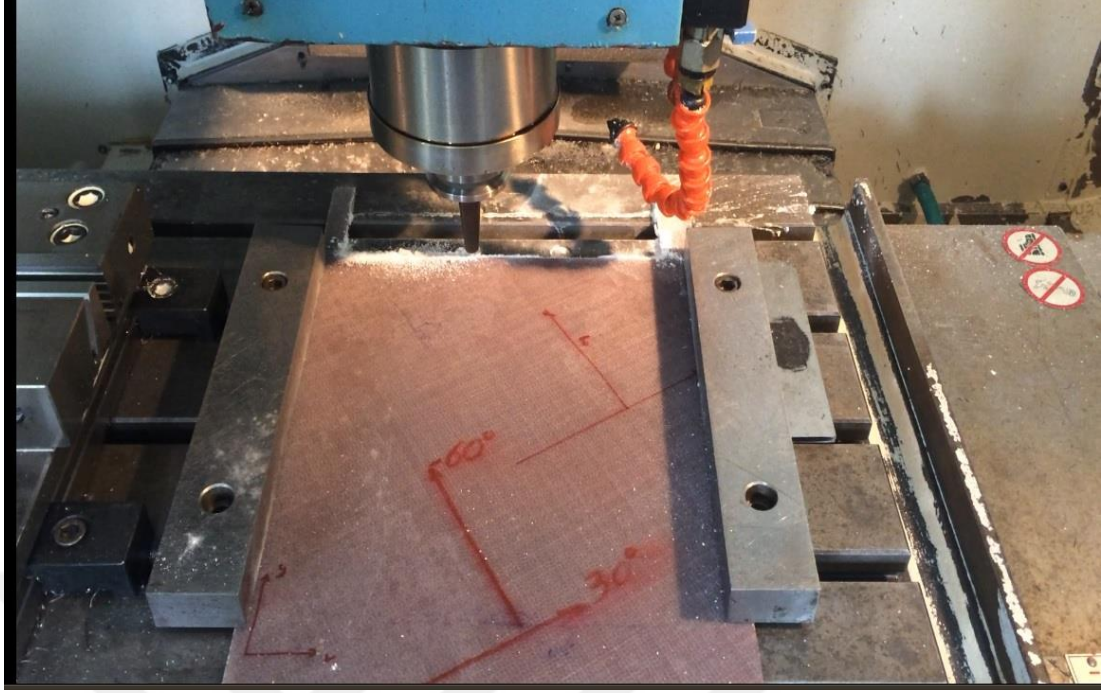


Şekil 4.6 Polyester+vinilester matrisli, $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf ortantasyonuna sahip plaka

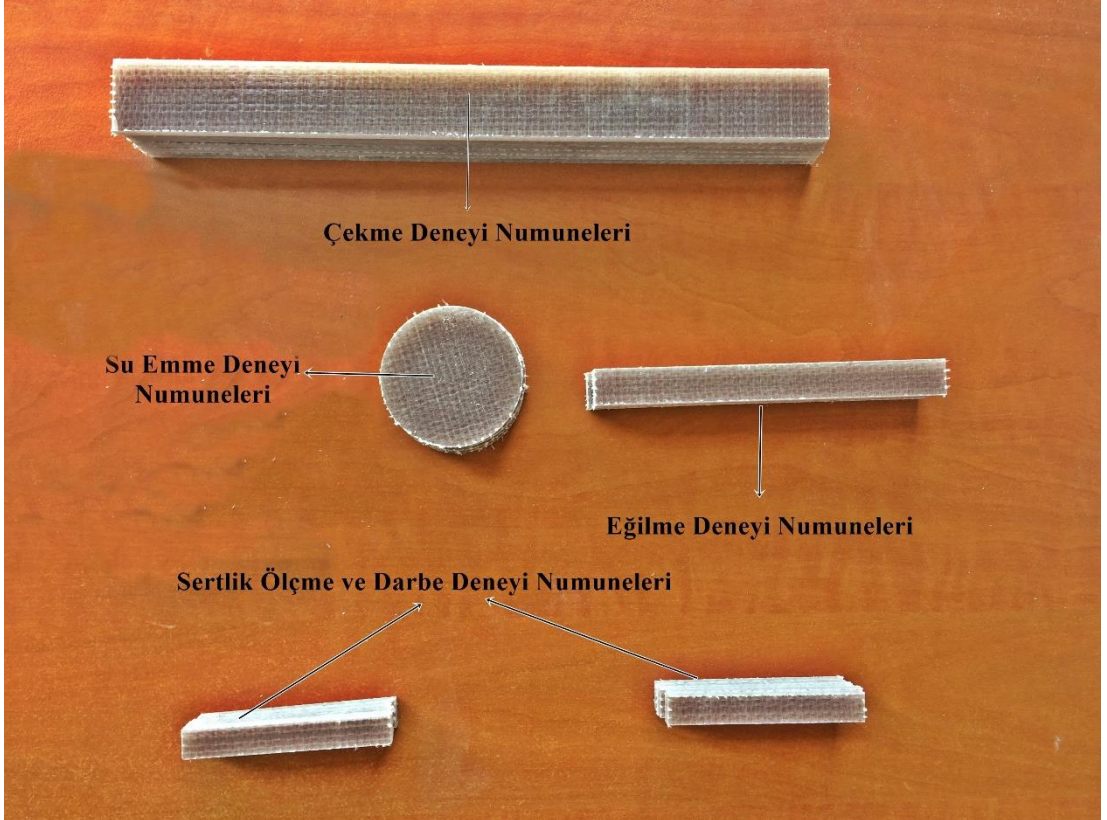


Şekil 4.7 Polyester+vinilester matrisli, $\pm 45^{\circ}$ elyaf ortantasyonuna sahip plaka

ASTM deney standartlarına göre numune elde edilmesi için yapılan CNC kesim işlemine ait örnek resim ve kesim sonrası elde edilen deney numunelerine ait şekiller aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.8 CNC kesim işlemi



Şekil 4.9 CNC kesim sonucunda elde edilen deney numuneleri

Bu çalışmada hazırlanan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris ve takviye malzemeleri ile elyaf oryantasyon açıları Tablo 4.4’de verilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında ASTM standartları referans alınmıştır.

Tablo 4.4 Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozitlere ait özellikler

Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Oryantasyon Açısı	Elyaf Çapı (μm)	Elyaf Tipi	Elyaf Ağırlığı ve Tipi
Polyester+Vinilester	Cam Elyaf	30°/60°	17	E	300 gr/m ² Düz Dokuma
Polyester+Vinilester	Cam Elyaf	0°/90°	17	E	300 gr/m ² Düz Dokuma
Polyester+Vinilester	Cam Elyaf	+45°/-45°	17	E	300 gr/m ² Düz Dokuma

4.2. Mikroyapı İncelemeleri

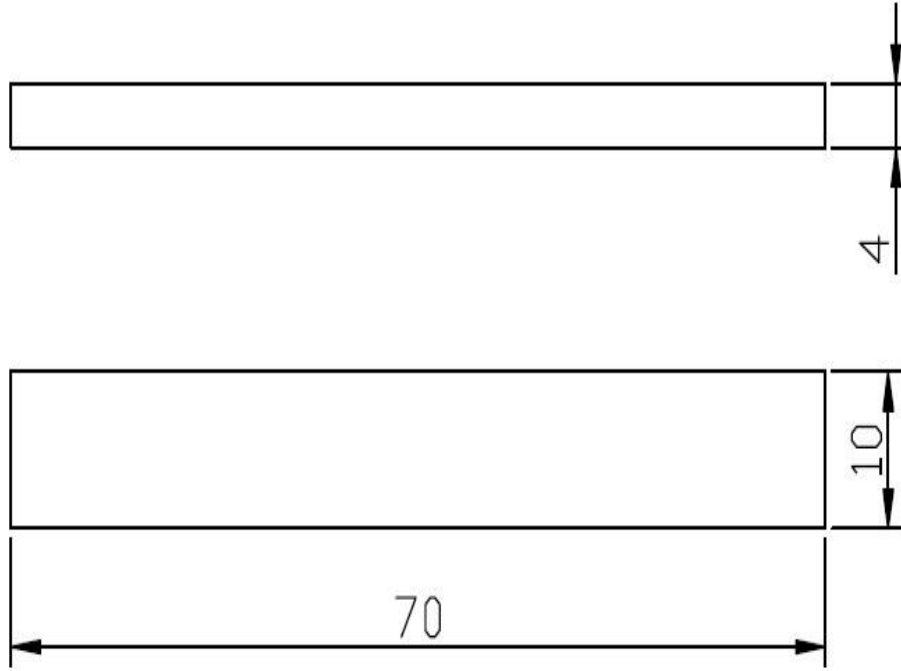
Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan numunelerin incelenmesi amacıyla 50 kat büyütme ile taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüleri çekilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için kullanılan taramalı elektron mikroskobu ve sputter coater Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve sputter coater

4.3. Numunelerin Sertlik Ölçümleri

Üretilen kompozit malzemelerin sertlik ölçümleri, ASTM D 785 deney standardına göre gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde kullanılan numunelerin boyutları 70x10x4 mm olup, 30°/60°, 0°/90° ve ±45° elyaf oryantasyonlarına ait numunelerden her birine minimum 5 adet sertlik ölçümleri yapılarak her bir numune için ortalama sertlik değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.11 Sertlik ölçme deney numuneleri boyutları

Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerlerinin değişken sıcaklıklar altında kararlılıklarının belirlenebilmesi için $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $+22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ve $+60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarında numuneler 6 saat bekletilmek sureti ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 3°C'lik ısınma ve soğuma hatası ile Rockwell E (HRE) sertlik skalası ile 100 kg yük altında, 3,175 mm çaplı bilye kullanılarak 15 saniye ölçüm süresi sonucunda belirlenmiştir. Sertlik ölçümü OMAG AFFRI marka ve 206 EX model sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.12 Sertlik Ölçüm Cihazı

Ek olarak sıcak ortam sertlik ölçümü ISISAN marka 9KW güç, 380/220 V gerilim ve 15 A akım değerlerine sahip fırın vasıtasıyla gerçekleştirilmiş, soğuk ortam sertlik ölçümü ise, SANYO marka biyomedikal dondurucu ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13 Sıcak ortam sağlayıcısı



Şekil 4.14 Soğuk ortam sağlayıcısı

4.4. Su Absorpsiyon (Emme) Deneyi

Su absorpsiyon deneyi polimerlerin belirli şartlar altında absorbe ettiği su miktarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Su absorpsiyon miktarını etkileyen faktörler: polimerin türü, kullanılan katkı maddeleri, sıcaklık ve maruz kalma süresidir. Su absorpsiyon deneyinin ana fonksiyonu nem veya suyun malzemenin mekanik, elektrik, boyutsal özellikleri üzerine etkilerini belirlemektir. Yapılan tez çalışmasında numuneler ASTM D 570 standardına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler ilk olarak sıcak ortam sağlayıcısına konularak 1 saat boyunca 110 °C’ de kurutulmuştur.



Şekil 4.15 Su absorpsiyon deneyi için kullanılan sıcak ortam sağlayıcısı

Kurutulan numunelerin ağırlıkları yüksek hassasiyetli terazi ile ölçülerek kuru ağırlıklar not edilmiştir. Daha sonra numuneler 23 ±1 °C ‘deki su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. 24 saat süresince suda bekletilen numuneler, temizlenip bir bez yardımıyla kurularak yüksek hassasiyetli terazi yardımıyla ıslak ağırlıkları belirlenerek not edilmiştir. Şekil 4.16’ da hazırlanan su absorpsiyon deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Su absorpsiyon deney düzeneği

Kuru ve ıslak ağırlıklar elde edildikten sonra aşağıdaki denklem yardımıyla numunelerin % su absorpsiyon oranı hesaplanmıştır.

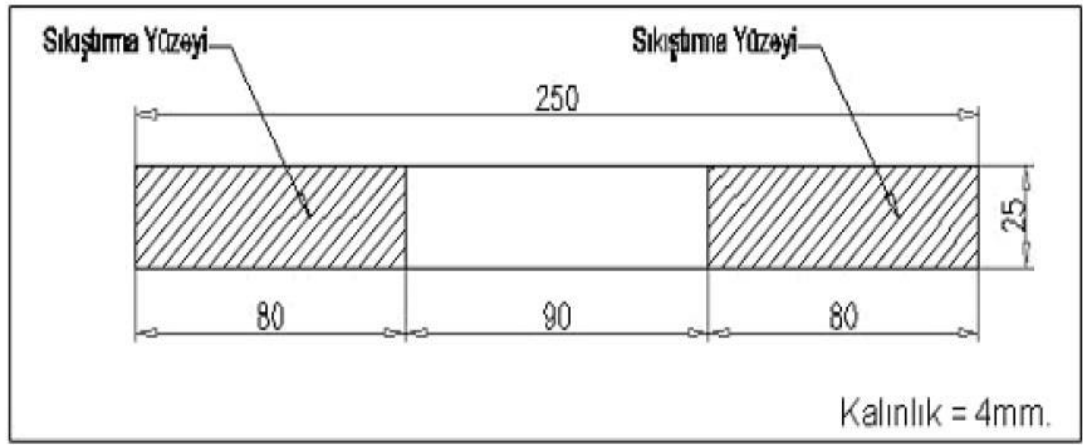
$$\% \text{ Su Absorpsiyon} = \frac{\text{Islak Ağırlık} - \text{Kuru Ağırlık}}{\text{Kuru ağırlık}} \times 100 \quad (4.1)$$

Ek olarak malzemelerin boyutsal şekil değişimlerini belirlemek amacıyla aşağıdaki hacimsel % su absorpsiyon denklemi kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$\% \text{ su abs. (Hacimsel)} = \frac{\% \text{ Su absorpsiyon (Ağırlıkça)}}{\text{suyun yoğunluğu}} \times k. \text{ yoğunluğu} \quad (4.2)$$

4.5. Çekme Deneyi

Tez çalışması için iki farklı termoset polimer malzemenin (Polyester, Vinilester) hibrit olarak matris elemanı olarak kullanıldığı numunelerde, hibrit matris elemanı kullanımının farklı elyaf oryantasyonları ile meydana getirdiği mekanik özellik değişimlerini incelemek amacıyla kompozitlere çekme deneyleri yapılmıştır. Üretilen kompozit plakaların çekme deneylerinin yapılabilmesi için ASTM D 3039/3039M deney standardına göre numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 4.17 Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin boyutları

Çekme deneyi malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en temel testlerden biridir ve bu deney sonrasında çekme dayanımı, akma dayanımı, tokluk, % uzama ve elastiklik modülü vs. gibi temel mekanik özellikler belirlenebilir. Bu gibi mekanik özelliklerin önceden belirlenmesi tasarımcının malzeme seçimi konusunda daha isabetli kararlar vermesini sağlar. Bu özellikleri tanımlamak gerekirse, Elastiklik modülü, rijitlik yani malzemenin elastik şekil değişmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Akma gerilmesi, malzemedeki plastik deformasyonun başladığı gerilmedir. Çekme dayanımı, çekme zorlaması altında bir malzemenin dayanabileceği en yüksek gerilmedir. Tokluk ise bir malzemenin kırılmadan absorbe ettiği enerji ya da plastik şekil değiştirme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [62].

Bu tez çalışmasında yapılan çekme deneyi Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki mekanik testler laboratuvarında bulunan 50 kN

kapasiteli Instron marka 3369 serisi çekme deney cihazında 2 mm/dk'lık sabit çekme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri 0°/90° kompozitlerden beş adet, 30°/60° kompozitlerden beş adet ve +45°/-45° kompozitlerden beş adet alınarak gerçekleştirilmek suretiyle malzemelerin ortalama mekanik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.18 Çekme deneyi makinası

4.6. Darbe Deneyi

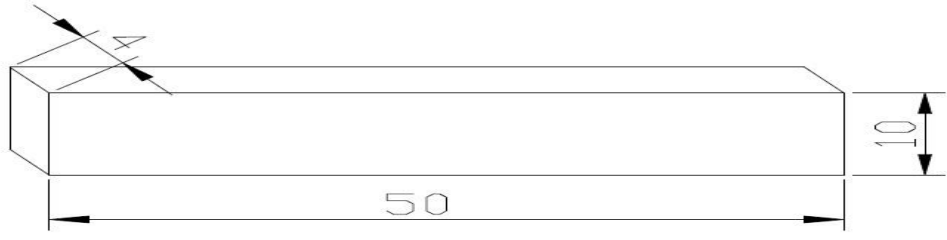
Mühendislik uygulamalarında özellikle kullanım sırasında malzemeler üzerine çevreden gelebilecek olan darbe yüklemelerine karşı, malzemelerin nasıl tepki

göstereceğinin bilinmesi önemlidir. Rüzgar türbin kanatları gibi darbeye maruz kalabilecek durumda olan parçaların tasarım aşamasında, malzemelerin darbe direncinin tasarımcı tarafından göz önünde bulundurulması gereklidir. Darbe direncinin bilinmesi, malzemenin ömrünü ve malzeme güvenilirliğini belirleme konusunda katkı sağlamaktadır. İşletme sırasında bir kompozit malzeme darbeye maruz kaldığında gözle görülebilen veya görünmeyen deformasyon ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucunda darbeden kaynaklı söz konusu deformasyon, dinamik yükler altında malzemenin çalışmasını müteakiben kalıcı hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle özellikle rüzgar türbini kanatları gibi tabakalı kompozit yapılarda darbe enerjisinin oluşturacağı deformasyonun önceden bilinmesi tasarımcı açısından önemlidir [15].

Bu tez çalışmasında yapılan darbe deneyi ASTM D 256 deney standardına uygun olarak hazırlanan numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki mekanik testler laboratuvarında bulunan Instron Wolpert Marka PW 30 model Charpy deney cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney sonuçları her bir tür malzeme için 5'er numune kullanılarak ortalama değerler hesaplanarak elde edilmiştir.



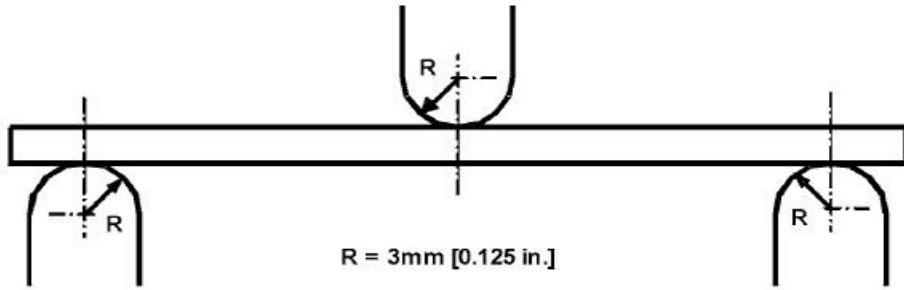
Şekil 4.19 Darbe deneyi makinası



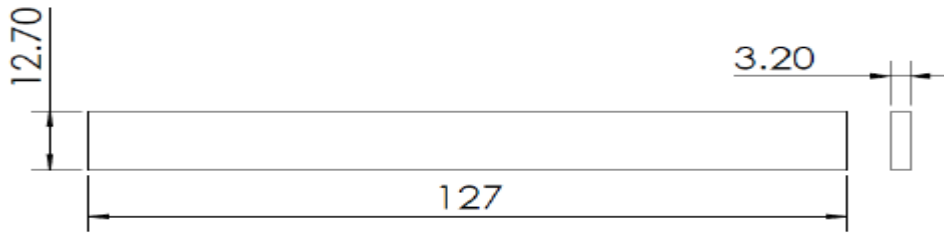
Şekil 4.20 Darbe deneyi numune ölçüleri

4.7. Eğilme Deneyi

Tez çalışması kapsamında yapılan üç nokta eğilme deneyinin gerçekleştirilmesi için ASTM D 7264 standardına uygun olarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Eğilme deneyi, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki mekanik testler laboratuvarında bulunan 50 kN kapasiteli Instron marka 3369 serisi eğilme deney cihazı vasıtasıyla destekler arası mesafe 60 mm, eğme hızı 1 mm/dakika ve destek yarıçapları 3 mm olacak şekilde, her tip malzeme için 5'er adet numune kullanılarak ortalama deney sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.21 Eğilme deneyi düzeneği



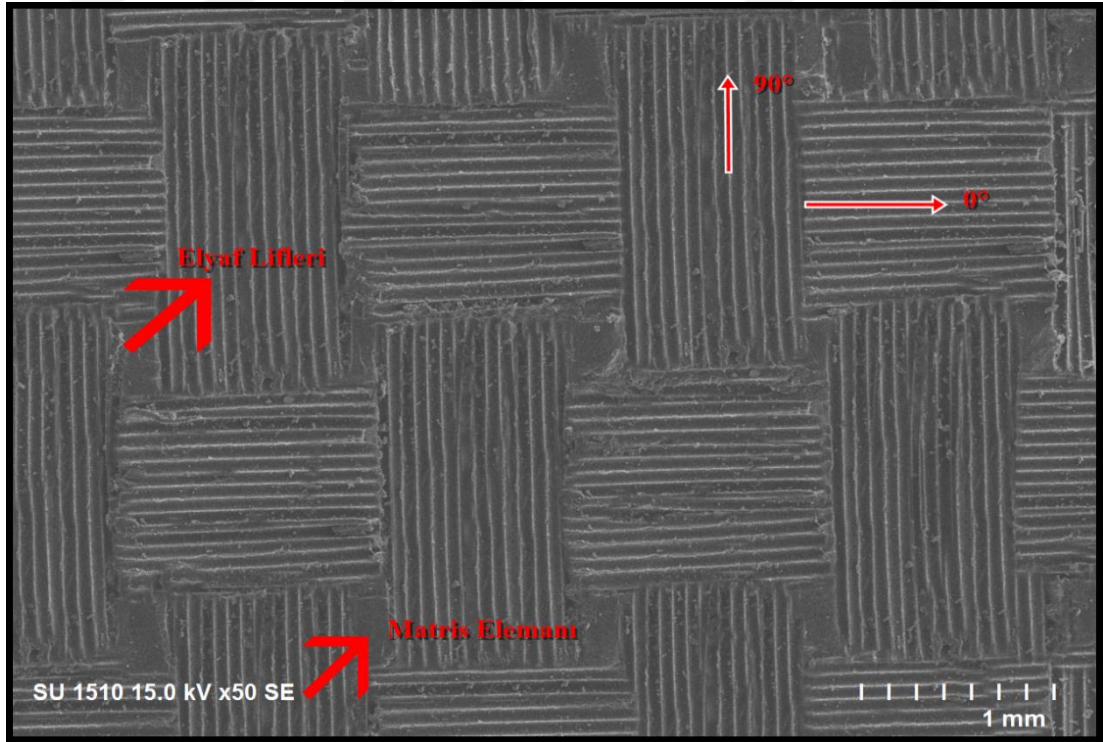
Şekil 4.22 Eğilme deneyi numune ölçüleri

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

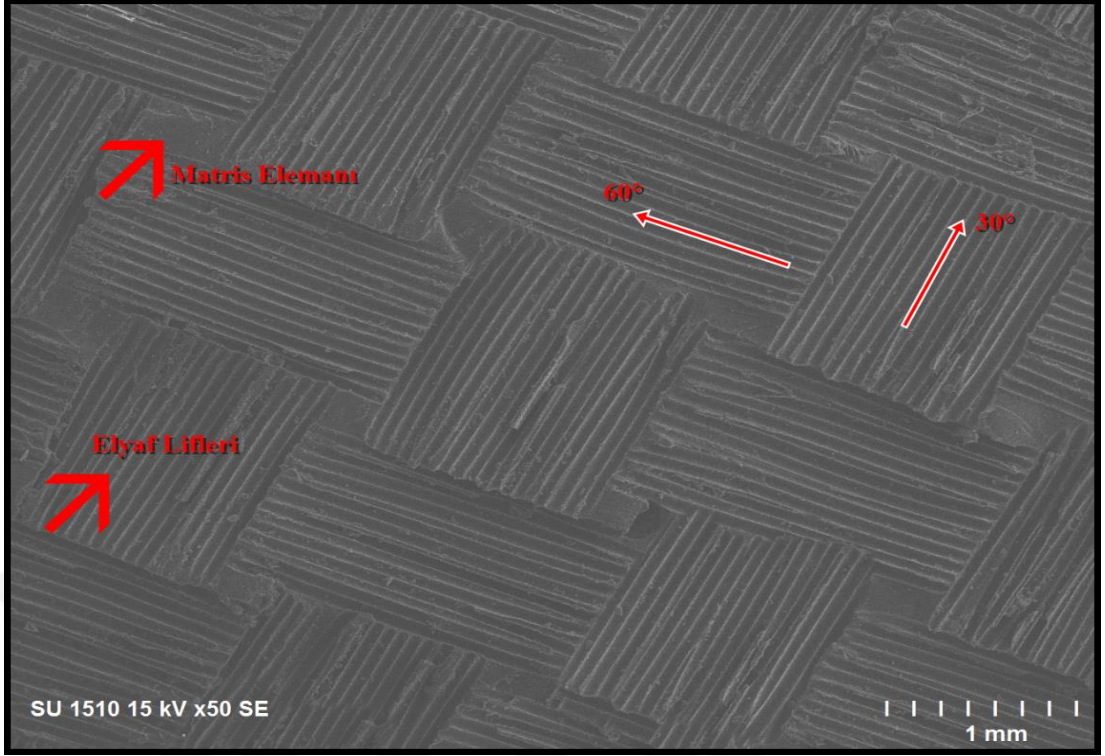
5.1. Mikroyapı İnceleme Bulguları

DeneySEL çalışmalarında kullanılan numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri Şekil 5.1-5.3'te verilmiştir. Numunelerde kullanılan matris malzemesi, cam elyaf lifleri şekiller üzerine gösterilmiştir.

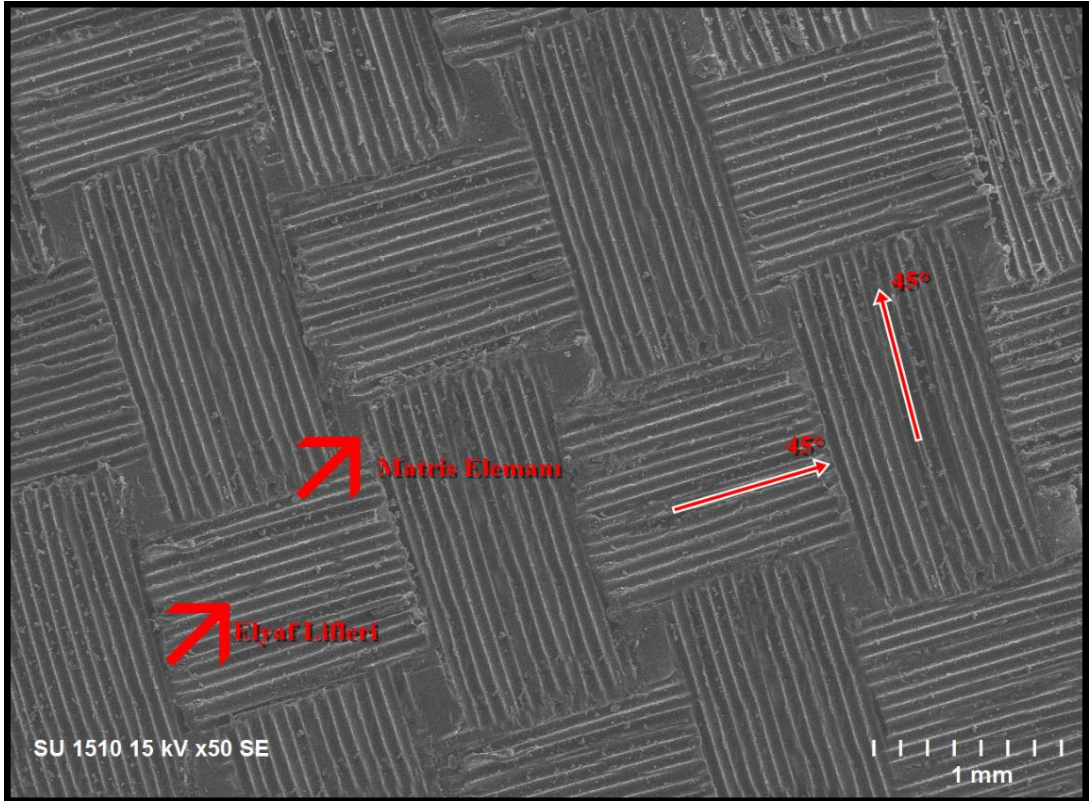
Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, numunelerde herhangi bir hava boşluğu veya üretimden kaynaklı bir hata izlenmemiştir. Üretim yönteminin vakum infüzyon olarak seçilmesi, numunelerde boşluksuz ve boyutsal açıdan kararlı bir yapı meydana getirmiştir. Ayrıca alınan mikroyapı görüntüleri sonrasında, kullanılan cam elyaf kumaşların düz dokuma cam elyaf olduğu ve elyaf oryantasyonlarının da istenilen açılarda istiflendiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme



Şekil 5.2 30°/60° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme



Şekil 5.3 +45°/-45° elyaf oryantasyonuna sahip kompozit malzeme

5.2. Sertlik Değerleri Bulguları

Sertlik ölçümlerine ilk olarak numunelerin oda sıcaklığında sertlik değerlerinin ölçülmesi ile başlanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kullanılan numunelerin isimleri Tablo 5.1'deki gibi kodlandırılmıştır.

Tablo 5.1 Sertlik ölçümü deney numuneleri kodlandırması

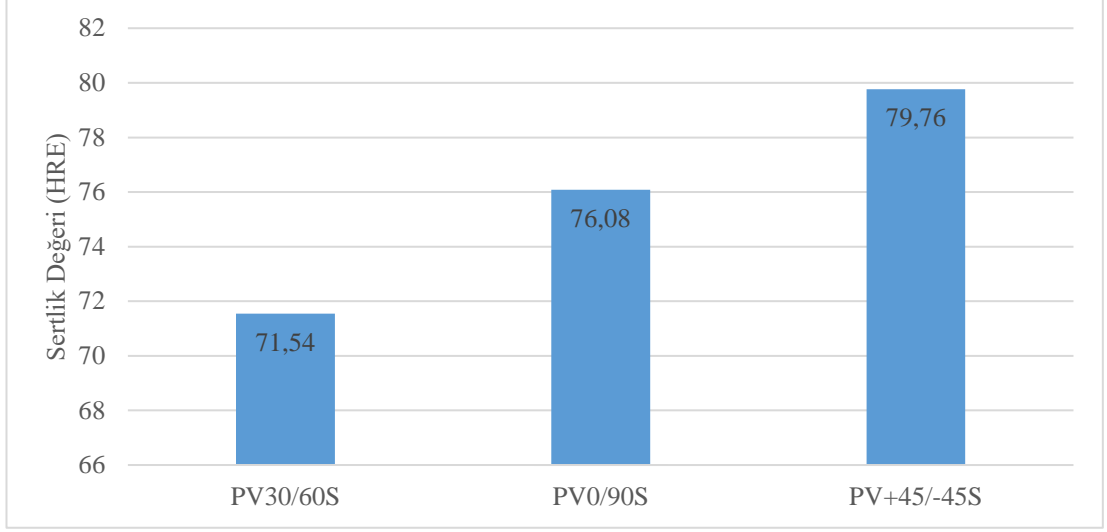
Matris Elemanı	Takviye Elemanı	Elyaf Oryantasyon Açısı	Numune Kodu
Polyester+Vinilester Hibrit Matris	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60S
Polyester+Vinilester Hibrit Matris	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90S
Polyester+Vinilester Hibrit Matris	Cam Elyaf	+45°/ -45°	PV+45/-45S

Belirtilen numunelerin oda sıcaklığındaki sertlik ölçüm değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.2 Numunelerin oda sıcaklığındaki sertlik değerleri

Malzeme Kodu	1.Ölçüm (HRE)	2.Ölçüm (HRE)	3.Ölçüm (HRE)	4.Ölçüm (HRE)	5.Ölçüm (HRE)	Ortama Sertlik Değeri (HRE)
PV30/60S	73,5	70,6	71,2	72,9	69,5	71,54
PV0/90S	83	80,4	67	71,3	78,7	76,08
PV+45/-45S	75,6	79,8	79,5	81,4	82,5	79,76

Ek olarak oda sıcaklığındaki yapılan ölçüm sonuçlarının ortalama sertlik değerlerine ait grafik Şekil 5.4' de verilmiştir.



Şekil 5.4 Numunelerin oda sıcaklığındaki sertlik değerleri

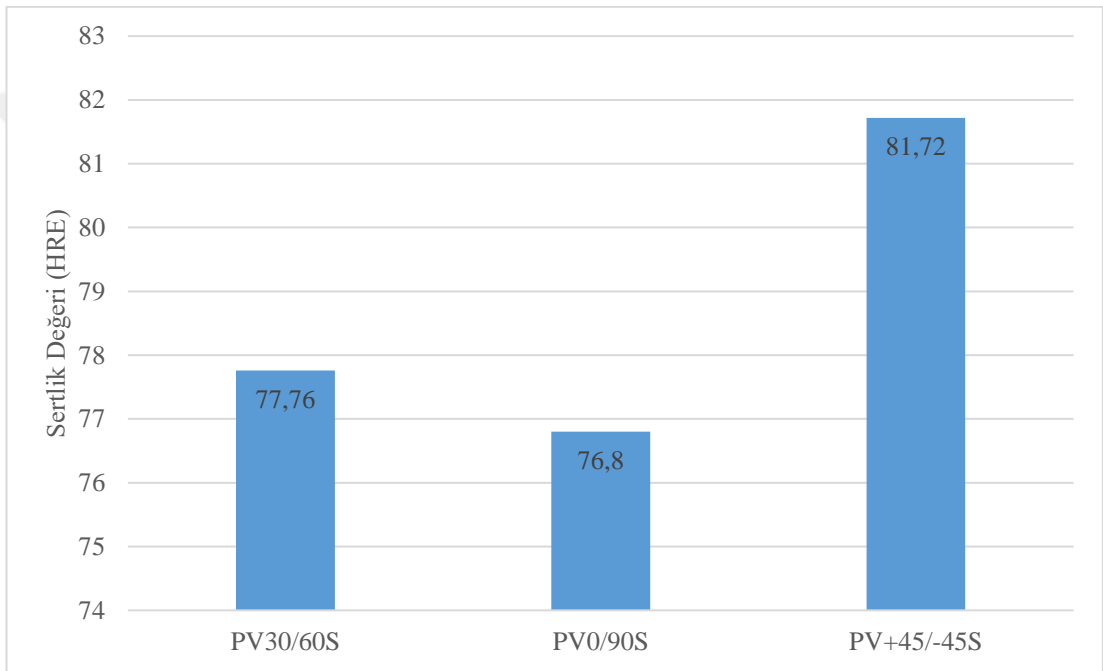
Oda sıcaklığında ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde üç farklı elyaf oryantasyonuna sahip numunelerin sertlik değerleri arasında fazla bir değişkenlik olmadığı görülmüş olup, en yüksek sertlik değerinin $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyon açısına sahip numunelerde mevcut olduğu belirlenmiştir. Üç farklı elyaf oryantasyonuna sahip hibrit matrisli kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin birbirlerine yakın olması, malzemelerin sertlik değerlerinin elyaf oryantasyon açısından çok, kullanılan matris elemanının türüne, kullanılan takviye türüne ve takviye miktarına bağlı olarak değişkenlik göstereceğini ortaya koymuştur.

Oda sıcaklığında yapılan sertlik ölçümleri, üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerleri hakkında bilgi vermiştir. Bununla birlikte rüzgar türbin kanatları dış ortamda değişken sıcaklıklar altında çalışacağından, seçilen kompozit malzemelerin farklı sıcaklıklarda istenilen sertlik değerlerini vermesi ve sıcaklık değişimleri sonucu mekanik ve fiziksel özellikler açısından kararlı halde bulunması isteneceğinden, numunelerin farklı sıcaklıklarda nasıl davranış göstereceğinin belirlenmesi önemlidir. Bu kapsamda üretilen numuneler -40°C ve $+60^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda 6 saat bekletilmek suretiyle, bu sıcaklıklardaki sertlik ölçümleri yapılarak değişken sıcaklıklar karşısında kararlılıkları incelenmiştir.

Aşağıda tüm numuneler için, -40°C , $+20^{\circ}\text{C}$ ve $+60^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarında yapılan sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.3 Numunelerin -40°C'deki sertlik değerleri

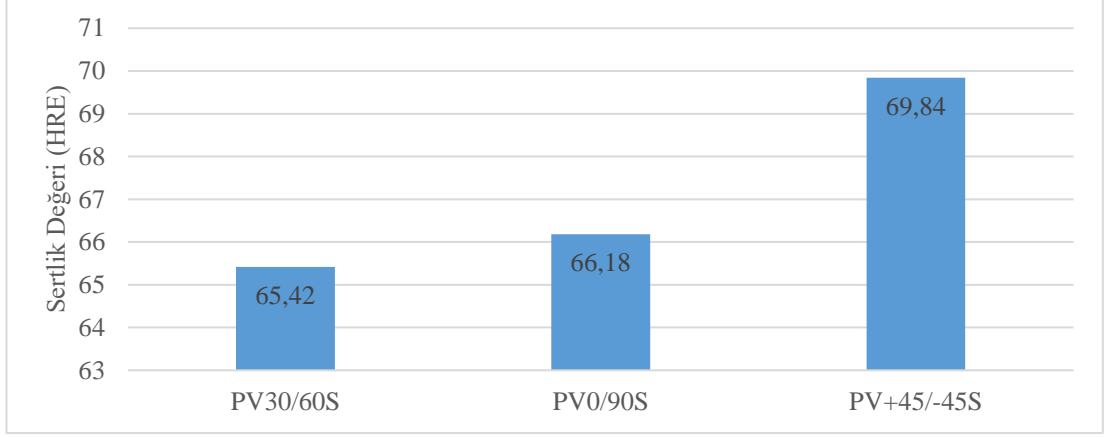
Malzeme Kodu	1.Ölçüm (HRE)	2.Ölçüm (HRE)	3.Ölçüm (HRE)	4.Ölçüm (HRE)	5.Ölçüm (HRE)	Ortama Sertlik Değeri (HRE)
PV30/60S	80,4	81,2	72,3	77,8	77,1	77,76
PV0/90S	82,1	77,1	76,5	77,2	71,1	76,8
PV+45/-45S	81,2	83,6	86,1	77,3	80,4	81,72



Şekil 5.5 Numunelerin -40°C'deki sertlik değerleri

Tablo 5.4 Numunelerin +60 °C'deki sertlik değerleri

Malzeme Kodu	1.Ölçüm (HRE)	2.Ölçüm (HRE)	3.Ölçüm (HRE)	4.Ölçüm (HRE)	5.Ölçüm (HRE)	Ortama Sertlik Değeri (HRE)
PV30/60S	64,6	63,5	64,8	67,2	67	65,42
PV0/90S	66,7	62	67,1	68,5	66,6	66,18
PV+45/-45S	68,2	65,4	71,3	72,5	71,8	69,84



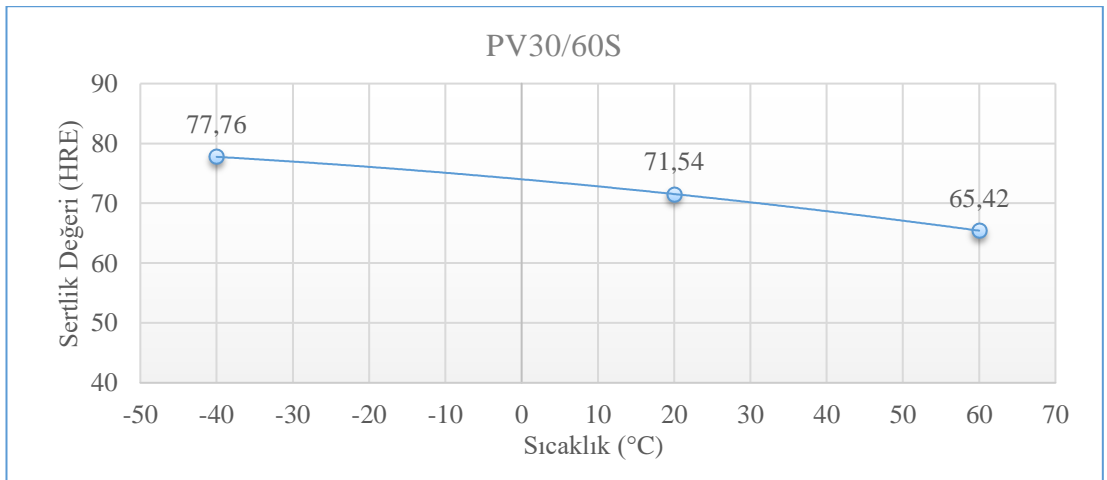
Şekil 5.6 Numunelerin +60°C'deki sertlik değerleri

Numunelerin üç farklı sıcaklıktaki elde edilen ortalama sertlik değerleri aşağıda verilmiştir.

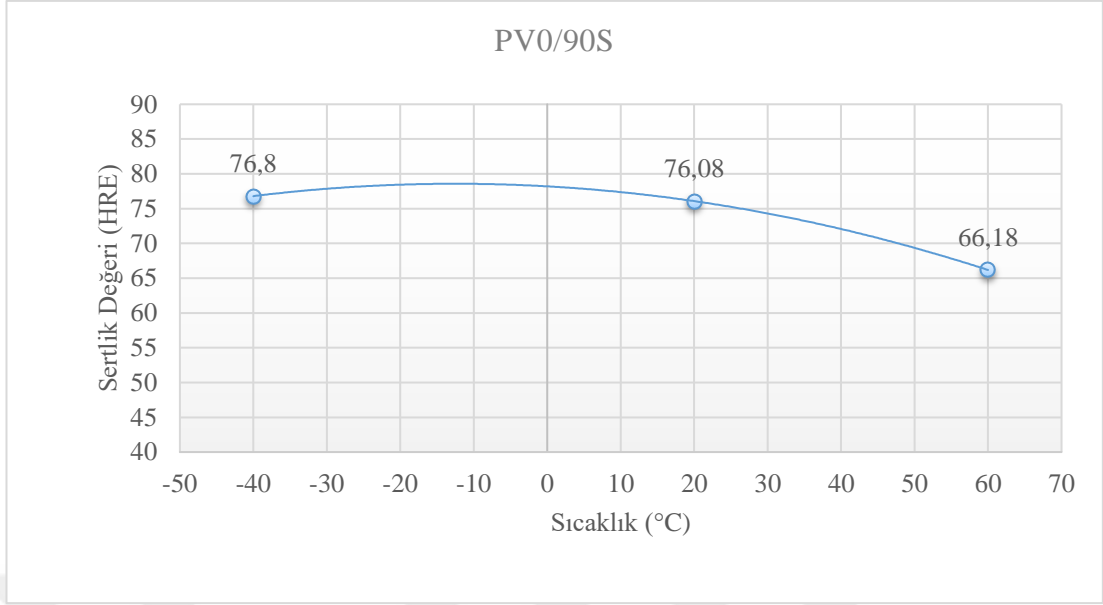
Tablo 5.5 Numunelerin üç farklı sıcaklıktaki ortalama sertlik değerleri

Malzeme Kodu	Sertlik Değeri (-40°C) (HRE)	Sertlik Değeri (+20°C) (HRE)	Sertlik Değeri (+60°C) (HRE)
PV30/60S	77,76	71,54	65,42
PV0/90S	76,8	76,08	66,18
PV+45/-45S	81,72	79,76	69,84

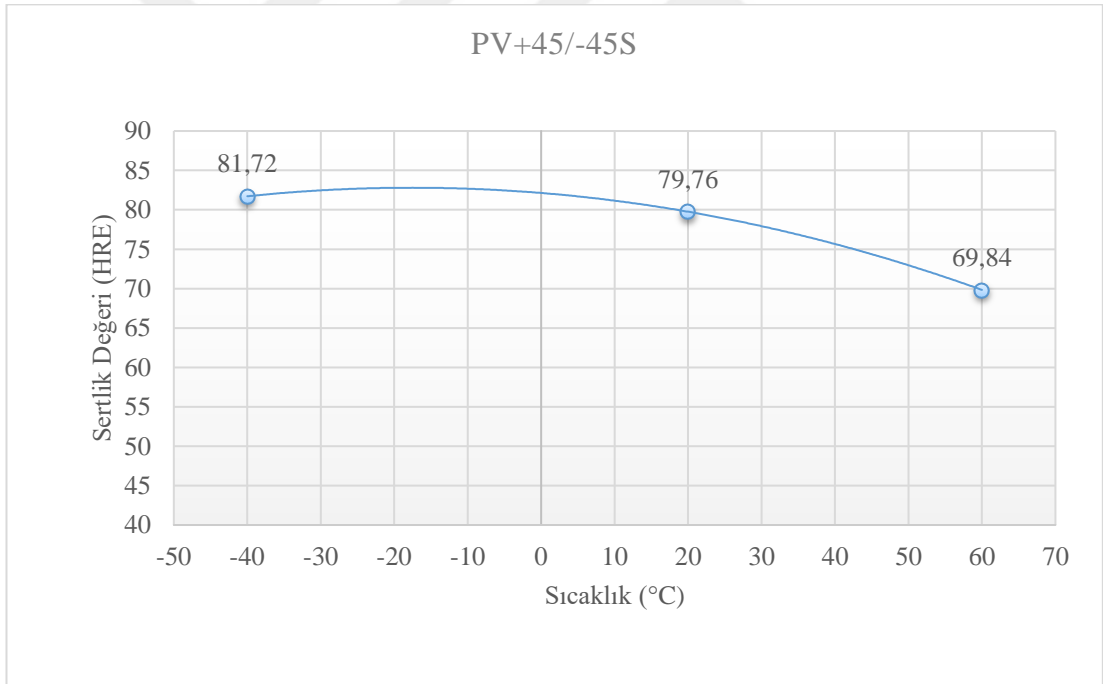
Her tür numune için sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimini gösteren grafikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.7 PV30/60S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.8 PV0/90S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.9 PV+45/-45S kodlu numunenin sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Üç farklı sıcaklıkta yapılan sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin sıcaklık artışı karşısında düştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte kullanılan polyester+vinilester hibrit matris elemanın sertlik

değerinin sıcaklık değişimi karşısındaki kararlılığının rüzgar türbin kanatları gereksinimlerine göre yeterli olabileceği düşünülmektedir.

5.3. Su Absorpsiyon Deneyi Bulguları

Üretilen kompozitlerin su absorpsiyon oranlarının tespit edilebilmesi için standartlara uygun olarak üretilen numunelere uygulanan su absorpsiyon deneyi sonuçları verilmiş ve irdelenmiştir. Bu kapsamda su absorpsiyon deneyi için kullanılan numunelerin isimleri Tablo 5.6’ daki gibi kodlandırılmıştır.

Tablo 5.6 Su absorpsiyon deneyi numune kodlandırma

Matris Elemanı	Takviye Elemanı	Elyaf Açısı	Oryantasyon	Numune Kodu
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60SA1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60SA2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60SA3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60SA4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60SA5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>30°/ 60°</i>	<i>PV30/60SA</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90SA1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90SA2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90SA3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90SA4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90SA5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>0°/ 90°</i>	<i>PV0/90SA</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45SA1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45SA2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45SA3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45SA4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45SA5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>+45°/-45°</i>	<i>PV+45/-45SA</i>

Her bir tip malzeme için beş farklı numune ile yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki su absorpsiyon değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.7 Tüm numunelerin su absorpsiyon oranları

Numune Kodu	Kompozitin Yoğunluğu (gr/mm ³)	Su Absorpsiyon (% Ağırlık)	% Su Absorpsiyon (% Hacim)
PV30/60SA1	1,645	0,169	0,278
PV30/60SA2	1,644	0,156	0,257
PV30/60SA3	1,649	0,148	0,245
PV30/60SA4	1,648	0,161	0,265
PV30/60SA5	1,653	0,202	0,334
PV30/60SA (Ortalama)		0,167	0,276
PV0/90SA1	1,681	0,069	0,116
PV0/90SA2	1,670	0,081	0,135
PV0/90SA3	1,674	0,088	0,148
PV0/90SA4	1,679	0,126	0,211
PV0/90SA5	1,678	0,106	0,179
PV0/90SA (Ortalama)		0,094	0,158
PV+45/-45SA1	1,733	0,135	0,235
PV+45/-45SA2	1,710	0,315	0,540
PV+45/-45SA3	1,712	0,116	0,200
PV+45/-45SA4	1,717	0,114	0,197
PV+45/-45SA5	1,704	0,124	0,211
PV+45/-45SA (Ortalama)		0,161	0,276

Yukarıdaki tabloda her bir farklı elyaf oryantasyonuna sahip numuneler için su absorpsiyon değerleri hem ağırlık hem de hacimsel olarak gösterilmiştir. 30°/60° ve +45°/-45° elyaf oryantasyonlarına sahip numuneler ile kıyaslandığında 0°/90° elyaf oryantasyonlu kompozitlerin su absorpsiyon oranının ağırlık ve hacimsel olarak daha düşük olduğu görülmüştür. Böylece, sonuçlar incelendiğinde 0°/90° elyaf oryantasyonlu kompozitlerin diğer iki tip elyaf oryantasyonu içeren kompozitlere oranla nemli ortamlarda çalışma durumunda, hem ağırlık hem de boyutsal olarak daha kararlı olduğu ortaya konulmuştur. Su ile temas eden kompozit malzemelerde, su absorpsiyon oranının artmasıyla şişme, matris elemanın plastikleşmesi ve matris ile takviye elemanı arasında sıyrılma olayları meydana gelebileceğinden kompozitin mekanik özellikleri azalabilmektedir. Bu durumda rüzgar türbin kanatlarının tasarımında kullanılacak olan kompozit malzemelerin nemli ortamlardaki su absorpsiyon oranı, rüzgar türbin kanatlarının hem mekanik hem de fiziksel

özelliklerini etkileyeceğinden göz önünde bulundurulması gereken bir parametredir. Bilindiği gibi kanatların ağırlıkları türbin verimini etkileyen en önemli parametredir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelerin ortalama su absorpsiyon oranları incelendiğinde, 10 m/s rüzgar hızında 437 kW güç üreten, 48 m rotor çapına sahip ve bir kanadının ağırlığı yaklaşık olarak 2100 kg olan üç kanatlı rüzgar türbini için, 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitte kanat başına ağırlık artışı 1,974 kg, 30°/60° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitte kanat başına ağırlık artışı 3,507 kg, +45°/-45° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitte ise kanat başına ağırlık artışı 3,381 kg olması muhtemel görünmektedir. Çalışmada kullanılan tüm kompozitler için ağırlık artışlarının ihmal edilebilir olmasına karşın, su absorpsiyon oranı açısından 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin nemli ortamlarda çalışacak kanatlar için en uygun malzeme olduğu görülmüştür.

Hadzreel ve Aisha'nın yaptıkları çalışmada, matris elemanı olarak polyester reçine, takviye elemanı olarak cam elyaf kullanarak üretilen kompozitlerin iki yönlü ve çok yönlü elyaf oryantasyonuna sahip olduğu durumlar göz önüne bulundurularak su absorpsiyon deneyleri yapılmıştır. İki yönlü olarak seçilen elyaf oryantasyonu, 0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°, çok yönlü olarak seçilen elyaf oryantasyonu ise 0°/30°/60°/90°/ 0°/30°/60°/90° olarak belirlenmiştir. Yapılan su absorpsiyon deneyi sonucunda iki yönlü elyaf oryantasyonlu kompozitler için su absorpsiyon oranı (ağırlık) %0,60-%0,80 olarak, çok yönlü elyaf oryantasyonlu kompozitler için su absorpsiyon oranı (ağırlık) %1-%1,20 olarak hesaplanmış olup, yapmış olduğumuz çalışmaya paralel olarak en düşük su emme oranının 0°/90° elyaf oryantasyonlu kompozit malzemelerde meydana geldiği belirlenmiştir [19].

5.4. Çekme Deneyi Bulguları

Tez çalışması için üretilen hibrit matrisli farklı elyaf oryantasyonlarına sahip kompozitler ile çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi için kullanılan numunelerin isimleri Tablo 5.8'deki gibi kodlandırılmıştır.

Tablo 5.8 Çekme deney numuneleri kodlandırma

Matris Elemanı		Takviye Elemanı	Elyaf Açısı	Oryantasyon	Numune Kodu
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°		PV30/60Ç1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°		PV30/60Ç2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°		PV30/60Ç3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°		PV30/60Ç4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°		PV30/60Ç5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>30°/ 60°</i>		<i>PV30/60Ç</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°		PV0/90Ç1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°		PV0/90Ç2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°		PV0/90Ç3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°		PV0/90Ç4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°		PV0/90Ç5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>0°/ 90°</i>		<i>PV0/90Ç</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°		PV+45/-45Ç1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°		PV+45/-45Ç2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°		PV+45/-45Ç3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°		PV+45/-45Ç4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°		PV+45/-45Ç5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>+45°/-45°</i>		<i>PV+45/-45Ç</i>

Yapılan çekme deneyi sonucunda tüm numuneler için elde edilen değerler, Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9 Çekme deneyi sonuçları

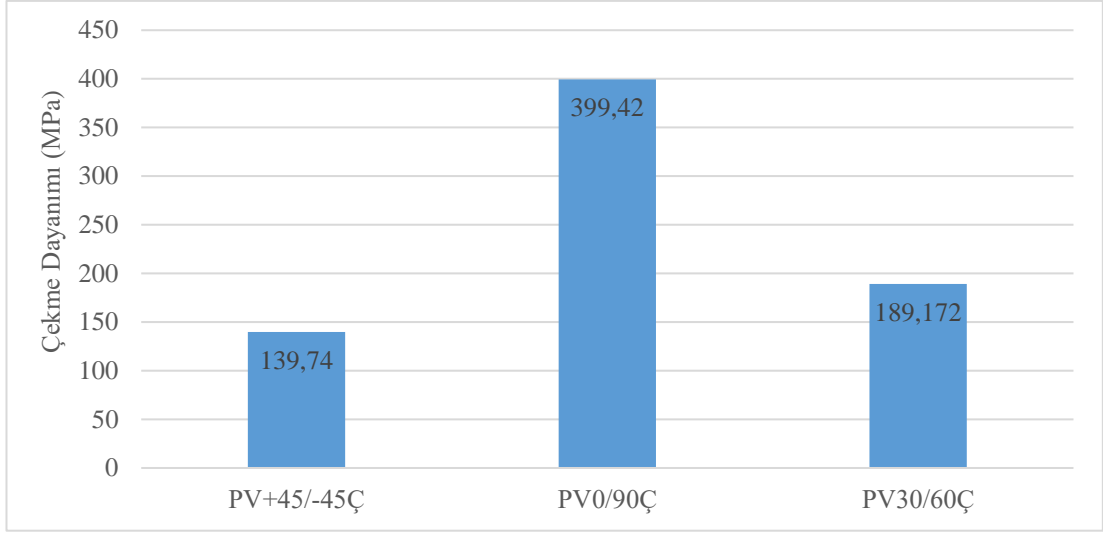
Numune Kodu	Çekme		Gerinim		Elastisite Modülü
	Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	mm	%	(MPa)
PV+45/-45Ç1	15799,29	140,44	22,27	15,70	2558,76
PV+45/-45Ç2	15582,59	138,51	21,97	15,55	2507,15
PV+45/-45Ç3	15622,78	138,87	21,13	14,98	2602,47
PV+45/-45Ç4	15843,68	140,83	21,87	15,52	2415,75
PV+45/-45Ç5	15756,22	140,05	22,73	16,11	2362,67
PV0/90Ç1	42943,32	381,72	11,64	8,20	6060,12
PV0/90Ç2	47092,58	418,60	12,78	9,01	5923,79
PV0/90Ç3	47078,62	406,72	12,37	8,76	4463,61
PV0/90Ç4	43934,41	390,52	12,09	8,55	5269,80
PV0/90Ç5	42854,46	399,54	12,20	8,75	5167,32
PV30/60Ç1	16531,70	188,94	14,89	10,63	4121,79
PV30/60Ç2	16678,62	189,56	15,01	10,87	4235,67
PV30/60Ç3	16484,36	187,44	14,95	10,72	4167,85
PV30/60Ç4	16769,54	190,32	15,76	11,03	4365,12
PV30/60Ç5	16690,56	189,60	15,03	10,90	4295,61

Çekme deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için yukarıdaki tablodaki tüm numuneler için verilen mekanik özelliklerin ortalamaları alınarak, sonuçlar aşağıda verilmiştir.

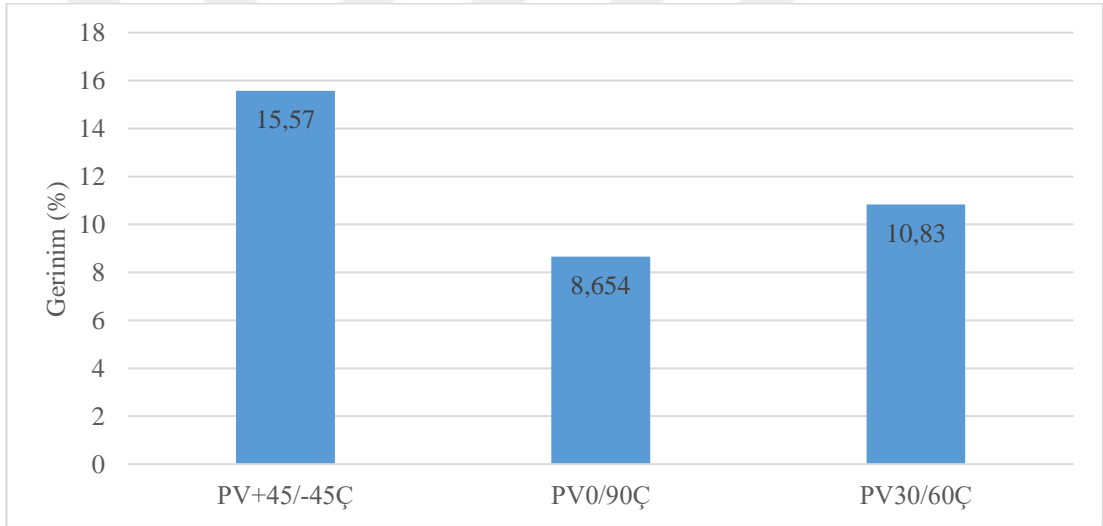
Tablo 5.10 Ortalama çekme deneyi sonuçları

Numune Kodu	Çekme		Gerinim		Elastisite Modülü
	Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	mm	%	MPa
PV+45/-45Ç	15720,91	139,74	21,99	15,57	2489,36
PV0/90Ç	44780,67	399,42	12,21	8,654	5376,92
PV30/60	16630,95	189,17	15,128	10,83	4237,20

Tablo 5.10’da kompozitlerin çekme deneyi sonucunda elde edilen mukavemet değerleri görülmektedir. Ek olarak Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’ de ortalama çekme dayanımı ve gerinim değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen değerlere göre, en yüksek çekme dayanımına (399,42 MPa) sahip numunenin 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip “PV0/90Ç” kodlu malzeme olduğu görülmüştür. Ayrıca +45°/-45° elyaf oryantasyonuna sahip “PV+45/-45Ç” kodlu malzemenin çekme dayanımının 139,74 MPa, 30°/60° elyaf oryantasyonuna sahip “PV30/60Ç” kodlu malzemenin ise çekme dayanımının 189,17 MPa olduğu görülmüş, bu sonuçlara göre malzemenin mukavemet değerlerinin elyaf açısına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiği belirlenmiştir. 0°/90° elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin en yüksek çekme dayanım değerini vermesinin sebebi, söz konusu kompozit malzemelerde çekme kuvvetinin tüm takviye elemanı üzerine eşit olarak dağıtılması ve elyaf eksenleri boyunca iletilmesidir. Yani çekme kuvvetinin elyaf eksenlerine paralel olarak uygulanmış olmasıdır. 30°/60° ve +45°/-45° elyaf oryantasyonuna sahip numunelerde ise, çekme dayanım değerinin 0°/90° elyaf oryantasyonlu kompozitlere göre düşük olmasının nedeni elyaf ekseninin yükleme eksenine paralel olmamasıdır. Sonuç olarak elyafların eksen dışı gerilmeye maruz bırakılması kompozit malzeme üzerinde gerilme yoğunluğunu arttırarak kompozit malzemenin mukavemetinin daha düşük olmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.10 Numunelerin Ortalama Çekme Dayanımı Değerleri



Şekil 5.11 Numunelerin ortalama gerinim değerleri

Şekil 5.11’ de malzemelerin ortalama gerinim değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Değerler incelendiğinde en yüksek çekme dayanım değerine sahip “PV0/90Ç” kodlu malzemenin gerinim değerlerinin, çekme dayanımı daha düşük olan “PV+45-45Ç” ve “PV30/60Ç” kodlu malzemelerden daha düşük olduğu görülmüştür. Yani en yüksek uzama değerine sahip numunenin en düşük çekme dayanımlı “PV+45/-45Ç” kodlu, en düşük uzama değerine sahip numunenin ise en yüksek çekme dayanımlı “PV0/90Ç” kodlu malzeme olduğu belirlenmiştir. Bu durumda elyaf eksenlerinin uygulanan kuvvete paralel olmasının, kompozitlerin mukavemet

değerlerini arttırmasına karşılık, şekil değiştirme kabiliyetlerini azalttığı gözlemlenmiştir.

Steigman ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, $\pm 45^\circ$ ve $0^\circ/90^\circ$ elyaf ortantasyonuna sahip cam elyaf takviyeli ve epoksi matrisli kompozit malzemelere çekme ve kayma deneyleri uygulanmış olup, iki farklı elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlarına sahip malzemelerin dayanım özelliklerinin daha üstün olduğunu gözlemlemiştir [7].

Daban'ın yaptığı bir çalışmada, $0^\circ/90^\circ$, $15^\circ/75^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyon açılarına sahip cam elyaf takviye elemanı kullanılan polyester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırılmış, yapılan çalışmalarda en yüksek mekanik özelliklere sahip numunelerin $0^\circ/90^\circ$ ve en düşük mekanik özelliklere sahip numunelerin ise $45^\circ/45^\circ$ elyaf oryantasyonlu numuneler olduğu gözlemlemiştir [11].

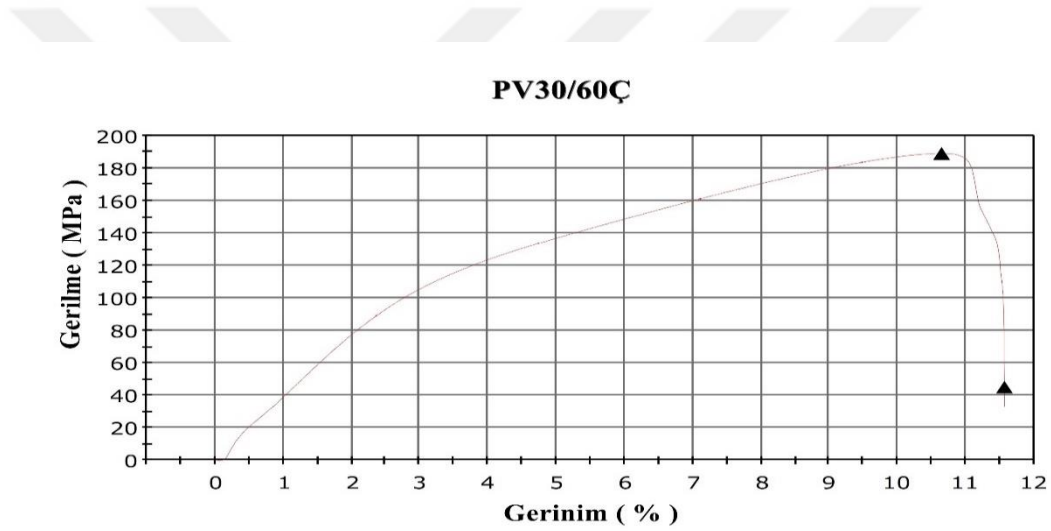
Chavan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, polyester matrisli ve $+45^\circ/-45^\circ$ ve $90^\circ/90^\circ$ cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerine çeşitli mekanik deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda $90^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyon açısına sahip kompozitlerin $45^\circ/45^\circ$ elyaf oryantasyon açısına sahip kompozitlerden daha iyi mukavemet özellikleri sergilediği görülmüştür [16].

Guru Raja ve Hari Rao'nun yaptıkları bir çalışmada, $0^\circ/90^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ elyaf oryantasyonlarında vakum infüzyon tekniği ile üretilmiş hibrit kevlar ve cam elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi sonucunda, en iyi mekanik özelliklere sahip kompozitlerin $0^\circ/90^\circ$, en düşük mekanik özelliklere sahip numunelerin ise $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde olduğunu tespit etmiştir [18].

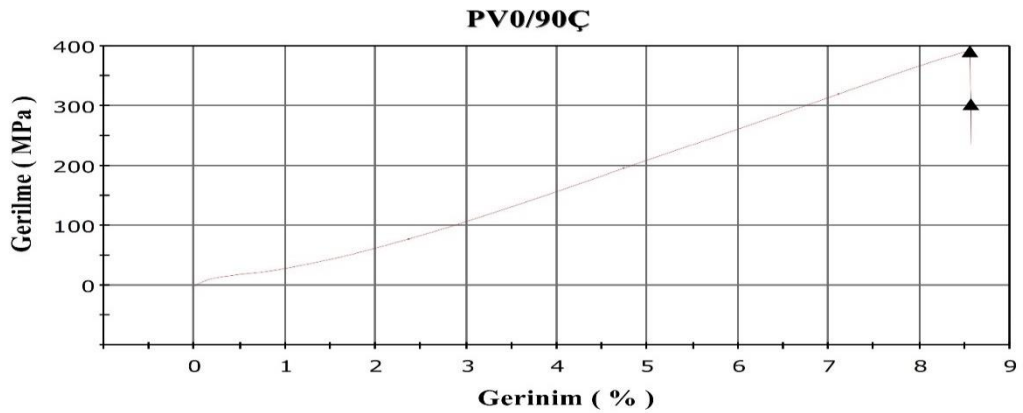
Guru Raja ve Hari Rao'nun yaptıkları bir çalışmada, vakum infüzyon metodu ile üretilmiş epoksi reçine matris elemanına sahip kompozitlerin, $0^\circ/90^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ cam elyaf ve karbon elyaflar ile hibrit olarak farklı elyaf oryantasyonları ile takviye edilmesinin mekanik özellikler üzerine etkilerini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek mekanik özelliklerin $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu, en

düşük mekanik özelliklerin ise, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde olduğu görülmüştür [20].

Yapmış olduğumuz tez çalışmasında, $0^{\circ}/90^{\circ}$, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ ve $30^{\circ}/60^{\circ}$ cam elyaf ile takviye edilmiş polyester+vinilester hibrit matrisli numunelerin çekme deneyleri sonucunda en yüksek çekme dayanımı $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde, en düşük çekme dayanımının ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde bulunduğu tespit edilmiş, sonuçların literatürde yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile paralel olduğu görülmüştür. Son olarak aşağıda numunelerin ortalama gerilim-gerinim diyagramları verilmiştir.

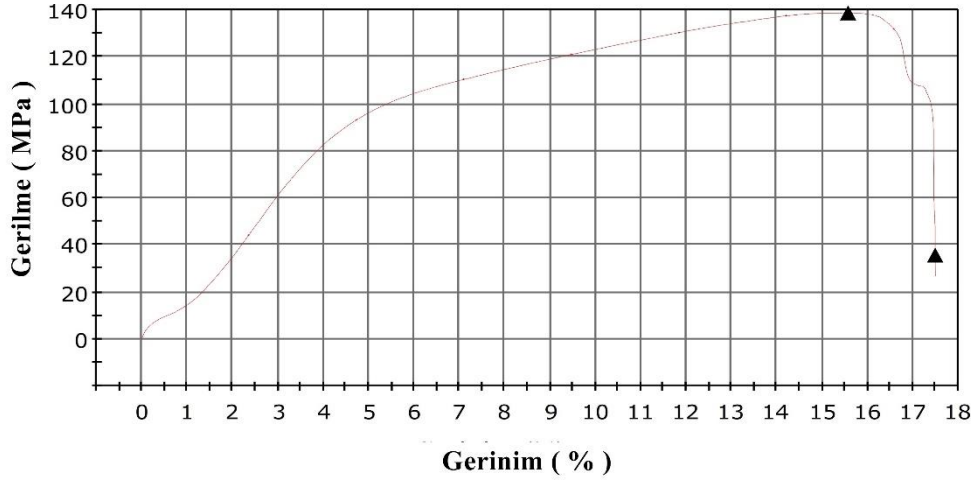


Şekil 5.12 PV30/60Ç kodlu numunenin ortalama Gerilme-Gerinim diyagramı



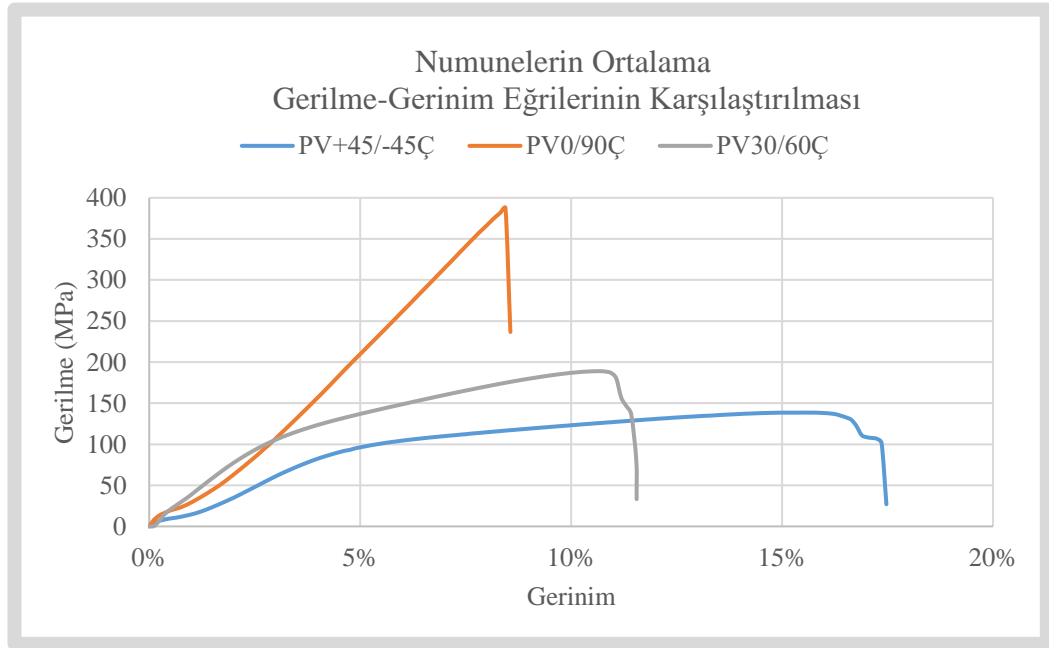
Şekil 5.13 PV0/90Ç kodlu numunenin ortalama Gerilme-Gerinim diyagramı

PV+45/-45Ç



Şekil 5.14 PV+45/-45Ç kodlu numunenin ortalama Gerilim-Gerinim diyagramı

Şekil 5.15’de ise çalışmada kullanılan tüm kompozitlerin ortalama gerilim ve gerinim değerleri, karşılaştırma yapmak amacı ile tek bir diyagram üzerinde verilmiştir.



Şekil 5.15 Numunelerin ortama Gerilme- Gerinim diyagramı

Şekil 5.15’de tüm numunelerin Gerilme – Gerinim diyagramları tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, malzemeler arasında en çok gevrek davranış gösteren malzemenin en yüksek çekme dayanımı değerine sahip “PV0/90Ç” kodlu malzemenin olduğu, en çok sünek davranış gösteren malzemenin ise, en düşük çekme dayanımına sahip “PV+45/-45Ç” kodlu malzeme olduğu görülmüştür. Elyaf oryantasyon açılarının uygulanan kuvvet eksenine yönünde olması malzemenin dayanım değerini artırırken, şekil değiştirme kabiliyetini önemli ölçüde azaltmıştır. 0°/90° elyaf oryantasyonlu malzemedeki kırılma meydana gelene kadar hemen hemen gerilme ve şekilde değiştirme doğru orantılı olarak gerçekleşmiş ve kırılma ani bir şekilde meydana gelmiştir.

Elyaf malzemeler seramik esaslı malzemeler olduklarından dolayı sert ve kırılma özelliğine sahiptir. “PV0/90Ç” kodlu malzemelerdeki elyaf eksenlerinin uygulanan kuvvete paralel olması sonucunda kompozitin şekil değiştirme kabiliyeti elyaflar tarafından sınırlandırıldığı için söz konusu numunelerdeki plastik şekil değiştirme oranı diğer iki tip numuneye göre oldukça düşük olarak gözlemlenmiş ve “PV0/90Ç” kodlu numuneler en çok gevrek gösteren malzemeler olarak belirlenmişlerdir. “PV+45/-45Ç” ve “PV30/60Ç” kodlu numunelerdeki plastik şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek olmasının sebebinin açısal olarak yerleştirilen elyaf oryantasyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira çekme deneyi sırasında elyafların uygulanan kuvvete paralel hale gelmesine kadar numuneler, plastik şekil değişimi göstereceklerdir. Bu nedenle “PV+45/-45Ç” ve “PV0/30Ç” kodlu numunelerde şekil değiştirme kabiliyeti “PV0/90Ç” kodlu numuneye oranla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir.

Özdil Kaçan’ın yapmış olduğu bir çalışmada, rüzgar türbin kanatları için 25 m/s rüzgar hızında ve 286 devirde, kanat üzerinde oluşan basınç değerleri analiz edilmiş, meydana gelen maksimum gerilmeler dikkate alınarak epoksi reçine-cam elyaf kompozit malzeme için kanat tabakalarında optimum kalınlık ve elyaf oryantasyonu belirlenmiş, yapılan analiz sonucunda en yüksek gerilmenin (172, 57 MPa) kanat ile kök arasında meydana geldiğini ortaya konulmuştur [3].

Yapılan tez çalışmasında ise 0°/90° elyaf oryantasyonlarına sahip numunelerin ortama çekme dayanımı 399,42 MPa, 30°/60° elyaf ortantasyonlarına sahip numunelerin ortalama çekme dayanımı 189,17 MPa, +45°/-45° elyaf oryantasyonlarına sahip numunelerin ise ortalama çekme dayanımının 139,73 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre kanadın kök bölgesi için en emniyetli çalışabilecek kompozitin 0°/90° elyaf oryantasyonlu malzeme olduğu, 30°/60° elyaf oryantasyonlu malzemenin emniyetli tasarım kriterlerine uyduğu, +45°/-45° elyaf oryantasyonlu kompozitlerin ise en yüksek gerilmenin olduğu kök bölgesi için emniyetli tasarım kriterlerine uygun olmadığı belirlenmiştir.

5.5. Darbe Deneyi Bulguları

Çalışmanın bu bölümünde standartlara uygun olarak üretilen çentiksiz kompozit numunelere uygulanan darbe deneyi sonuçları verilmiş ve irdelenmiştir. Bu kapsamda darbe deneyi için kullanılan numunelerin isimleri Tablo 5.11’ deki gibi kodlandırılmıştır.

Tablo 5.11 Darbe deney numuneleri kodlandırma

Matris Elemanı	Takviye Elemanı	Elyaf Oryantasyon Açısı	Numune Kodu	
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60D1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60D2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60D3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60D4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60D5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>30°/ 60°</i>	<i>PV30/60D</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90D1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90D2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90D3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90D4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90D5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>0°/ 90°</i>	<i>PV0/90D</i>

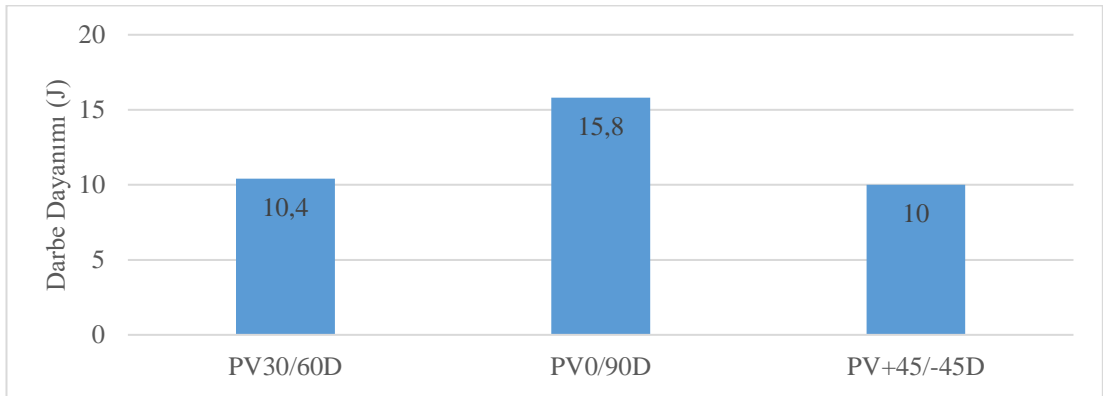
Tablo 5.11. (Devamı)

Matris Elemanı	Takviye Elemanı	Elyaf Oryantasyon Açısı	Numune Kodu	
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45D1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45D2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45D3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45D4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45D5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>+45°/-45°</i>	<i>PV+45/-45D</i>

Yapılan darbe deneyi sonucunda, tüm numuneler için bulunan darbe enerjisi absorpsiyon değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir.

Tablo 5.12 Numunelere ait darbe dayanımı değerleri

	PV30/60D1	PV30/60D2	PV30/60D3	PV30/60D4	PV30/60D5	PV30/60D (Ortalama)
Darbe Dayanımı (J)	11,0	10,0	10,0	11,0	10,0	10,4
	PV0/90D1	PV0/90D2	PV0/90D3	PV0/90D4	PV0/90D5	PV0/90D (Ortalama)
Darbe Dayanımı (J)	18,0	15,0	14,0	16,0	16,0	15,8
	PV±45D1	PV±45D2	PV±45D3	PV±45D4	PV±45D5	PV±45D (Ortalama)
Darbe Dayanımı (J)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0



Şekil 5.16 Numunelerin ortalama darbe dayanımı değerleri

Tablo 5.12 ve Şekil 5.16 incelendiğinde en yüksek darbe dayanımına sahip malzemenin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip “PV0/90D” kodlu malzeme, en düşük darbe dayanımına sahip malzemenin ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip “PV \pm 45D” kodlu malzeme olduğu belirlenmiştir. Ek olarak “PV \pm 45D” kodlu malzeme ile “PV30/60D” kodlu malzemenin darbe dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu, neredeyse aynı şekilde davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre kullanılan kompozit malzemelerin darbe enerjisi absorpsiyon oranları incelendiğinde, $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonu kullanımı, $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna göre % 51,9 oranında, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyona göre %58 oranında artış sağlamıştır. Elyaf oryantasyonun $30^{\circ}/60^{\circ}$ ile $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ olması darbe direncinde sadece %4'lük bir fark yaratmıştır.

Sonuç olarak rüzgar türbin kanatlarında kuş çarpması, dolu yağışları gibi ani darbe kuvvetine neden olacak olayların göz önünde alınması ile darbe enerjisi absorpsiyon oranı açısından seçilecek en uygun malzemenin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip malzeme olduğu görülmüştür. $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip numunelerde uygulanan darbe kuvvetinin elyaf eksenlerine dik yönde olmasının bir sonucu olarak, kuvvetin büyük bir kısmı elyafların kırılması için harcanacaktır. Diğer iki tip numunede ise, uygulanan yük açısız olarak yerleştirilen elyaflar ve matris tarafından karşılanacaktır. Dolayısı ile $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip numunelerdeki absorbe edilen darbe enerjisi diğer numunelere oranla daha fazla olacaktır. Fakat ani darbe kuvvetleri karşısında, seçilen kompozitlerin darbe davranışın kıyaslanması sadece enerji absorpsiyon oranlarına göre yapılmamalı, kompozitlerin kırılma şekilleri de gözönünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle rüzgar türbin kanatlarında ani darbe yüklemeleri karşısında kullanılacak en uygun kompozit malzemenin hangisi olduğunun kararının kırık yapı incelenmesi sonucunda verilmesi gereklidir.

5.6. Eğilme Deneyi Bulguları

Tez çalışmasında kullanılan polyester+vinilester matrisli ve farklı elyaf oryantasyonlarında ($30^{\circ}/60^{\circ}$, $0^{\circ}/90^{\circ}$, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$) üretilmiş olan kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarını incelemek açısından söz konusu numuneler ile

eğilme deneyleri yapılmıştır. Eğilme deneyi için kullanılan numunelerin isimleri aşağıdaki Tablo 5.13'deki gibi kodlandırılmıştır.

Tablo 5.13 Eğilme deney numuneleri kodlandırma

Matris Elemanı	Takviye Elemanı	Elyaf Oryantasyon Açısı	Numune Kodu	
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60E1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60E2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60E3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60E4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	30°/ 60°	PV30/60E5
<i>Polyester+Vinilester Matris (Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>30°/ 60°</i>	<i>PV30/60E</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90E1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90E2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90E3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90E4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	0°/ 90°	PV0/90E5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>0°/ 90°</i>	<i>PV0/90E</i>
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45E1
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45E2
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45E3
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45E4
Polyester+Vinilester Matris	Hibrit	Cam Elyaf	+45°/-45°	PV+45/-45E5
<i>Polyester+Vinilester Matris(Ortalama Değerler için)</i>	<i>Hibrit</i>	<i>Cam Elyaf</i>	<i>+45°/-45°</i>	<i>PV+45/-45E</i>

Yapılan eğilme deneyi sonucunda tüm numunelere ait değerler Tablo 5.14'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 5.14 Bütün numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Kuvvet (N)	Gerinim (mm)	Gerinim (%)
PV+45/-45E1	196.10	708.16	6.63	5.53
PV+45/-45E2	194.63	702.85	6.94	5.78
PV+45/-45E3	208.67	753.55	7.07	5.89
PV+45/-45E4	195.66	706.57	6.85	5.71
PV+45/-45E5	211.04	762.118	6.69	5.57
PV0/90E1	538.32	1943.95	4.36	3.63
PV0/90E2	410.68	1483.03	4.30	3.58
PV0/90E3	482.08	1740.87	4.70	3.92
PV0/90E4	417.01	1505.89	4.31	3.59
PV0/90E5	532.52	1922.99	4.36	3.63
PV30/60E1	371.56	483.03	10.10	5.05
PV30/60E2	378.88	492.55	10.27	5.13
PV30/60E3	382.33	497.03	9.73	4.86
PV30/60E4	371.90	483.47	9.87	4.93
PV30/60E5	342.47	445.21	10.02	5.01

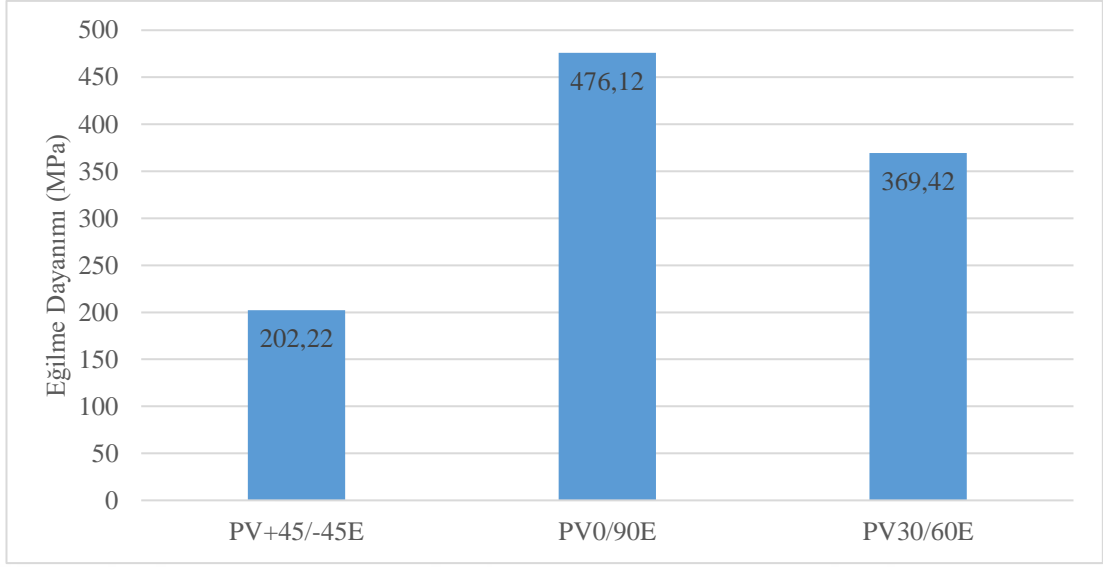
Eğilme deneyi sonuçlarının tüm numuneler için ortalamaları alınarak Tablo 5.15’ de verilmiştir.

Tablo 5.15 Numunelerin ortalama eğilme deneyi sonuçları

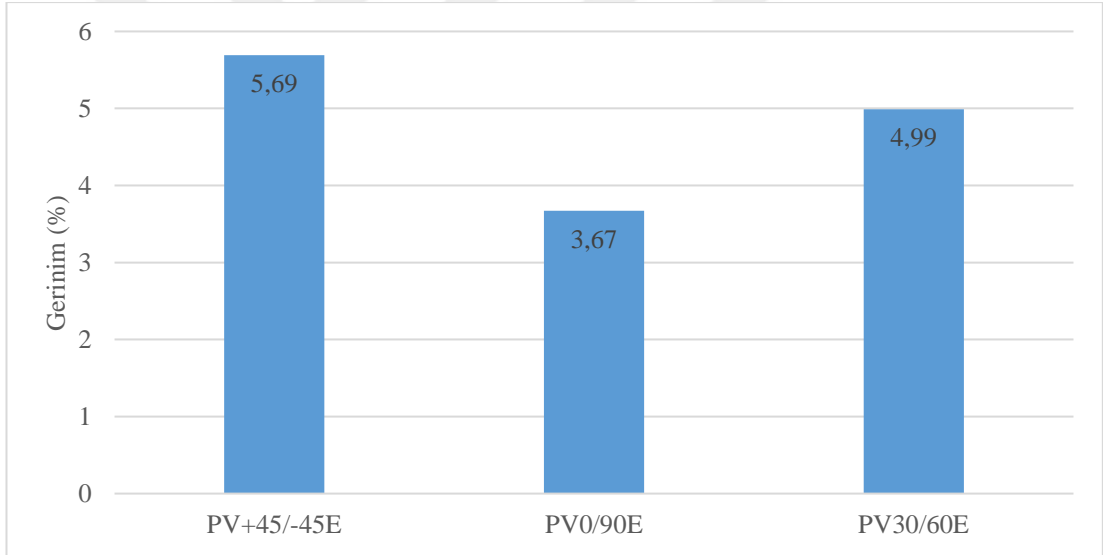
Numune Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Kuvvet (N)	Gerinim (mm)	Gerinim (%)
PV+45/-45E	201,22	726,64	6,83	5,69
PV0/90E	476,12	1719,34	4,40	3,67
PV30/60E	369,42	480,25	9,99	4,99

Üç noktalı eğilme deneyi sonucunda elde edilen verilere göre elyaf oryantasyon farklılıklarının kompozitlerin eğilme dayanım değerlerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Maksimum dayanımın değerinin (476,12 MPa) elde edildiği kompozit malzeme “PV0/90E” kodlu, 0°/90° elyaf oryantasyonlarına sahip malzemedir. Ek olarak en düşük dayanım değerinin (201,22 MPa) elde edildiği kompozit malzemenin ise, “PV+45/-45E” kodlu, +45°/-45° elyaf oryantasyonlarına sahip malzemeler olduğu görülmüştür. Eğilme deneyinde elde edilen bulgulara göre, en yüksek ve en düşük dayanım değerlerine sahip malzeme tipleri çekme deney sonuçları ile paralellik göstermiştir. Rüzgar türbin kanatları çekme kuvvetlerinin haricinde eğilme zorlanmalarına maruz kaldığından, seçilen malzemeler içerisinde eğilme zorlanmalarına karşı en emniyetli işletilebilecek olan malzemenin “PV0/90E” kodlu 0°/90 elyaf oryantasyonuna sahip malzemenin olduğu belirlenmiştir. Elyaf eksenlerinin uygulanan yüke paralel olması çekme dayanımı arttırdığı gibi eğilme dayanımı da arttırmıştır.

Yapılan eğilme ve çekme deneyleri sonucunda görülmüştür ki, tüm malzemeler için eğilme dayanımı değerleri çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni yapılan eğilme testinde uygulanan basınç numunede meydana gelen gerilmelere dik yöndedir ve bunun sonucunda dik yönde uygulanan basınç malzemelerde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini azaltır. Eğilmeye maruz kalan malzemelerde çatlak numunenin alt kısmından başlar ve uygulanan basınç tarafına doğru hareket eder.



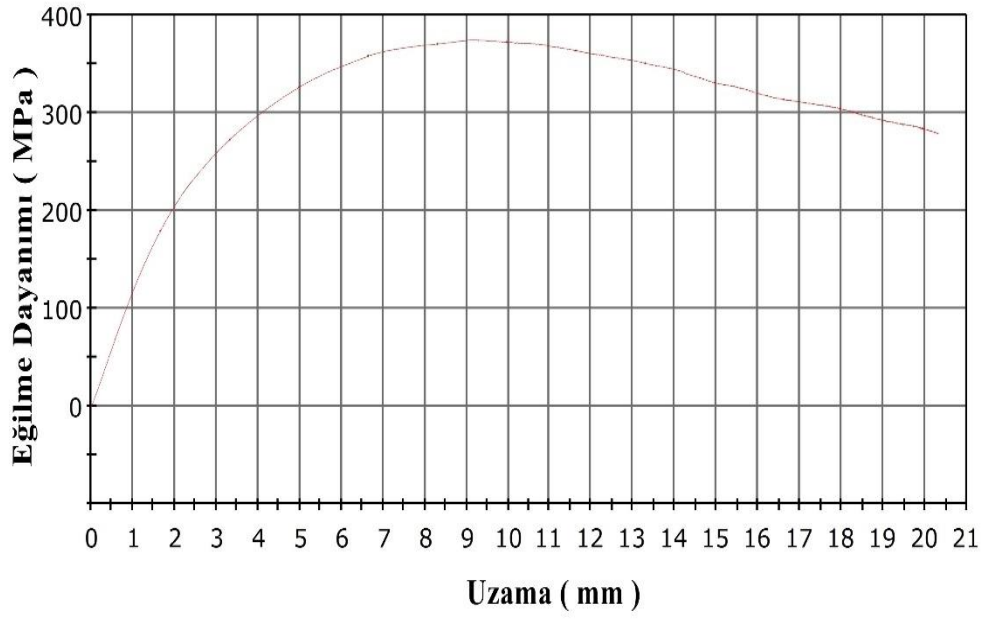
Şekil 5.17 Numunelerin ortalama eğilme dayanımı değerleri



Şekil 5.18 Numunelerin Ortalama Gerinim Değerleri

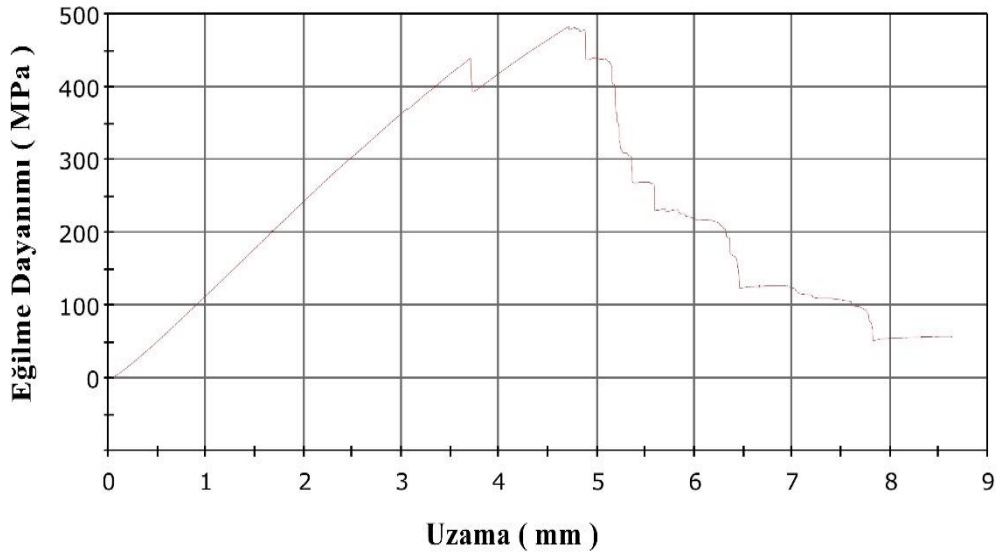
Yapılan çekme deney sonuçlarına paralel olarak, en yüksek dayanıma sahip 0°/90° elyaf oryantasyonlu “PV0/90E” kodlu malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin, en düşük dayanıma sahip +45°/-45° elyaf oryantasyonlu “PV+45/-45” kodlu malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Eğme deneyi sonucunda da üretilen kompozitlerin mukavemet değerlerinin artışı ile şekil değiştirme kabiliyetlerinin ters orantılı olduğu görülmüştür. Aşağıdaki diyagramlarda numunelerin ortalama gerilme-uzama değerleri eğrileri verilmiştir.

PV30/60E



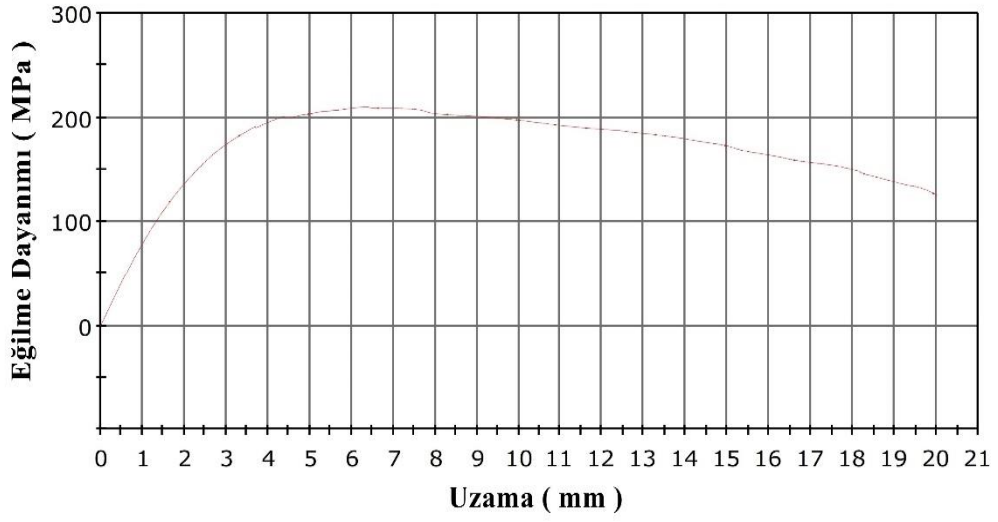
Şekil 5.19 PV30/60E kodlu numunenin ortalama E. Dayanımı-Uzama Diyagramı

PV0/90E



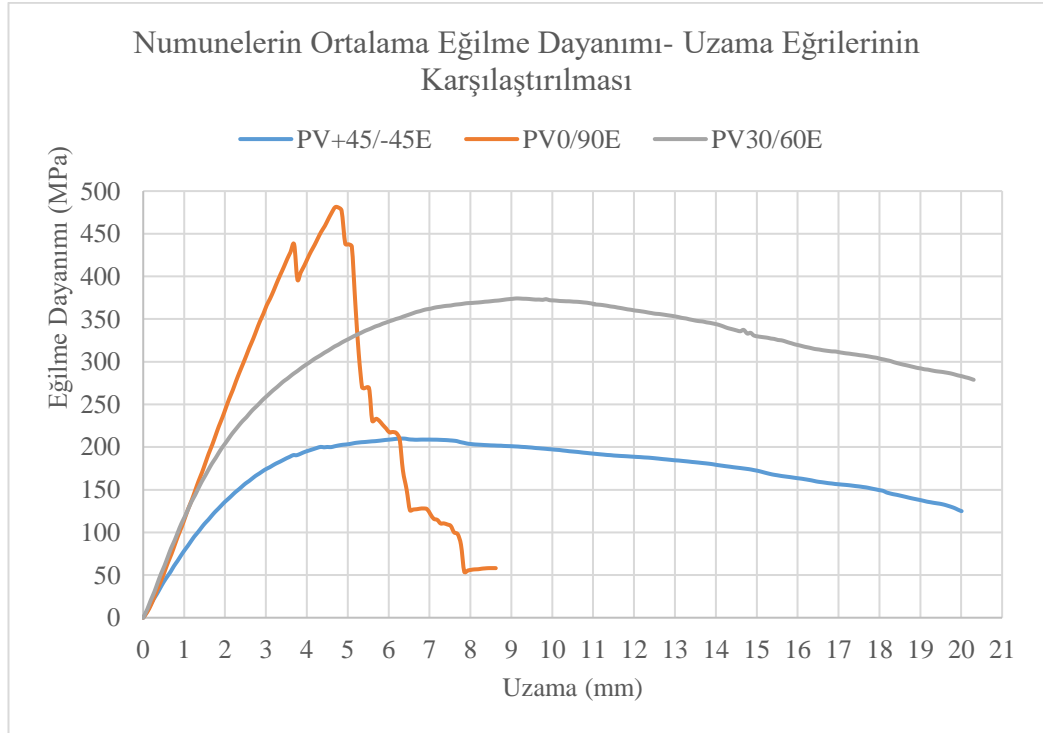
Şekil 5.20 PV0/90E kodlu numunenin ortalama E. Dayanımı-Uzama diyagramı

PV+45/-45E



Şekil 5.21 PV+45/-45E kodlu numunenin E. dayanımı- Uzama diyagramı

Şekil 5.22’ de ise çalışmada kullanılan kompozitlerin ortalama eğilme dayanımı ve uzama değerlerini karşılaştırma yapmak amacı ile tek bir diyagram üzerinde verilmiştir.



Şekil 5.22 Numunelerin Ortalama Eğilme Dayanımı – Uzama Eğrileri

Şekil 5.22 incelendiğinde “PV0/90E” kodlu numunelerde ani kuvvet düşüşleri gözlemlenmiştir. Kuvvette meydana gelen ani düşmelerin nedeninin, elyaflarda meydana gelen kopmalardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. “PV+45/-45E” ve PV30/60E kodlu numunelerde ise seçilen oryantasyondan dolayı liflerde kırılma meydana gelmemiş olup buna bağlı olarak kuvvette ani bir düşme izlenmemiştir.

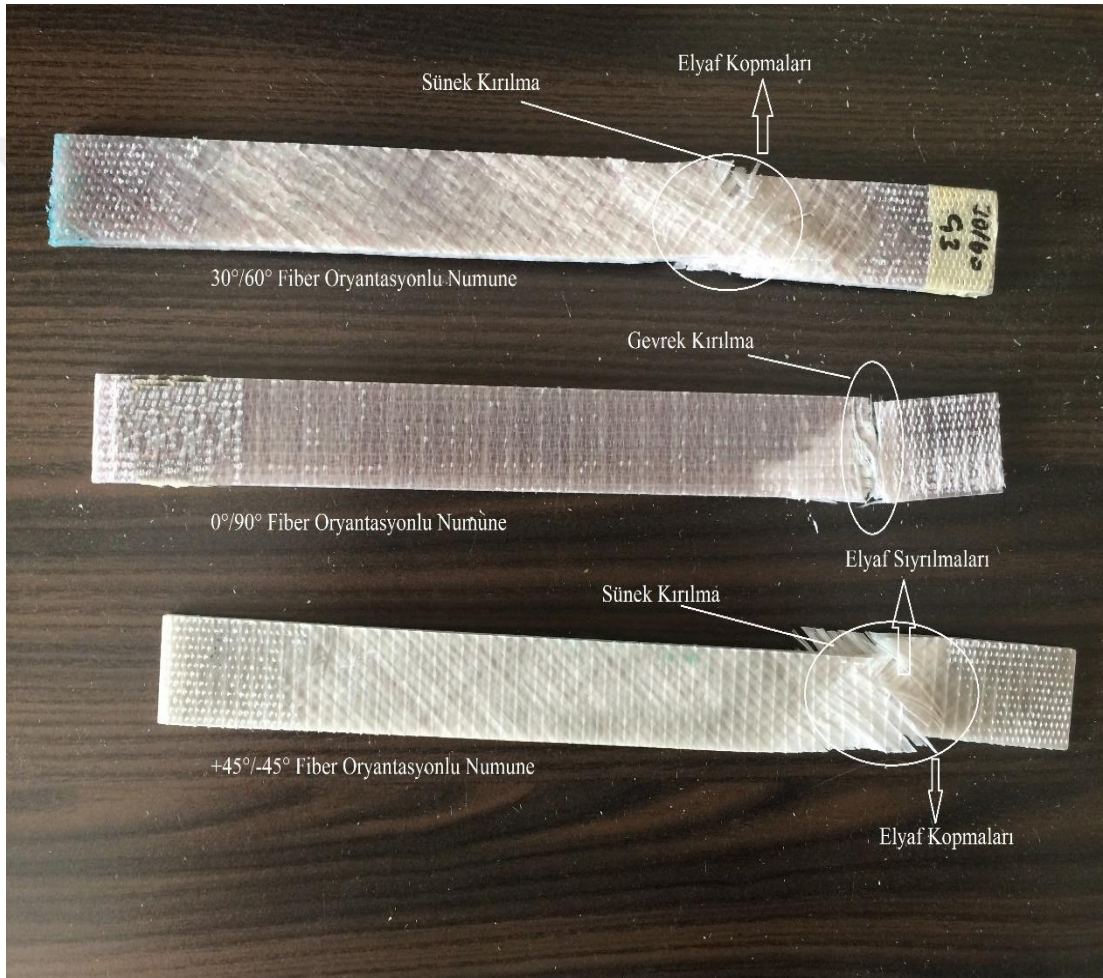
5.7. Kırık Yüzeylerin İncelenmesi

Çalışma kapsamında üretilen test numunelerine yapılan çekme, darbe ve eğilme deneyleri sonucunda elde edilen mekanik özellik değerlerinin irdelenmesinin yanı sıra, parçaların kırılma şekilleri incelenmiş ve irdelenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda parçaların gevreklik ve süneklik özellikleri, tabakalar ve matris ile elyaf arasındaki bağların durumu, elyafların reçine tarafından yeteri kadar ıslatılması gibi durumlar göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmıştır.

Yapılan çekme deneyi sonucunda numunelerin hepsinin tamamen kopmadığı izlenmiş olup tamamen kopmaların yalnızca 0°/90° elyaf oryantasyonlu kompozitlerde olduğu görülmüştür. Buna karşın numunelerde matris çatlakları, elyaf matris arasında sıyrılmalar ve delaminasyonlar meydana gelmiştir. Elyaf matris arası sıyrılmaların oranının yüksek olması nedeni ile elyafların tamamen kopmamasından dolayı 30°/60° ve +45°/-45° elyaf oryantasyonlu numuneler tek parça halinde kalmıştır. Elyaf matris elemanları tarafından tamamen ıslatılıp ıslatılmadığının değerlendirilmesi amacı ile bazı numuneler elle birbirlerinden ayrılmış, yapılan inceleme sonucunda üretilen numunelerde kullanılan elyafların matris tarafından yeterli ölçüde ıslatıldığı belirlenmesine karşın, en iç tabakalardaki bazı elyaflarda ıslanmama olduğu görülmüştür. Elyafın matris tarafından tamamen ıslatılmış olması, elyaf ile matris arasındaki bağların daha kuvvetli olmasını ve böylece kompozitin mukavemet değerlerinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Şekil 5.23’de çekme numunelerinin kırılma şekilleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.23’deki kırılma yapılarını incelediğimizde, yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen diyagramlardan elde edildiği gibi, 0°/90° elyaf oryantasyonlarına sahip kompozitlerin daha gevrek kırıldığı, +45°/-45° elyaf

oryantasyonlarına ait numunelerin ise daha sünek olarak kırıldıkları görülmüştür. Ayrıca $30^\circ/60^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyonlu numunelerde meydana gelen delaminasyonların, $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu kompozite göre daha fazla miktarda olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, kompozitlere uygulanan çekme kuvveti sonucunda elyafların uygulanan kuvvete paralel olarak hareket etme isteği ile tabakalar arasında bağ kuvvetinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.24'de numunelerde meydana delaminasyon olayları gösterilmiştir.



Şekil 5.23 Çekme numuneleri örnek kırılma şekilleri



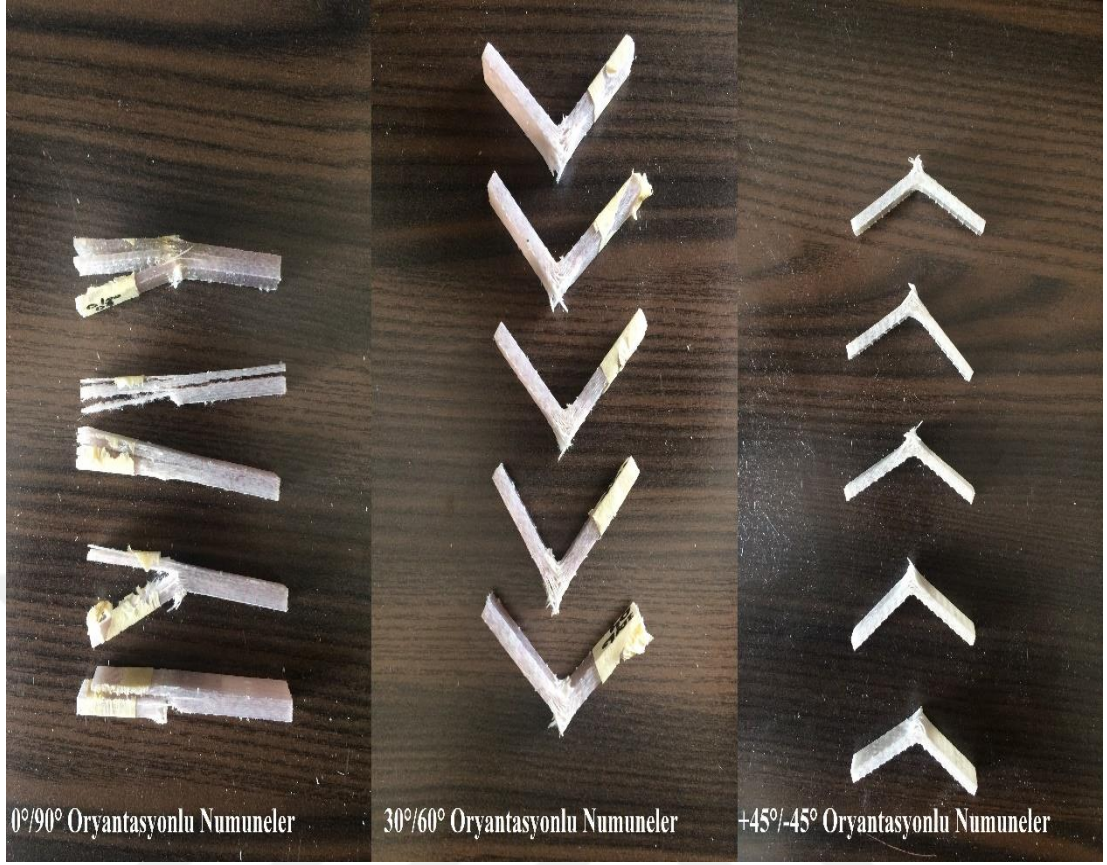
Şekil 5.24 Çekme numunelerinde görülen tabaka ayrılmaları

Şekil 5.25 incelendiğinde ise $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlarına sahip numunelerin hepsinde, şekilde görüldüğü gibi, tamamen kopmalar meydana gelmiştir. Yani $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde elyaf sıyrılması diğer iki tip numuneye göre daha azdır. Bu olay, $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerde elyaf ile matrisin şekil değiştirme miktarının aynı olduğunu göstermiştir. Bunun sonucunda çalışmada kullanılan kompozitlerin çekme zorlanması ile karşılaştığı durumda, $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde elyaf ile matris arasındaki bağın diğer kompozitlere oranla daha kuvvetli olduğu yargısına varılabilir.



Şekil 5.25 Numunelerin Elyaf -Matris Bağ kuvvetlerinin karşılaştırılması

Yapılan Charpy darbe deneyi sonucunda 30°/60° ve +45°/-45° elyaf oryantasyonlu kompozitlerde ise hiçbir numunenin tamamen kopmadığı, katlanıp kaldığı görülmüş olup delaminasyona rastlanmamıştır (Şekil 5.26). 30°/60° ve +45°/-45° elyaf oryantasyonlu kompozitlerde darbe yüzeyinin arka tarafında kalan tabakalardaki gerilmeler daha yüksek olduğundan bu bölgede matris kırılmaları ve elyaf kopmaları meydana gelmiş, darbenin alındığı yüzey tarafında ise kopma görülmemiştir. 0°/90° elyaf oryantasyonlu numunelerin diğer iki tip numuneye göre, daha yüksek enerji absorbe etmesine rağmen, bu tip elyaf oryantasyonuna sahip numunelerde fazla miktarda delaminasyon meydana geldiği izlenmiştir. Şekil 5.27 incelendiğinde, ani darbe kuvvetleri karşısında 0°/90° elyaf oryantasyonlu numunelerin hepsinde, delaminasyon meydana geldiği görülmektedir.



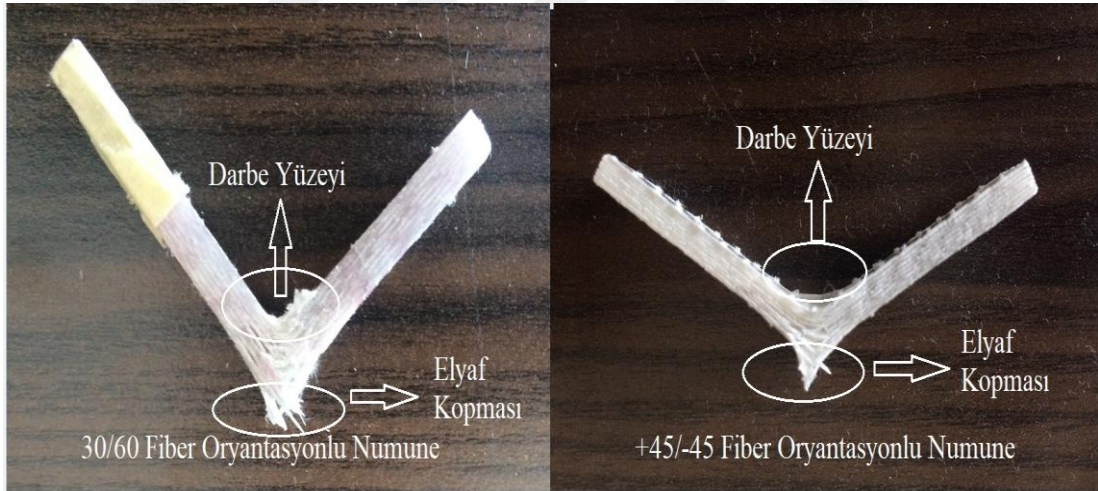
Şekil 5.26 Darbe deneyi sonrasında numunelerdeki kırılma mekanizmaları



Şekil 5.27 0°/90° elyaf oryantasyonlu numunelerdeki delaminasyonlar

Şekil 5.27’de görüldüğü gibi, $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu numunelerde farklı oryantasyonların bulunduğu katmanlar arasında ayrılma, yani delaminasyonlar meydana gelmiştir. $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde, diğer iki tip malzemeye oranla delaminasyon meydana gelmesi, tabakalar arası kayma gerilmelerine karşı rijitliğin daha düşük olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ek olarak delaminasyonların fazla olması $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde tabakalar arası matris yoğunluğunun daha fazla olduğu ve bunun sonucunda da darbe hasarı neticesinde matriste meydana gelen çatlamların malzemenin rijitliği üzerinde daha fazla etki yaptığı söylenebilir.

Şekil 5.28 incelendiğinde ise, $30^\circ/60^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ elyaf oryantasyonlu malzemelerde ise delaminasyon meydana gelmemesine rağmen darbe uygulanan yüzeyin karşı tarafında çok yüksek eğilme gerilmeleri oluşması nedeniyle matris kırılmaları ve elyaf kopmaları görülmüştür. Ayrıca darbenin geldiği yüzey tarafında ise elyafların eğilmiş olduğu fakat kopmanın olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.28 $30^\circ/60^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonlu numunelerdeki elyaf kopmaları

Yapılan darbe deneyi sonucunda numunelerin absorbe ettiği enerji miktarları incelendiğinde, en çok enerji absorbe eden numunenin $0^\circ/90^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip numuneler olduğu belirlenmiştir. Fakat kompozit malzemelerin darbe davranışının gözlemlenebilmesi için sadece absorbe ettiği enerji ile sınırlı kalmayıp, meydana gelen hasar mekanizmalarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bu durumda darbe deneyi sonrası meydana gelen hasar mekanizmalarının incelenmesi sonucunda darbe yüklemeleri karşısında en kötü performans gösteren numunelerin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde olduğu belirlenmiştir.

Eğilme deneyinin yapılmasını müteakip numuneler üzerinde yapılan görsel inceleme sonucunda bütün numunelerin tam olarak iki parçaya ayrılmadığı ve eğilip kaldığı görülmüştür. $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu numunelerde elyaf kopmaları ve matris çatlaklarının hem eğilmenin uygulandığı yüzeyde hem de diğer yüzeyde meydana geldiği, $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu numunelerde eğilmenin uygulandığı yüzeyde elyafların eğildiği, diğer yüzeyde ise kopmalar meydana geldiği, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu numunelerde ise her iki yüzeyde de elyaf kopması meydana gelmediği, elyaflarda sadece eğilmenin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.29 $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri



Şekil 5.30 30°/60° oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri



Şekil 5.31 $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu numunelerin eğilme deneyi sonrası görüntüleri

Eğilme deneyinden çıkan numuneler incelendiğinde genel olarak tüm malzemelerin eğilme zorlanması karşısında plastik şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek olduğu görülmüştür. Ek olarak $0^\circ/90^\circ$ ve $30^\circ/60^\circ$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde oluşan çekme, basma ve tabakalar arası kayma gerilmeleri nedeniyle eğilme zorlamasının uygulandığı yüzey tarafında delaminasyona rastlanmıştır. $+45^\circ/45^\circ$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde ise söz konusu gerilmeler altında elyaf kırılması ve delaminasyon görülmemesine rağmen, eğilme zorlaması uygulanan yüzey tarafında en üst tabakanın ayrılmaya meyilli olduğu görülmüştür (Şekil 5.32).



Şekil 5.32 $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu numunelerde meydana gelen üst tabaka ayrılması

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Yapılan tez çalışması kapsamında, rüzgar türbin kanatlarında kullanmak amacıyla vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş, polyester ve vinilester reçinelerin ağırlıkça eşit oranda hibrit olarak kullanıldığı ve seçilen elyaf oryantasyonları ile cam elyaf kullanılarak takviye edilmiş polimer esaslı kompozit malzemeler ile yapılan mekanik ve fiziksel deneyler ile elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Çekme deneyleri sonucunda, en yüksek mukavemet değerlerine $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozit malzemeler ile ulaşılmış olup, en düşük mukavemet değerlerine sahip malzemelerin ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu görülmüştür. Elde edilen çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, kanadın en çok gerilme oluşan kök bölgesi için en emniyetli çalışabilecek malzemenin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozit olduğu, $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyona sahip kompozitin emniyetli tasarım kriterlerine uyduğu, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin ise en yüksek gerilme değerine ulaşılan kanadın kök bölgesi için emniyetli tasarım kriterlerine uymadığı belirlenmiştir.
2. Darbe deneyleri sonucunda, kompozitlerin absorbe ettiği darbe enerjisi açısından en yüksek enerji absorbe oranı $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerde görülmüş, $30^{\circ}/60^{\circ}$ ve $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitlerin absorbe ettiği darbe enerjisinin birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Kompozitlerin absorbe ettiği darbe enerjisi açısından en iyi darbe dayanımına sahip kompozitin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu görülmüş olmasına rağmen, numunelerin darbe deneyi sonrası kırılma mekanizmalarının incelenmesi neticesinde $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitlerde çok fazla delaminasyon meydana

geldiği görülmüştür. Bu nedenle çalışmada kullanılan malzemeler içerisinde en kötü darbe direncine sahip kompozitin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu anlaşılmıştır.

3. Eğilme deneyleri sonucunda, çalışmada kullanılan kompozit malzemeler içerisinde en yüksek eğilme dayanımına sahip malzemelerin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu, en düşük eğilme dayanımına sahip malzemelerin ise $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler olduğu görülmüştür. Rüzgar türbin kanatlarının mekanik açıdan en çok maruz kaldığı zorlama tipinin eğilme zorlanmaları olduğu düşünüldüğünde, kanatların eğilme zorlanmaları altında en emniyetli çalışabilecek yapıda olmasının, $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler ile sağlanabileceği görülmüştür.
4. Sertlik deneyleri sonucunda, oda sıcaklığında elde edilen sertlik değerlerine göre üç farklı elyaf oryantasyonuna sahip numunelerin sertlik değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmüş, en yüksek sertlik değerine sahip malzemenin $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu belirlenmiştir. Böylece polimer esaslı kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarındaki oryantasyon açılarındaki farklılıkların, kompozitin sertlik değerine etkisinin çok az olduğu anlaşılmıştır. Kompozitlerde kullanılan hibrit matris elemanının özelliklerine bağlı olarak sıcaklık değişimleri karşısındaki sertlik değerleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile kompozitin sertliğinde azalma görülmüş olmasına rağmen söz konusu matris elemanının sertlik değerlerinin sıcaklık değişimi karşısındaki kararlılık özelliklerinin türbin kanatları için yeterli seviyede olduğu düşünülmektedir.
5. Su absorpsiyon deneyleri sonucunda, kompozitlerin % ağırlık ve hacimsel artış değerlerine bağlı olarak en düşük su absorpsiyon oranına sahip kompozitlerin $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonlu kompozitler olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, bir kanadının ağırlığı 2100 kg olan rüzgar türbin için çalışmada kullanılan tüm kompozit malzemelerin su absorpsiyon oranına göre yaklaşık ağırlık artışı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama göre tez

çalışması kapsamında seçilen tüm kompozit malzemelerin su absorpsiyon oranlarına göre, kanatta meydana gelecek muhtemel ağırlık artışının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

6. Tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneyler ve analizlere göre, rüzgar türbin kanatlarında kullanılmak üzere mekanik ve fiziksel özellikler açısından seçilebilecek en uygun polimer esaslı kompozit malzemenin, mekanik (darbe direnci hariç) ve fiziksel özellikler açısından $0^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler, darbe dayanımı açısından ise $30^{\circ}/60^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler olduğu görülmüştür. Bu durumda rüzgar türbin kanatları için üretilecek kompozit malzemelerde en optimum elyaf oryantasyonu, en yüksek mekanik dayanım özelliklerinin elde edilmesi açısından kanadı oluşturan kompozit malzemenin iç tabakalarında $0^{\circ}/90^{\circ}$ olarak seçilmeli, en yüksek darbe direncinin elde edilmesi açısından en dış tabakalarda ise $30^{\circ}/60^{\circ}$ olarak seçilerek istifleme yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Mishnaevsky Jr., L. (2017, Ağustos 3). *Composites In Wind Turbines*. https://tr.scribd.com/:_https://tr.scribd.com/document/203373839/Composites-in-Wind-Turbines adresinden alındı.
- [2] Mutkule, S., Gorad, P., Raut, S., & Nikam, A. (2015, Şubat 2). International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). *Optimum and Reliable Material for Wind Turbine*, s. 624-627.
- [3] Özdil Kaçan, Y., 2014. Derecelenmiş Kompozit Malzemeden Rüzgar Türbin Kanadı Tasarımı Ve Teknik Bilgi Paketi Hazırlanması. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [4] Senthilkumar, K., Siva, I., Winowlin Jappes, J., Amico, S., Cardona, F., Sultan, M. (2016). Effect of inter-laminar fibre orientation on the tensile properties of sisal fibre reinforced polyester composites. *Materials Science and Engineering*, 152.
- [5] Mészáros, L., Turcsán, T. (2014). Development and mechanical properties of carbon fibre reinforced EP/VE hybrid composite systems. *Periodica Polytechnica*, 127-133.
- [6] Uysal, A., 2008. Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [7] Steigmann, R., Savin, A., Goanta, V., Barsanescu, P., Leitoiu, B., Iftimie, N., Stanciu M., Curtu, I. (2016). Determination of mechanical properties of some glass fiber reinforced plastics suitable to Wind Turbine Blade construction. *7th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering* (s. 1-6). IOP Publishing.
- [8] Sevim, C. 2009., Rüzgar Türbin Kanatları İçin Alternatif Polimerik Yapıların Karakterizasyonu. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- [9] Amico, S., Angrizani, C., Drummond, M. L. (2010). Influence of the Stacking Sequence on the Mechanical Properties of Glass/Sisal Hybrid Composites. *Reinforced Plastics And Composites*, 179-188.
- [10] Manjunatha, S. C., Venkate Gowda, C., Banakar, P. (2015). Analysis Of Angel Ply Laminated Composite And Validation. *International Journal Of Advances In Production And Mechanical Engineering (Ijapme)*, 70-74.

- [11] Daban, Y. 2016. Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
- [12] Paiva Ju'nior, C. Z., de Carvalho, L. H., Fonseca, V. M., Monteiro, S. N., d'Almeida, J. M. (2004). Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie cotton fabric composites. *Polymer Testing*, 131-135.
- [13] Yılmaz İşman, N., 2010. Polyester Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe Ve Eğilme Davranışlarının İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- [14] Verma, C. S., Chariar, V. M. (2011). Development of layered laminate bamboo composite and their mechanical properties. *Composites*, 1063-1069.
- [15] Türkmen, İ., Köksal, S., (2013). Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin Ve Darbe Dayanımının İncelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17-30.
- [16] Chavan, V. R., Dinesh, K. R., Veeresh, K., Algur, V., Jagadish, S. P., Madhu Mohan, C. (2015). Evaluating The Influence Of Fiber Orientation And Filler Content On Tensile, Hardness, And Impact Strength Of Hybrid Laminated Composites. *International Journal Of Research In Aeronautical And Mechanical Engineering*, 25-31.
- [17] Puttaswamaiah, S., Mirsafiulla, Maruthi, B. H., Sridhar, Harish, B. (2016). Mechanical Characterization Of Different Orientation Of Glass Fibre Reinforced Polyester Matrix Composite. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 444-453.
- [18] Guru Raja, M. N., Hari Rao, A. N. (2013). Effect of an Angle-Ply Orientation on Tensile Properties of Kevlar/glass Hybrid Composites. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*, 63-67.
- [19] Aeyzarq Muhammad Hadzreel, M. R., Siti Rabiattul Aisha, I. (2013). Effect Of Reinforcement Alignment On The Properties Of Polymer Matrix Composite. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 548-554.
- [20] GuruRaja, M. N., HariRao, A. N. (2013). Influence of Angle Ply Orientation on Tensile Properties of Carbon/Glass Hybrid Composite. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 231-235.
- [21] Akinoğlu, B. G., Ecevit, A. (1990). Construction a Quadratic Model Using Modified Angström Coefficients To Estimate Global Solar Radiation. *Solar Energy*, 89-97.

- [22] Uyar, T. S., (1997). Dünya Rüzgar Enerjisinin Gelişimi ve Türkiye'de İlk Adımlar. *Elektrik Enerjisi*.
- [23] Öztura, H.Ş., 2007, Ülkemizde Elektrik Enerjisinin Bugünü ve Yarını, 6. Enerji Sempozyumu, Küreselleşmenin Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği, Ankara
- [24] Güler, Ö. (2017, Temmuz 12). *Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi*. http://www.emo.org.tr:ekler/58072be2820e868_ek.pdf adresinden alındı
- [25] Türkmen, T., 2005. Lokal Bir Rüzgar Santrali Tasarımı. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [26] Varınca, K. B., Varank, G. (2017, Temmuz 25). *Rüzgar Kaynaklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerileri*. <http://www.yildiz.edu.tr:~kvarınca/Dosyalar/Yayinlar/yayin002.pdf> adresinden alındı
- [27] Özgener, Ö., (2002). Türkiye'de ve Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kullanımı. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 159-173.
- [28] www.gwec.net web adresinden 20 Eylül 2017'de edinilmiştir.
- [29] Uğuz, S., 2005. Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretimi. Gazi Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [30] Yerebakan, 2001, İstanbul Ticaret Odası Yayınları
- [31] Celayir, N., 2008. Rüzgar Enerjisinin Dünya'daki Gelişimi ve Türkiye'deki Potansiyeli. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [32] (2016). *Türkiye İletim Sistemi Bağlantı Kapasitesi Raporu*. TEİAŞ.
- [33] Dursun, B., 2006. Dikey Eksenli Bir Darrieus Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- [34] Durak, M., Özer, S., 2008. Rüzgar Enerjisi Teori ve Uygulama, Impress-Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara, 198
- [35] ÇOLAK, İ., Demirtaş, M. (2008). Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye'deki Gelişimi. *Tünav Bilim Dergisi*, 55-62.
- [36] Kaya, K., Koç, E. (2015). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı Ve Üretim Esasları. *Mühendis ve Makina*, 38-48.

- [37] Suresh Babu, K., Subba Raju, N. V., Srinivasa Reddy, M., Nageswara Rao, D. (2016). The Material Selection For Typical Wind Turbine Blades Using A Madm Approach And Analysis Of Blades. *MCDM*, 19-23.
- [38] Akbıyık, B., 2004. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale.
- [39] Nayar, C. V., Islam, S. M., Sharma, H., (2001). Power Electronics For Renewable Energy Sources. *Academic Press Series in Engineering*. 562-571.
- [40] http://www.symscape.com/blog/vertical_axis_wind_turbine web sitesinden 31 Ekim 2017 tarihinde edinilmiştir.
- [41] Nogay, S., Taşkın S., 2001. Rüzgar Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi. 137-144.
- [42] Koç, E., Kaya, K., 2015. Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları-Teorik Model. 3. İzmir Rüzgar Sempozyumu, İzmir. 1-18
- [43] Emniyetli, G., 2007. Eysel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- [44] Billur , E., Çevik, E., Parnas, L., Balya, B., Şenel , F. (2017, Ekim 31). *Rüzgar Türbinleri Rotor Kanatlarının Üretimi ve Belgelendirilmesi*. <http://www.emo.org.tr>: http://www.emo.org.tr/ekler/3cc6ae3442e3eb2_ek.pdf adresinden alındı
- [45] Signor, A, W., Vanlandingham, M.R. ve Chin, J.W., 2003, Effects of Ultraviolet Radiation Exposure on Vinly Ester Matrix Resins: Characterization of Chemical, Physical and Mechanical Damage, *Polimer Degradation and Stability*, 79: 359-368
- [46] Rashedi, A., Sridhar, I., Tseng, K. J. (2012). Multi-objective Material Selection For Wind Turbine Blade and Tower:Ashby’s Approach. *Materials and Design*, 521-532.
- [47] Monroy Aceves, C., Sutcliffe, M. P., Ashby, M. F., Skordos, A. A., Rodríguez Román, C. (2012). Design methodology for composite structures: A small low air-speed wind turbine blade case study. *Materials and Design*, 296-305.
- [48] Mallick, P. K. (2007). *Fiber Reinforced Composites-Material, Manufacturing and Design* . Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [49] Durgun, İ. (2017, Ekim 4). *Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi*. https://www.researchgate.net/profile/Ismail_Durgun2/publication/279981900_PRODUCTION_OF_CARBON_WITH_VACUUM_INFUSION_METHO

D/links/55a1954808aea815dff0794.pdf?origin=publication_detail adresinden alındı

- [50] Genç, Ç., Arıcı. A.A., 2008, Yat İmalatında Kullanılan CTP Malzeme ve İmalat Yöntemleri Bölüm III: Infüzyon Yöntemi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, Sayı: 178, 16-21
- [51] Yurttaş, Ç., Afşar, E., 2000, CTP Teknolojisi, *Cam Elyaf*, 8-44.
- [52] Genç, Ç., 2006. Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
- [53] Karabağ, S., 2011. Rüzgar Türbin Kanadı İmalatı. İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi. İzmir. 1-17.
- [54] www.compositesworld.com/articles/wind-blades-progress-and-challenges web adresinden 29 Eylül 2017’de edinilmiştir.
- [55] <https://sites.google.com/site/metropolitanforensics/emerging-risks-voc-off-gassing-of-composite-products-such-as-wind-turbines-inhalation-of-styrene-vapors-during-the-manufacture-of-wind-turbine-blades> web adresinden 18 Ekim 2017’de edinilmiştir.
- [56] <http://www.aerox.es/> web adresinden 22 Ekim 2017’de edinilmiştir.
- [57] <http://www.scottbader.com/news/10/1m-wind-power-implement-scott-bader-low-styrene-emission-gelcoat> web adresinden 4 Mayıs 2017’de edinilmiştir.
- [58] <http://www.sisecamkimyasallar.com/sites/catalogs/tr/Documents/buss-seg/Cam-Elyaf/tek-uclu-fitil/sisecam-WR6.pdf> web adresinden 17 Mayıs 2017’de edinilmiştir.
- [59] <http://nptel.ac.in/courses/112107085/20> web adresinden 10 Mayıs 2017’de edinilmiştir.
- [60] Matthews, B. (2017, Haziran 15). *Applied Stress Analysis Section IX (Composite Materials)*. <http://www.structsource.com/pdf/composite.pdf> adresinden alındı
- [61] <http://nptel.ac.in/courses/112107085/21> web adresinden 20 Haziran 2017’de edinilmiştir.
- [62] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Material Science and Engineering*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd.Şti.
- [63] Özsoy, N., 2015. Polimer Esaslı Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.

- [64] <http://cevotec.com/en/technologie-prozess/> web adresinden 20 Şubat 2017'de edinilmiştir.
- [65] Saçak, M. (2005). *Polimer Teknolojisi*. Ankara": Gazi Kitapevi .
- [66] <http://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/resin-comparison/> web adresinden 17 Mart 2017'de edinilmiştir.
- [67] <https://www.boytek.com.tr/polyester-recineleri-urun/> web adresinden 20 Nisan 2017' de edinilmiştir.
- [68] <https://www.boytek.com.tr/vinil-ester-recineleri/> web adresinden 20 Nisan 2017' de edinilmiştir.



ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Giresun'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Giresun'da tamamladı. 2003 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2009 yılında mezun oldu ve 2010 yılında Girsan Makine ve Hafif Silah Sanayi Tic. A.Ş.'de Makine Mühendisi olarak görevine başladı. 2015 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamış olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.