



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEK YÖNLÜ HİBRİT CTP/AL TABAKALI
KOMPOZİTLERİN FARKLI R-ORANLARI
İÇİN YORULMA ÖMRÜNÜNBELİRLENMESİ**

Fırat AYDIN

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Mayıs-2018
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Fırat AYDIN tarafından hazırlanan “Tek Yönlü Hibrit CTP/Al Tabakalı Kompozitlerin Farklı R-Oranları İçin Yorulma Ömrünün Belirlenmesi” adlı tez çalışması 11/05/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Hamit ADİN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DENİZ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

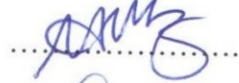
Üye

Unvanı Adı SOYADI

Üye

Unvanı Adı SOYADI

İmza



.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Bahattin İŞCAN
FBE Müdürü



Bu tez çalışması BAP tarafından BTÜBAP-2017-Yüksek Lisans-8 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Fırat AYDIN

Tarih:11.05.2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

TEK YÖNLÜ HİBRİT CTP/AL TABAKALI KOMPOZİTLERİN FARKLI R-ORANLARI İÇİN YORULMA ÖMRÜNÜN BELİRLENMESİ

Fırat AYDIN

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DENİZ

2018, 77 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DENİZ

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Doç. Dr. Hamit ADİN

Uçak ve uzay endüstrisinde meydana gelen gelişmeler yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyaçları karşılamak için kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle elyaf takviyeli kompozitlerin imalatı ve endüstriyel alanda kullanımları oldukça artmıştır. Elyaf takviyeli kompozitler içerisinde, satış miktarları ve tüketim oranları göz önüne alındığında en çok tercih edilen elyaf türü cam elyafıdır. Bu tez çalışmasında, hibrit şeklinde cam elyaf takviyeli plastik/alüminyum (CTP/Al) tabakalı kompozit plaklar üretilmiş ve bu plaklardan test numuneleri hazırlanmıştır. Yorulma testlerinden önce statik testler yapılmış olup, yorulma için gerekli olan yük değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu yük değerlerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece CTP/Al tabakalı kompozitlerin yorulma ömrü belirlenmiştir. Farklı elyaf oryantasyonları ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) ve yükleme oranları ($R = 0,3; 0,1$ ve $-0,1$) için CTP/Al tabakalı kompozitlerin yorulma ömürleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar $R = 0,3$ yükleme oranında numunelerin lif dizilim yönünde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğunu ve yükleme oranı azaldıkça numunelerin yorulma ömürlerinin de azaldığını göstermektedir. Ayrıca yükleme oranı değişimleri sonucu malzemelerin oryantasyon açıları dizisinden bağımsız yorulma ömrü gösterdiği sonucuna da varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam-Elyaf Takviyeli Plastik (CTP), Oryantasyon Açısı, Tabakalı Hibrit Kompozit, Yorulma ömrü

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF FATIGUE LIFE FOR DIFFERENT R-RATIOS OF THE OFF-AXIS UNIDIRECTIONAL HYBRID GFRP/AL COMPOSITE LAMINATES

Fırat AYDIN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Emin DENİZ
2018, 77 Pages**

**Jury
Asst. Prof. Dr. Mehmet Emin DENİZ
Asst. Prof. Dr. Gurbet ÖRÇEN
Assoc. Prof. Dr. Hamit ADİN**

The developments that took place in the aircraft and space industry reveal the need for new and superior materials. Composite materials have begun to be used to meet these needs. In particular, the use of fiber reinforced composites in manufacturing and industrial field has increased considerably. Fiber-reinforced composites are the most preferred type of fiberglass when considering the sales quantities and consumption rates. In this thesis, composite plates of glass fiber reinforced plastic / aluminum (GFRP/Al) layers were produced in hybrid form and test specimens were prepared from these plates. Before the fatigue tests, static tests were performed so that the load values required for fatigue were determined. Fatigue tests were then carried out at these load values. Thus, fatigue life of GFRP/Al based layered composites was determined. The fatigue lives of GFRP/Al layer composites were determined for different fiber orientations ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) and loading ratios ($R = 0,3; 0,1$ and $-0,1$) the results are compared with each other. The results show that the samples have the highest fatigue life in the fiber orientation direction at $R = 0,3$ loading rate and the fatigue lives of the samples decrease as the loading rate decreases. In addition, loading rate changes have also resulted in fatigue life of the end resultant materials independent of the orientation sequence.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP), Fiber Orientation, Hybrid Laminated Composite, Fatigue life

ÖNSÖZ

Tek Yönlü Hibrit CTP/Al Tabakalı Kompozitlerin Farklı R-Oranları İçin Yorulma Ömrünün Belirlenmesi başlıklı tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Kompozit malzeme tanımı yapıp, CTP/Al tabakalı kompozitler üzerine yapılmış geçmiş çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde tek yönlü hibrit CTP/Al tabaka (GLARE-2/3) imalatında kullanılan alüminyum, epoksi reçine ve kompozit malzemelerde yorulma olayı üzerine detaylı açıklamalar yapılmıştır. Üçüncü bölümde Glare-2-3/2 numunesinin imalat standartlarından bahsedilip numunelere uygulanan testlerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise testler sonucunda elde edilen verilerin S-N diyagramları çizilip yükleme oranının yorulma ömrü üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. Beşinci bölümde ise genel sonuçlar verilmiştir.

Yorulma testleri uzun soluklu ve yüksek sabır gerektiren testlerdir. Bu nedenle testler sırasında bir sürü aksilik yaşanmaktadır. Yaşadığım bu aksiliklerde gece gündüz demeden bana yol gösteren, ilgisini ve bilgisini eksik etmeyen çok değerli hocam Doktor Öğr. Üyesi Mehmet Emin DENİZ' e, tez sürecimde manevi desteklerini eksik etmeyen aileme, her zaman başarılı olacağıma inanan merhum babam Av. Zekeriya AYDIN' a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Fırat AYDIN

BATMAN-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLoların LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Malzeme.....	4
2.2. Alüminyum	5
2.2.1. Alüminyum alaşımları ve alaşımların sınıflandırılması.....	6
2.2.2. Alüminyumda korozyon	9
2.3. Kompozit Malzeme.....	11
2.3.1. Kompozit malzemenin tanımı.....	11
2.3.2. Kompozit malzemelerin gruplandırılması	14
2.3.2.1. Matris malzemeleri	14
2.3.2.2. Takviye malzemeleri.....	16
2.3. Cam Elyaf Takviyeli Plastikler (CTP).....	21
2.3.1. CTP' nin özellikleri	22
2.3.1.1. Reçineler	22
2.3.1.2. Cam elyaf.....	23
2.3.1.3. Liflerin mekanik özellikleri	27
2.3.2. CTP üretim yöntemleri	28
2.3.2.1. Açık kalıplama teknikleri.....	28
2.3.2.2. Kapalı kalıplama teknikleri.....	32
2.4. Hibrit Kompozitler.....	35
2.5. Prepreg	37
2.5.1. Sıcak presleme	39
2.5. Yorulma	40
2.5.1. Yorulma olayı	41
2.5.2. Yorulmaya etki eden faktörler	41
2.5.2.1. Fiber tipinin yorulma üzerine etkisi.....	42
2.5.2.2. Matrisin yorulma üzerinde etkisi	42
2.5.2.3. Tabaka ayrılması (Delaminasyon) etkisi	43
2.5.3. Yorulma hasarı oluşumu	45
2.5.4. Yorulma deneyi.....	48

2.5.5. Yorulma mukavemetine ortalama gerilme etkisi.....	51
2.5.6. Yorulma ömrü hesaplama	52
2.5.6.1. Wöhler S-N eğrisi	53
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	55
3.1. Malzemeler ve Numuneler.....	55
3.1.1. Statik çekme testi	57
3.1.2. Yorulma (Dinamik) testi.....	60
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	63
4.1. Yükleme Oranlarına Bağlı S-N İlişkisi.....	63
4.2. Yükleme Oranının Etkisi	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
5.1 Sonuçlar	71
5.2 Öneriler	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil

Şekil 2.1. Boksit.....	5
Şekil 2.2. Alüminyum alaşımlarında oluşan oyuk korozyonu	10
Şekil 2.3. Alüminyum Pourbraix diyagramı	10
Şekil 2.4. Geleneksel malzemelerle kompozit malzemelerin karşılaştırılması	11
Şekil 2.5. Kompozitlerin gruplandırılması	14
Şekil 2.6 a) Lif ve b) Tanecik takviyeli kompozit iç yapısı.....	17
Şekil 2.7. Lif ve dokuma takviyeli kompozitlerde liflerin kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler (a) Kesikli rastgele, (b) Sürekli tek yönlü, (c) Sürekli düzlemsel iki yönlü, (d) Sürekli düzlemsel üç yönlü, (e) Üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğu yönleri gösterir.).....	18
Şekil 2.8. Karbon elyafla üretilmiş kumaş.....	19
Şekil 2.9. Aramid elyafla üretilmiş kumaş.....	20
Şekil 2.10. Cam elyafla üretilmiş kumaş	20
Şekil 2.11. Cam eritme.....	26
Şekil 2.12. Cam elyaf oluşturma prosesi	27
Şekil 2.13. Fiber oryantasyon açısı	27
Şekil 2.14. El yatırması prosesi aşamaları	29
Şekil 2.15. Püskürtme yöntemi	30
Şekil 2.16. Elyaf sarım proses düzeneği	31
Şekil 2.17. Profil çekme yöntemi düzeneği	33
Şekil 2.18. RTM ile kompozit parça üretim yöntemi adımları	34
Şekil 2.19. Hibrit (Karma) kompozit	36
Şekil 2.20. Bir Prepreg üretim prosesinin şematik gösterimi	37

Şekil 2.21. Prepreg çeşitleri, a) Tek yönlü Prepreg, b) Örgü prepreg.....	38
Şekil 2.22. Sıcak presleme sistemi.....	39
Şekil 2.23. Fiber tipinin yorulma üstünde etkisi	42
Şekil 2.24. Farklı tür matris içeren E-cam takviyeli fiber kompozitlerin matrise bağlı özellikleri	43
Şekil 2.25. Kompozit malzemede başlangıç delaminasyonu.....	43
Şekil 2.26. İnterlayer ve İntralayer delaminasyon	44
Şekil 2.27. İntralayer delaminasyon	44
Şekil 2.28. Kompozit malzemeler ve metal gibi homojen malzemeler için yorulma ömrü boyunca oluşan hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca oluşan hasar tipleri	46
Şekil 2.29. Kompozit malzemelerde yorulma hasar şekli S-N grafiği	47
Şekil 2.30. Yorulma hasar şekilleri.....	47
Şekil 2.31. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme tipleri.....	48
Şekil 2.32. Yorulma deneylerinde kullanılan çevrimsel yükleme tipleri	49
Şekil 2.33. Yorulma deneyleri için burkulma önleyici test aparatı	50
Şekil 2.34. Metal yorulması için tipik bir master diyagramı	52
Şekil 2.35. Wöhler (S-N) eğrisi	53
Şekil 2.36. Gerilme genliği- ömür eğrisi	54
Şekil 2.37. Log S- Log N eğrisi	54
Şekil 3.1. CTP/Al (Glare-2-3/2) numunesinin şematik gösterimi	55
Şekil 3.2. CTP/Al (Glare-2-3/2) numune boyutları	55
Şekil 3.3. İmalat sonrası GLARE-2-3/2 deney numunesi	56
Şekil 3.4.Çekme test cihazı.....	57
Şekil 3.5. Numunenin cihaza bağlanmış biçimi	57
Şekil 3.6. Çekme testi sonrası oryantasyon açısına bağlı kopma biçimleri.....	58
Şekil 3.7. Oryantasyon açısına bağlı kuvvet-uzama grafiği	59
Şekil 3.8. Hidrolik yorulma test cihazı	60

Şekil 3.9. Kontrol ünitesi	60
Şekil 3.10. Numunenin cihaza bağlanması	61
Şekil 3.11. Numune yüzey çatlağı	61
Şekil 3.12. Kopma olayı sonrası numune	61
Şekil 3.13. $R = 0,3$ yükleme oranı için oryantasyon açılarına bağlı kopma şekilleri	62
Şekil 3.14. $R = 0,1$ yükleme oranı için oryantasyon açılarına bağlı kopma şekilleri	62
Şekil 3.15. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin $R = 0,3$ yükleme oranındaki davranışı.....	63
Şekil 3.16. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin $R = 0,1$ yükleme oranındaki davranışı.....	64
Şekil 3.17. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin $R = -0,1$ yükleme oranındaki davranışı	65
Şekil 3.18. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$, (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$, (f) $\theta=75^\circ$, (g) $\theta=90^\circ$	67
Şekil 3.19. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$	68
Şekil 3.20. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$, (f) $\theta=75^\circ$, (g) $\theta=90^\circ$	70
Şekil 3.21. Yükleme oranlarının Al (5754)' un yorulma mukavemeti üzerine etkileri..	70

TABLolarIN LİSTESİ

Tablo 2.1. Malzeme türlerinin yapısal incelenmesi.....	4
Tablo 2.2. Dövmeye alüminyum alaşımları.....	7
Tablo 2.3. Mukavemetlendirme mekanizmalarının alüminyum alaşımlarına etkisi.....	9
Tablo 2.4. Matrislerin mekanik özellik kıyaslanması.....	14
Tablo 2.5. Takviye biçiminin özelliklere etkisi.....	28
Tablo 2.6. R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları.....	49
Tablo 3.1. Tüm oryantasyon açıları için numunelere ait statik çekme test sonuçları.....	58
Tablo 3.1. Oryantasyon açılarına bağlı yüzde azalma oranları.....	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R	Yükleme Oranı
θ	Oryantasyon Açısı
σ	Gerilme

Kısaltmalar

CTP	Cam Fiber Takviyeli Plastikler
AL	Alüminyum
GFRP	CTP
GLARE	Tek Yönlü Hibrit CTP/Al Kompozit Malzemesi
ASTM	Amerikan Test ve Numune Kurumu
UD	Unidirectional (Tek Yönlü)

1. GİRİŞ

Fiber takviyeli kompozitlerin, özgül mukavemet değerleri ve elastik modülleri oldukça yüksektir. Bu özellikler kompozit malzemelerin havacılık, uzay ve gemi sanayisinde oldukça yaygın kullanılmasına sebebiyet vermiştir. Yüksek mukavemet ve ısı dirençlerinden ötürü uzay ve hava sanayide genellikle cam fiber takviyeli kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu denli önemli sektörlerde kullanılan bu malzemeler çalışmaları esnasında tekrarlı yüklere maruz kalırlar. Kompozit malzemeler, yüklemeler sonucu oluşan hasarı bünyesinde depolar. Bu hasar genelde makroskobik hasarlar şeklinde olur. Ancak bazen kompoziti oluşturan fiber ve matrislerde makroskobik olmayan hasarlarda meydana gelmektedir. Bu nedenle kompozitlerin yorulma davranışlarının iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Kompozitlerin yorulma davranışları ile ilgili yapılan bazı çalışmalara değinecek olursak. Colombo ve Vergani yaptıkları araştırmada cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada 0° , 30° , 45° , 90° fiber oryantasyon açılarını kullanan araştırmacılar en düşük yorulma mukavemetine sahip olan numunelerin 0° oryantasyon açısına sahip numuneler olduğunu belirtmiştir [1]. M. Kawai, yükleme oranının yorulma ömrü üzerine etkilerini araştırmak için, farklı oryantasyon açılarına sahip ($Q = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90°) GLARE-2 hibrit kompozit malzemesini $R = 0,4; 0,1$ ve $-0,2$ yükleme oranlarında yorulma testlerine tabi tuttu. Test sonuçlarında yükleme oranının artmasının yorulma ömrünü artırdığını tespit etmiştir [2]. Kompozit malzemelerin daha üretken kullanılabilmesi için bu tür çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, tek yönlü E-cam takviyeli prepreg kompozit ve alüminyum alaşımı ile oluşturulan tabakalı hibrit (Glare-2-3/2) malzemelerinin oda sıcaklığında çekme-çekme, çekme-basma yorulma davranışları incelenmiştir. Glare-2-3/2 beş tabakadan oluşmaktadır. 2 tabaka E-cam/epoksi prepreg, 3 tabaka alüminyum alaşımından oluşmaktadır. E-cam/epoksi prepregler, $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ gibi farklı fiber oryantasyon açılarında üretilmiştir. Yorulma testlerinde numuneler üç farklı yükleme oranında $R = 0,3; 0,1; -0,1$ 'de sabit genlikli yüklemelere tabi tutulmuştur. Glare-2-3/2 numuneleri sıcak presleme yöntemiyle alüminyum alaşımı ve prepreg kompozit plakların üst üste yerleştirilmesiyle üretilmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan tabakalı karbon/epoksi kompozitlerin üzerine gelen düşük hızlı bir darbe sonucu öncelikle matrislerde çatlama meydana gelir daha sonra ise tabakalar arası hasar gözlenir en sonda ise yüksek hızlar için fiber kırılması meydana gelir. Oluşan bu hasar durumlar kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve dayanımlarının düşmesine sebep olur. Ayrıca delaminasyon alanları içinde tabakalarda burkulma sonucu bası yüklemelerine karşı malzeme direncinde düşme meydana gelir [3].

Hibrit kompozit malzemelerin darbe davranışları üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazılarına örnek verecek olursak; cam, karbon, aramid ya da S2-camı gibi fiber takviyeleriyle elde edilen hibrit kompozit malzemelerin, mekanik özellikleri ve hasar oluşumları araştırılmıştır [4].

Sayer, yaptığı testlerde $(0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ)_s$ takviye açısına sahip aramid-cam ve aramid-karbon hibrit kompozitlerin delinme sınır değerinin $(0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ)_s$ takviye açısındaki aramid-cam ve aramid-karbon hibrit kompozitlerin delinme sınır değerlerine göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Oda sıcaklığında olduğu bu sonuçların farklı sıcaklıklarda gösterdiği değerleri incelemek için de -20°C ve 60°C ' deki delinme sınır değerlerinin daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Bu sonuçlara göre kompozit malzemeler oda sıcaklığından farklı sıcaklıklarda ve oda sıcaklığına göre daha gevrek özellikler gösterdiğini göstermektedir [5].

Laliberte ve arkadaşları metal takviyeli hibrit olarak hazırlanmış tabakalı kompozitlerde darbe sonrası hasar ilerlemesini araştırmışlardır. Darbe sonrası çekme yükü ile yapılan yorulma testleri birkaç değişik cam takviyeli alüminyum tabaka için yapılmıştır. Yorulma deneyleri nihai hasar oluşuncaya kadar uygulanmış ve bu hasarların çatlaklar şeklinde numunelerin kenarlarında meydana geldiği tespit etmişlerdir [6].

Liang ve arkadaşları keten/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerin yorulma davranışlarını kıyaslayacak bir çalışma yapmışlardır. Numuneler $[0/90]_{3s}$ ve $[\pm 45]_{3s}$ gibi iki farklı oryantasyonda ve aynı fiber oranında hazırlanarak çekme-çekme yorulma yüküne maruz bırakılmışlardır. Her iki malzeme türü için (S-N) yorulma grafikleri çizilmiştir ve cam/epoksi malzemenin keten/epoksi malzemeden daha uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir [7].

Tai ve arkadaşları darbe öncesi ve sonrası quasi-izotropik karbon/epoksi kompozitlerin çekme-basma yorulma yükü altındaki davranışına numune kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Darbe sonrası çekme yorulma yükü altında numune kalınlığının küçülmesiyle daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca kalın numunelerde darbe yükünün malzemenin yorulma ömrünü %21 oranında düşürdüğünü belirtmişlerdir [8].

Bezazi ve arkadaşları $[\pm 20]_{2s}$ ve $[\pm 25]_{2s}$ iki farklı oryantasyon açısı ile tabakalanmış T300/914 auxetic karbon/epoksi kompozitlerin hem statik hem de dinamik (yorulma) yüklemeleri altında oryantasyon açılarının etkisini araştırmışlardır. Testler 3-nokta eğme olarak yapılmıştır. Araştırmacılar, testlerden tabakalardaki oryantasyon açısının değiştirilmesi ile malzeme rijitliğinin ve maksimum yorulma dayanımının düştüğünü tespit etmişlerdir [9].

Karabeyoğlu, polimer esaslı kompozit malzemelerin eksenel yüklemeler altında özelliklerini incelemiştir. Polimer esaslı kompozit malzemelere farklı oranlarda cam elyaf eklenmiş ve numune olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleriyle çekme ve darbe testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp takviye elemanının kompozit içerisindeki önemi ve mekaniksel özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda polimer esaslı kompozit malzeme içerisindeki takviye elemanı miktarı arttıkça o malzemenin mukavemet ve darbe dayanım değerleri artış göstermiş, fakat malzemenin sünekliği takviye elemanının miktarıyla ters oranda azalmıştır [10].

Bu çalışmada, yukarıda verilen literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi kompozitler uygulama alanında yorulma yüklerine maruz kalmaktadırlar. Bundan dolayı literatüre katkı sağlamak için farklı oryantasyon ve yük oranlarının kompozit plakların yorulma davranışları üzerinde davranışları incelenmiştir. Sonraki bölümler şöyle olacaktır:

- a) Test malzemesini oluşturan bileşenler hakkında bilgiler verilmiştir.
- b) Materyal ve yöntem bölümünde kompozit plaka üretimi ve numune hazırlanması bilgileri verilmiştir.
- c) Sonuçlar bölümünde her bir oryantasyon ve yük oranı için elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla verilmiştir.
- d) Tartışma bölümünde çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenerek karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Malzeme

Malzeme, gündelik ihtiyaçları karşılayan saf ya da saf olmayan, doğada kendi başına bulunan ya da insan yapımı olan her türlü maddeye denir.

Malzeme alanında en büyük atılım Amerikan bilim adamı Josiah Willard Gibbs' in 1973 yılında yayınladığı 'Maddelerin Termodinamik Özelliklerinin Geometrik Anlatım Metodu' başlıklı makalesi ile gerçekleşmiştir.

Günümüzde mevcut malzeme çeşitleri ikiye ayrılır. Bunlardan ilki Mühendislik malzemeleri, ikinci ise Doğal malzemelerdir. Tablo 2.1.'de malzeme çeşitleri detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Malzeme türlerinin yapısal incelenmesi

Malzeme	
Mühendislik Malzemeleri	Doğal Malzemeler
1. Metaller -Demir Esaslı Metaller * Çelikler * Demir Döküm - Demir Dışı Esaslı * Ağır Metaller (Bakır, Kurşun) * Hafif Metaller (Alüminyum)	1. Mineraller - Kum - Mermer
2. İnorganik Metaller - Seramikler - Cam - İnce Seramikler	2. Organik Malzemeler - Yün - Deri - Odun
3. Plastikler - Termoplastikler - Termosetplastikler - Elastomerler	
4. Yarı İletkenler - Metaller ve İnorganik Malzeme Karışımı	
5. Kompozit Malzemeler	

Tasarım gerçekleştirilirken kullanılan malzemeden aşağıdaki özellikler beklenir.

- * Gerilmelere karşı dayanıklı olması
- * Aşınma dayanımının yüksek olması
- * Sıcaklığa karşı dayanımlı olması
- * Elektrik ve ısı iletkenliklerinin malzeme ihtiyacına göre iyi ya da kötü olması
- * Üretilmesinin ve şekillendirilebilmesinin kolay olması
- * Hafif olması
- * Korozyona karşı dayanımının iyi olması
- * Fiyatının uygun olması

Tez çalışmamızın daha iyi anlaşılabilmesi için Tablo 2.1.'de de yer alan Alüminyum ve Kompozit malzemelerden aşağıda detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

2.2. Alüminyum

Hafif yapısal metallere olan ilgi teknik ve ekonomik sebeplerden ötürü giderek artmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının, yüksek ısı iletkenlik, yüksek özgül dayanım, düşük yoğunluk, elektrik direnci ve işlenebilirliklerinin çok iyi olmasından ötürü en önemli hafif metallerdendir. Alüminyum doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan metal mineralidir. Doğada % 8 oranında bulunan Alüminyum oksit, sülfat, silikat, florür hallerinde bulunur. Ama kullanılan yegâne alüminyum cevheri boksit olarak bilinen hidratlaşmış alüminyumdur.



Şekil 2.1. Boksit [11]

Alüminyum oksit ve hidroksitlerin bir karışımı olan boksitin yoğunluğu 2,5-3,5 gr/cm³’ dir. Alüminyumun özelliklerini sıralayacak olursak;

- Alüminyum doğada bol bulunur. Yer kabuğunda %15 oranında Al₂O₃ vardır.
- Kaynak, sıcak ve soğuk lehimle kolayca birleştirilebilir.
- Alüminyum ısıtıl işlem gördüğünde rengi değişmez. Bu yüzden ergime sıcaklığına gelip gelmediği kolayca anlaşılamaz. (Saf alüminyumun ergime sıcaklığı 660C’ dir.)
- Çeliğe nazaran ısıtıl iletkenliğinin yüksek olmasından ötürü ergitme kaynağı yapılacağı zaman fazla ısı vermek gerekir. Daha büyük parçalarda ise ön ısıtma uygulanır.
- Alüminyum şekillendirilmesi oldukça kolaydır. Kolayca haddelenebilir, dövülebilir, tel ve boru olarak şekillendirilebilir.
- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında bulunan koruyucu oksit tabaka malzemeyi atmosferik korozyona karşı korur.

2.2.1. Alüminyum alaşımları ve alaşımların sınıflandırılması

Alüminyum saf olarak kullanılmaktan çok alüminyum alaşım elementleri ile kullanılır.

Bu sayede;

- Malzemenin akışkanlığı arttırılarak sıcak yırtılma eğilimi azaltılır.
- Korozyon direncini, kaynak kabiliyetini ve mekanik özellikleri iyileştirilir.

Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementlerinin çok az miktarlarda da olsa ilavesi alüminyumun fiziksel özelliğinde önemli ölçüde değişikliklere sebep olur. Bu sayede saf alüminyumun mekanik özellikleri büyük oranda arttırılır.

Ürün şekillendirilmesine göre alüminyum alaşımlarının üretimi iki gruba ayrılır. Bunlar;

- Dövme alüminyum alaşımları
- Döküm alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında birçok standart mevcuttur. Bu standartlardan başlıcaları ALCOA, ASTM, DIN 1713 ve Fransız standartları olarak sıralanabilir. En çok kullanılan standart ise ‘Aluminium Association’ standardıdır. Bu standartların ortak özelliği ise alüminyum alaşımlarını ‘Dövme alüminyum alaşımları’ ve ‘Döküm alüminyum alaşımları’ olarak gruplandırmalarıdır. Tez çalışmasında kullanılan alüminyum numunesi dövme alüminyum alaşımı olduğundan sadece dövme alüminyum alaşımları hakkında bilgi verilecektir.

Dövme Alüminyum Alaşımları:

Dövme alüminyum alaşımları, plastik şekillendirme yöntemiyle mamul veya yarı mamul halinde üretilir. Bu alaşımlar plastik deformasyon kabiliyetleri oldukça iyi olduğundan kolaylıkla şekillendirilebilirler.

Alüminyum işlem alaşımlarının içeriğini gözlemlemek için en yaygın kullanılan simgeleme metodu ‘Aluminium Association’ dur. Bu simgeleme metodunda alaşımın ifadesi için 4 rakam kullanılır. Bu durum aşağıdaki tabloda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları [12]

Alaşım Serisi	Ana Element
1XXX	Alüminyum (%99.00 minimum)
2XXX	Bakır
3XXX	Manganez
4XXX	Silikon
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum – Silikon
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer Elementler
9XXX	Kullanılmayan Dizi

Simgeleri Açıklayacak olursak:

1XXX: Saf alüminyumı temsil eder. Elektrik ve kimya sanayisinde kullanılır.

2XXX: Seride kullanılan esas alaşım elementi bakırdır. Magnezyum ve diğer alaşım elementleri de bu seri içerisinde kullanılabilir. Mukavemet değerlerinin yüksek olmasından ötürü havacılık sektöründe yaygınca kullanılır.

3XXX: Esas alaşım elenti mangan olup boru ve mimari yapılar da kullanılır.(Al-Mn)

4XXX: Esas alaşım elenti silisyumdur. Korozyon direnci ve aşınma direnci yüksektir. (Al-Si) Kaynaklı yapılar da ve otomotiv sanayide parça üretimi için kullanılır.

5XXX: Tez çalışmamızda Alüminyum 5754 alaşımını kullanılmıştır. Bu nedenle 5XXX serisi hakkında detaylı bilgi verilecektir. 5XXX serisinin alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum elementinin kullanılması ile yüksek mukavemetli bir alaşım elde edilir. Bu serideki alaşımların kaynak kabiliyetleri yüksektir. Ayrıca deniz atmosferinde korozyona karşı dirençleride oldukça yüksektir. Alaşıma magnezyum elementi ilavesinde dikkatli olmak gerekmektedir. Fazla magnezyum ilavesi gerilmeli korozyon çatlamasında sebep olur. Bunu önlemek için alaşımda %3,5' in üzerinde magnezyum kullanılıyorsa bu alaşımların çalışma sıcaklıkları 65 °C aşmamalıdır.

Gerilme korozyon çatlaması, alaşıma aşırı magnezyum ilavesi sonrası alaşımda fazla bulunan magnezyum elementlerinin Mg_2Al_3 fazında çökmesi sonucu oluşur. Burada oluşan çökme tane sınırlarında bir ip şeklinde oluşur. Tane sınırında çökme oluşurken tane içinde çökme oluşmaması ya da kısmi oluşması gerilmeli korozyon hassasiyetinin artmasına sebep olur. 5000 serisi alaşımlarının kaynaklanabilme özellikleri oldukça iyidir. Gaz altı kaynağı, ark kaynağı için oldukça uygundur lar. Isıl işlem uygulandıktan sonra akma dirençleri 150-300 Mpa arasında değişirken yüzde uzama miktarları %20'e kadar çıkabilir. Bu seri içinde yüksek mukavemet dayanımı, derin çekilebilirlik ve iyi korozyon direnci özellikleri göz önüne alındığında 5754 alaşımını en çok tercih edilen alaşım çeşididir.

6XXX: Serinin esas alaşım elementleri Mg ve Si' dur. Şekillendirme özellikleri oldukça yüksektir. Mg_2Si alaşımını oluşturmak için alaşıma eklenen magnezyum ve silikonlar belirli oranlarda eklenmelidir. Fazla miktarda silikon ilavesi alaşımını kırılgan yapacaktır.

7XXX: Serinin esas alaşım elementi bakırdır. İlave olarak magnezyum, krom ve zirkonyum kullanılır. Tüm seriler içinde en yüksek mukavemete sahip olan seridir. Bu nedenle uçak parça imalatında sık kullanılır.

8XXX: Serinin esas alaşım elementi lityum' dur. Alaşımın yorulma direnci ve tokluğu oldukça iyidir. Uzay sanayide kullanılır. Maliyeti değer serilere göre daha fazladır [13].

Alüminyum alaşım elementlerinin alaşımda kullanım miktarları alüminyumun fiziksel özelliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır. Alaşımlama işlemi sonrası saf alüminyuma kıyasla mekanik özellikler büyük oranda artmaktadır. Bu artış tablo 2.3' te detaylı olarak gösterilmiştir [14].

Tablo 2.3. Mukavemetlendirme mekanizmalarının alüminyum alaşımlarına etkisi [14]

Malzeme	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	% Uzama
Saf tavlı Al (%99.999 Al)	45	17	60
Ticari saflıkta Al (% 99 Al)	90	34.5	45
Katı çözeltili sertleş. (% 12 Mn)	110	41	35
Soğuk Deformasyon (%75 saf Al)	165	152	15
Dispersiyon sertleş. (% 5 Mg)	290	152	35
Yaşlandırma (%5.6 Zn-%2.5 Mg)	572	503	11

2.2.2. Alüminyumda korozyon

Konunun anlaşılabilmesi için ilk önce terimsel kavramları açıklamak gerekmektedir. Anlatımda geçen terimleri açıklayacak olursak.

Elektronegatiflik:

Bağ oluşturmak için kullanılan elektronların bağı oluşturan atomlar tarafından çekilme gücüdür.

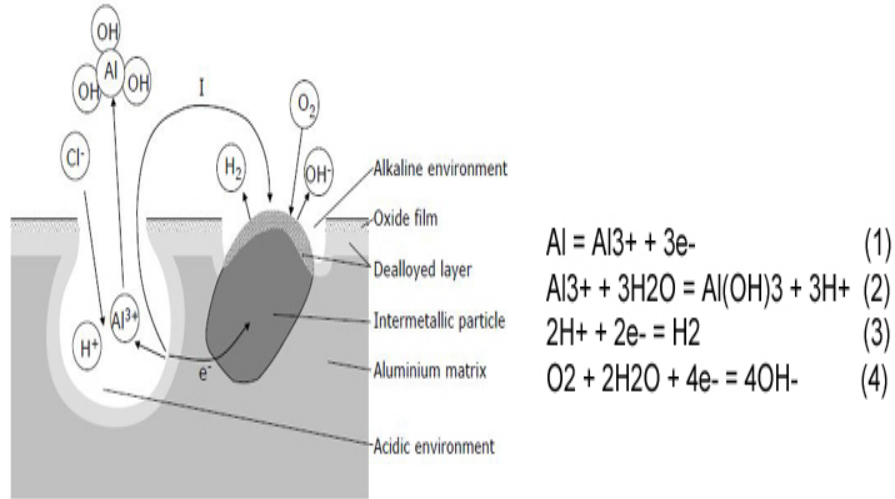
İntermetalik:

İntermetalikler; farklı elektronegatifliğe sahip elementler arasında kuvvetli kovalent veya iyonik bağlar oluşması sonucu oluşurlar.

Galvanik Korozyon:

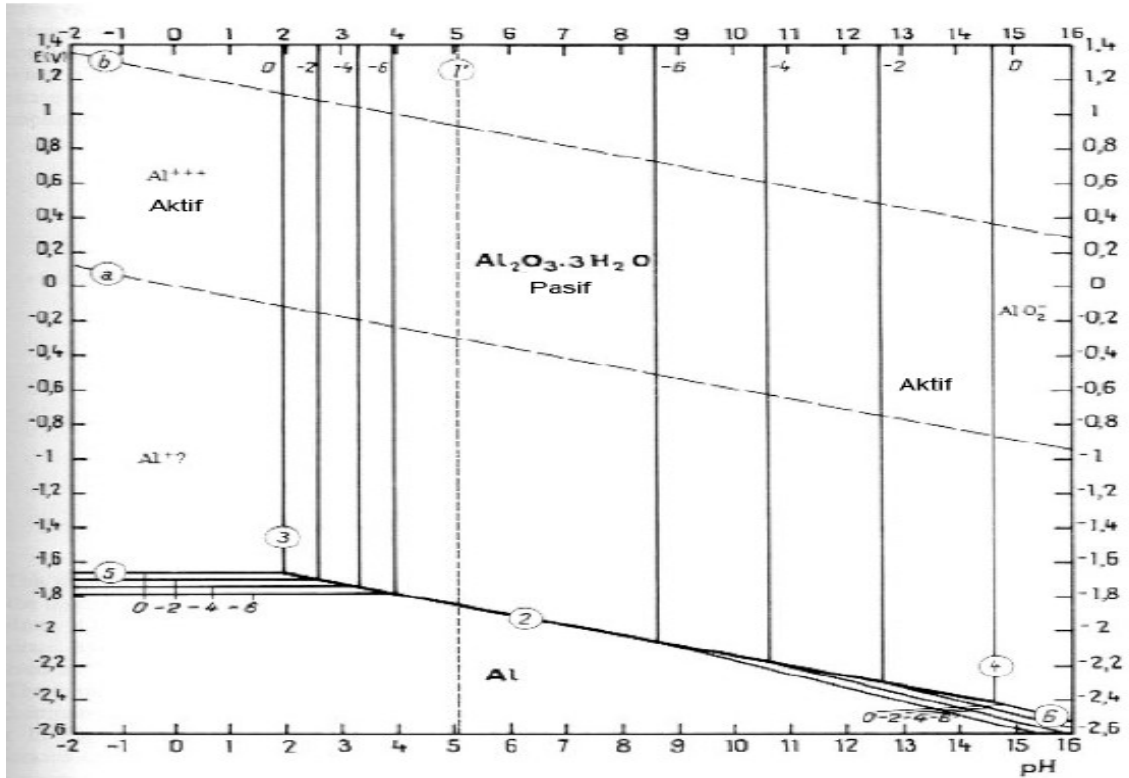
Birbirleri ile temas halinde olan farklı tür malzemelerin aynı ortamda korozyona uğramasına denir.

Saf alüminyumun korozyon direnci atmosferik ortamda pH değeri nötr iken alüminyumun yüzeyinde bulunan kararlı oksit film tabakası sayesinde mükemmel yakındır. Alaşım oluşturmak için kullanılan alüminyum alaşım elementleriyle alüminyumun oluşturduğu intermetaliklerin kendi aralarında galvanik çiftler oluşturması sonucu korozyon oluşur. İntermetalikler ayrıca yüzey oksit filmlerinde zayıf bölge oluşumuna sebep olur. Bu durum yüzey oksit filmlerinde oyuklar ve oyuk korozyonu oluşmasına neden olur.



Şekil 2.2. Alüminyum alaşımlarında oluşan oyuk korozyonu [15]

Oyuk oluştuğunda oyuğun içindeki ortamın pH değeri azalır. pH azalması ile oluşan yükü dengelemek için klor iyonlar buraya doğru akar ve oyuğun içinde hidroklorik asit oluşmasına sebep olur. Oluşan hidroklorik asit sonucu oyuk daha fazla genişler ve yayılır. Bu durum bize alüminyumun pH değerindeki değişimin nelere sebep olduğunu göstermektedir. Bu nedenle alaşım alüminyumlarının pasif oksit filmine sahip olduğu pH değerlerini anlamamız için Pourbraix diyagramından faydalanırız.



Şekil 2.3. Alüminyum Pourbraix diyagramı [16]

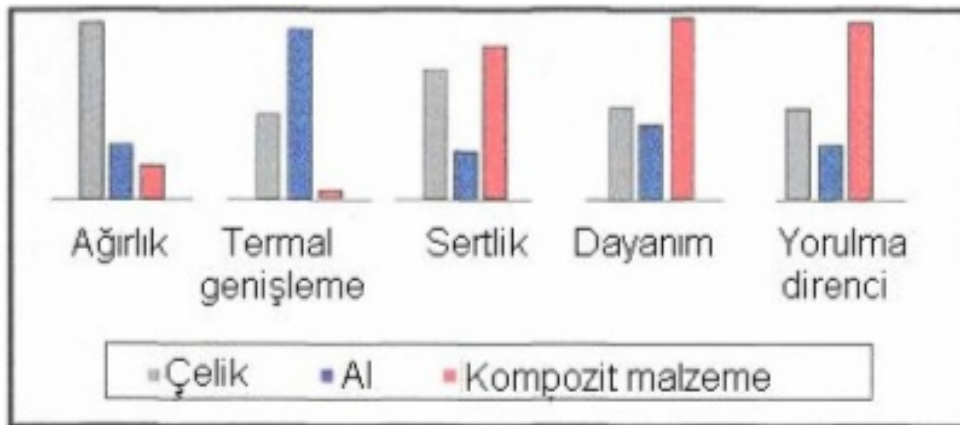
2.3. Kompozit Malzeme

2.3.1. Kompozit malzemenin tanımı

Kompozit malzeme, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen malzemelerden oluşan, aynı ya da farklı grup malzemelerin mikro veya makro seviyede bir araya gelerek oluşturdıkları, mekanik açıdan üstün özelliklere sahip malzemelerdir [17].

Kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç, II. Dünya savaşı esnasında kullanılan mevcut malzemelerin teknoloji karşısında yeterli ihtiyaçları karşılamamasından ötürü gittikçe artmaktadır. II. Dünya savaşından bu yana malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Elde edilecek malzemenin yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranlarına sahip olmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda elde edilen malzemeler kompozit malzeme veya çok fazlı malzeme olarak adlandırıldılar.

II. Dünya Savaşı sonrasında havacılık sektöründe meydana gelen gelişmeler doğrultusunda malzemeye olan ihtiyacın türü de değişmeye başlamıştır. İmal edilecek malzemelerin çok yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasının istenmesi klasik malzemelerin yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu ihtiyaçları gidermek için kompozit malzeme imalatlarına hız verilmiştir. Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere kompozitler; geleneksel malzemelere kıyasla yüksek mukavemet/ağırlık oranının yanı sıra düşük termal genişleme ile yüksek sertlik ve yorulma direncine sahiptir. Uygun takviye ve matris malzemelerinin; farklı oranlarda birleştirilme yeteneğine sahip olması ve aynı zamanda çeşitliliğinden dolayı, kompozitlerin elastik modülü, dayanıklılık ve sertlik gibi değerlerinin geniş aralıkta yer almasına neden olur. Geleneksel malzemelere karşı, kompozit malzemelerin istenilen yönde istenilen özelliklerde tasarlanabilmeleri kompozit kullanımının artmasına bir başka neden olarak gösterilebilir [18].



Şekil 2.4. Geleneksel malzemeler ile kompozit malzemelerin karşılaştırılması [18]

Kompozit Malzemenin Avantajları:

Kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük olması kompozit malzemenin hafif konstrüksiyonlarda kullanılmasında tercih sebebi olmuştur. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona karşı dayanımlı olmaları ve ısı, elektrik, ses yalıtımı sağlamaları tercih sebebi olmalarını sağlamıştır.

Kompozit malzemelerde şu tür avantajlar görülmektedir:

- Yüksek Mukavemet: Metalik malzemelere kıyasla kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemet değerleri oldukça yüksektir. Kompozit malzemenin kalıplama özelliği ile istenen yönde ve bölgede kullanılabilmesi malzeme tasarrufu ve maliyetini olumlu etkiler.

- Hafiflik: Kompozit malzemeler birim alan ağırlığı göz önüne alındığında metaller ve plastiklere nazaran daha yüksek mukavemet gösterirler.

- Elektriksel Özellikler: Kompozit malzemeler seçilecek uygun malzemelerle yüksek elektriksel özelliklere sahip olabilirler. İletkenlik istenilen yerlerde iyi bir iletken, yalıtkanlık istenilen yerlerde iyi bir yalıtkan olabilirler.

- Korozyon ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozit malzemeler, korozyona ve kimyasal reaksiyonlara karşı dayanımlıdır. Bu da kompozitlerin korozyon ve kimyasal etkilerden ötürü deformasyona uğraması istenmeyen parçalarda kullanılmasını sağlar. Örneğin madde tankları, borular, tekneler, deniz araçlarında kullanılırlar.

- Isıya ve Ateşe Dayanım: Yüksek ısı dayanımı istenilen yerlerde bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısı ve ateşe karşı dayanımları artırılabilir.

- Kalıcı Renklendirme: Kompozit malzemeye renk vermek için imalat sırasında reçineye belli pigmentler ilave edilerek istenilen kalıcı renkte numune elde edilir. Bu sayede sonradan boyama masrafı ortadan kalmış olur.

- Titreşim Sönümleme: Kompozit malzemelerin sünek malzemeler olmalarından ötürü doğal bir titreşim sönümleyicidirler. Bu sayede malzemelerde oluşan çatlak ilerlemesi minimize edilmiş olur [19].

Dezavantajları:

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemelerin herhangi birinde olumsuz bir özellik varsa bu özellik üretilen kompozite de yansır. Bu oluşabilen olumsuzlukları gidermek için konuyla ilgili çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Örneğin: Kompoziti oluşturan matris nem, sıcaklık, kimyasal etkilere karşı dayanıksızsa kompozit malzemede bu etkilere karşı dayanıksız olur ve bu etkilerin olacağı bölgelerde kompozit kullanılamaz.

Kompozit malzemelerde şu tür dezavantajlar görülmektedir:

- Kompozit malzeme imalatı sırasında malzeme içinde kalabilecek hava zerreciği, kompozit malzemenin yorulma direncini düşürür.
- Kompozit malzemeler, farklı doğrultularda farklı özellik gösterir.
- Üretiminde uzun aşamalar olması ve bu durumun maliyeti arttırması
- Kompozit malzemelerde istenen yüzey kalitesinin bir türlü elde edilememesi
- Kompozit malzemeler demir, alüminyum, bakır ile geri dönüşümlerine göre kıyaslanınca kompozit malzemelerin geri dönüşümleri sorunludur.
- Tasarım parametrelerinin iyi tanımlanması gerekmektedir aksi takdirde ham malzeme açısından yüksek imalat verimine ulaşamaz bu durumda dezavantaj sağlar.
- Kompozit malzeme metaller gibi sünek değildir. Ancak gevreklik oranları metallerden daha yüksektir bu da malzemenin metallere nazaran daha kırılgan olmasına sebep olur. Süneklik arttıkça plastik deformasyon meydana gelir. Metallerde bu olay yükleme esnasında olurken kompozitler metallere nazaran daha gevrek olduklarından kırılma olayı anlık olur. Güvenlik açısından akma olayı bize kırılmadan önce müdahale imkânı tanır. Kompozitte bu imkân daha sınırlıdır.

2.3.2. Kompozit malzemelerin gruplandırılması

Kompozit malzemeler, kendisini oluşturan bileşenlere göre matris ve takviye elemanı olarak 2'ye ayrılırlar.



Şekil 2.5. Kompozitlerin gruplandırılması [20]

2.3.2.1. Matris malzemeleri

Matris; takviye elemanlarını bir arada tutan, mekanik bir yapının oluşumu için takviye elemanları arasında oluşan gerilimin aktarımını ve bu takviye elemanlarının fiziksel, kimyasal dış etkilere korunmasını sağlayan kompozit bir sistemin ana yapısıdır. Matrislere örnek olarak polimer, seramik ve metaller verilebilir. Takviye elemanları; elyaf, tabaka ve pul gibi ana yapının içerisine gömülen bileşenlerdir. Bu bileşenlerin temel görevi gelen yükü taşımak ve matrisin rijitliğini arttırmaktır.

Tablo 2.4. Matrislerin mekanik özellik karşılaştırması [20]

	Metal	Seramik	Plastik
Fiziksel Özellik			
Yoğunluk	Yüksek	Orta	Düşük
Elektriksel Direnç	Çok Düşük	Çok Yüksek	Yüksek
Termal İletkenlik	Çok Yüksek	Çok Düşük	Düşük
Dayanıklılık	Orta-Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta
Mekanik Özellik			
Gerilme Direnci	Yüksek	Düşük	Düşük-Orta
Sertlik	Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta

Matris malzemesinin özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Matris, yükü elyaflara ileterek yapıya rijitlik kazandırır.
- Matris, elyafları bir arada tutar böylece çatlakların ilerleme hızını yavaşlatır.
- Matris, numunede iyi bir yüzey kalitesinin oluşmasını sağlarlar.
- Matris, takviye elemanlarını kimyasal etkilere ve mekanik hasarlara karşı korurlar.
- Matris, kullanıldıkları kompozit malzemelerin darbe dayanımlarının iyileşmesini sağlarlar.

Metal Matrisler:

Makine mühendisliği alanında en yaygın şekilde tercih edilen malzeme türü olan metaller, orta ve yüksek yoğunluğa sahiptirler. Saf halde iken yumuşak ve dayanımları düşüktür. Ancak alaşımlama, soğuk şekillendirme ve ısıtma işlemleriyle dayanımları ve sertlikleri artırılabilir. Metal malzemelerin yüksek zorlamalarda kırılmaması, bunun yerine akıp yükü tüm sisteme dağıtması kullanımında güvenilirliği sağlar. Ağır olmaları ve korozyona karşı dirençsiz olmaları ise dezavantajlarıdır. Bazı metaller, taneciklerle ve liflerle takviye edilerek kompozit malzeme elde edilebilir. Örneğin, jet motoru yapımında kullanılan tungsten alaşımdan oluşan liflerle takviye edilmiş metal alaşımlı kompozit malzeme 1000°C kadar yüksek sıcaklıklara karşı dayanımlı olmuş olur. Metal olarak korozyona karşı dayanımın arandığı kompozit malzemelerde saf alüminyum, yüksek dayanım istenen yerlerde ise alüminyum alaşımları tercih edilir.

Seramik Matrisler:

Seramik, çok sert ve kırılgan bir maddedir. Düşük yoğunluk ve tokluğa sahiptirler. Kullanım sırasında ani hasar sergilerler ve yüksek tahribata sebep olur. Bu sebeple seramik malzemeler ani kırılmaya karşı dirençlerinin artırılması için seramik elyaflar ile takviye edilirler. Bu sayede yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların imalatında kullanılabilirler. Örneğin, disk, piston gibi araba ve gaz türbinlerinde yüksek sıcaklık bölge parçası olarak kullanılırlar.

Polimer Matrisler:

Matris olarak kullanılan polimerler, ucuz ve üzerlerinde kolaylıkla çalışılana bilir malzemedir. Birbirleriyle ve diğer malzemelerle birleştirilebilirler. Bu şekilde karmaşık şekilli parçalar üretmek çok kolay olup talaş kaldırma işlemleri kolaydır. Diğer taraftan elastik modülü ve termal dayanımları düşüktür. Bu durum mekanik özelliklerinin düşük olmasına ve çevresel etkilere karşı kullanımlarının tehlikeli olmasına sebebiyet verir. Polimer matrisler, termoplastik ve termoset olarak 2 gruba ayrılırlar.

1) Termoplastikler:

Termoplastikler düşük sıcaklıkta sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar ve ısıtma işlemi sonrası yarı sıvı haline geldiğinde şekillendirilebilir ve kalıplandırılabilirler. Termoplastikler yüksek sertlik ve darbe dayanımı özelliğine de sahiptirler. Düşük sıcaklıkta sert halde olmaları ham madde raf ömürlerinin uzun olmasını sağlar.

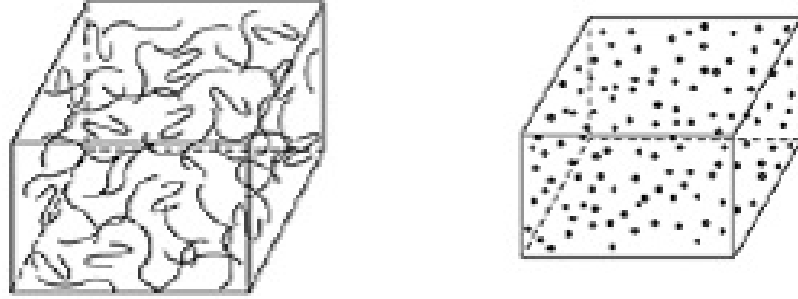
2) Termosetler:

Kompozit malzeme matrisi olarak en çok tercih edilendir. Termoplastiklerin aksine düşük sıcaklıkta sıvı halde bulunurlar. Isıtılarak ve kimyasal işlemlere tabi tutularak sertleştirilirler. Bu işlemden sonra yani sertleşme tamamlandıktan sonra bir daha orijinal sıvı hallerine döndürülemezler. Termoplastiklerin aksine ısıtıldıklarında yumuşamaz, ergimez ve akmazlar.

2.3.2.2. Takviye malzemeleri

Kompozit yapıda kullanılan takviye elemanlarının temel görevi gelen yükü taşımaktır. Takviye malzemesi matrisin rijitliğini ve dayanımını arttırmalıdır. Bunun için kullanılan takviye malzemesi matrisle güçlü bağ kurmalıdır. Takviye malzemesi ve matrisin maruz kalacakları ısı değişimleri sonucu birbirilerini zayıflatmamaları için takviye malzemesinin termal genleşmesi matrisin termal genleşmesinden farklı olmalıdır.

Takviye malzemesi bakımından kompozitlerin gruplara ayrılması takviye malzemesinin geometrik şekli göz önüne alınarak yapılır. Bu durumda kompozitler; tanecik takviyeli kompozitler ve lif takviyeli kompozitler olarak iki gruba ayrılırlar.



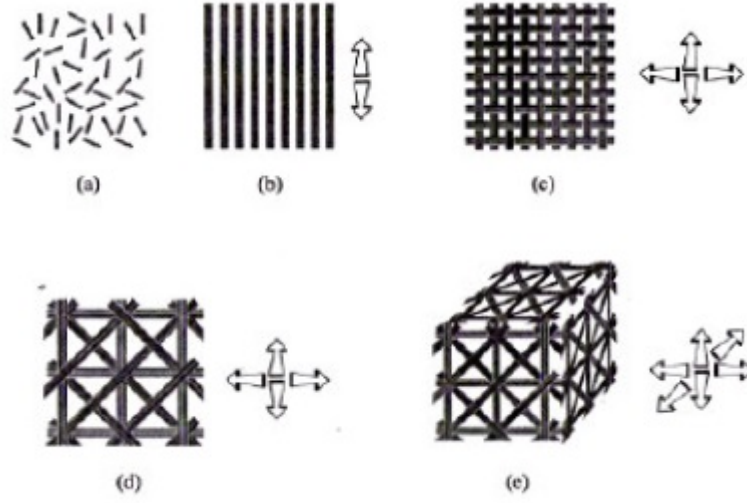
Şekil 2.6. a) Lif ve b) Tanecik takviyeli kompozit iç yapısı [20]

Lif; genel olarak çok ince ve uzun parçalardan oluşan, doğal minerallerden ya da bitkilerden elde edilen ince yapılı homojen iplikçiklerdir. Lifler, takviye edildikleri kompozit malzemeleri dışarıdan yapılan yüklemelere karşı koruyan ana bileşenlerdir. Lifleri bir arada tutan polimer matrisler lifler için çerçeve görevi görür. Kompozit malzemede lif tercihinin önemli bir nedeni de takviye edildikleri kompozit malzeme içerimdeki yönlendirmelerin kontrol edilebiliyor oluşudur.

Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler:

Matris bir yapıya ilave edilen elyaflar sayesinde numunenin çekme dayanımı, özgül dayanımı ve yorulma dayanımı artar. Matris malzemesi numuneye gelecek olan yükü elyaflara iletir bu sayede numuneye tokluk ve yumuşaklık özelliği kazandırır. Elyafların kompozit içerisine belli doğrultularda yerleştirilebilmeleri büyük bir avantaj sağlar. Bu avantaj ile lifler kompozit malzemelere istenen geometrilerde yerleştirilerek kompozit malzemenin uygulanan çekme yükünde farklı oryantasyon açılarına farklı yanıtlar vermesi sağlanmış olur (anizotropi). Örneğin, liflerin kompozit malzeme içine yönlendirildikleri eksene 0° lik açıyla yapılan yüklemelerde kompozitin yorulma dayanımı en yüksek değerde çıkmaktadır.

Liflerin ve dokumaların kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Lif ve dokuma takviyeli kompozitlerde liflerin kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler
 (a) Kesikli rastgele, (b) Sürekli tek yönlü,
 (c) Sürekli düzlemsel iki yönlü, (d) Sürekli düzlemsel üç yönlü,
 (e) Üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğu yönleri gösterir.) [20]

Kesikli lifler, matrisler içerisinde rastgele olarak dağıldığından kompozit malzemenin mekanik açıdan izotropik davranış göstermesini sağlarlar. Sürekli liflerde ise lifler yükleme yönüne paralel olacak şekilde kompozit içerisine dizilirler bu şekilde yükleme yönünde oluşacak yüklemelere karşı kompozitin dayanımı artmış olur. Dokuma tipi dizilimlerde ise liflerin dizilim yönü en az iki yönde olduğu için kompozit malzeme de en az iki yönde dayanım kazanmış olur. Üç boyutlu dokuma yönteminde kompozitin dayanımı her üç boyutta artmış olur.

Takviye elemanları kompozit parçaların dayanımını arttırmaktır için kullanılır.

Takviye elemanı olarak en yaygın kullanılan elyaflar:

- Cam Elyaf
- Karbon Elyaf (Grafite)
- Aramid Elyaf (Kevlar) 'dır.

1) Karbon Elyaf (Grafıt):

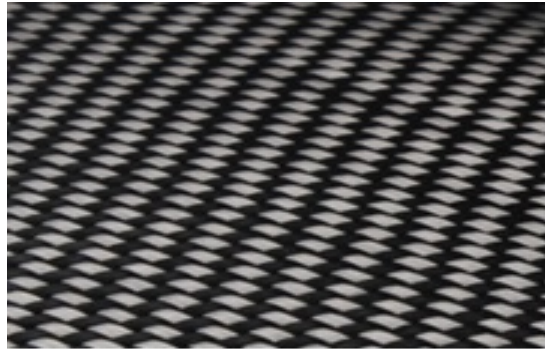
Zift ve Poliakrilonitril (PAN) olarak iki malzemeden elde edilir. Zift tabanlı karbonların mekanik özellikleri daha düşüktür. PAN tabanlı karbonlar Zift tabakalı karbonlara göre daha sağlam ve daha hafiftirler. Bundan dolayı geliştirmeleri için teknolojik açıdan daha fazla çaba sarf edilmiştir. PAN'ın dönüşümü şu aşamalarla yapılmaktadır.

- Oksidasyon: Elyaflar 300°C'ye kadar ısıtılır. Isıtma işlemi sonrası, elyaftan 'H' ayrılır ve 'O' eklenir. Daha sonra elyaf lar kesilerek grafit teknelerine konulurlar ve burada kararlı yapıya dönüştürölürler. İşlem esnasında elyafın renginde değişmeler meydana gelir. Bu değişim sırasıyla beyazdan kahveye oradan da siyaha doğru olur.

- Karbonizasyon: Elyaf lar 3000° C sıcaklığa kadar ısıtılma işlemine tabi tutulurlar. Bu sayede liflerin 100% karbonlaşması sağlanmış olur. Karbonizasyon işlemlerin de elyaf lar a uygulanan sıcaklık derecesi üretilen elyaf ının sınıf ının belirlenmesini sağlar.

- Yüzey İyileştirme: Bu işlem karbon yüzeylerinin temizlenmesi ya da elyaf ın oluşturacağı kompozit malzemenin reçineye daha iyi yapışması için yapılır. İşlem malzemelerin elektrolit banyoya yatırılmasıyla yapılır.

- Kaplama: Sonlandırma işlemi olan bu işlemde elyaf reçine ile kaplanır. Genel olarak bu kaplama işlemi için epoksi reğinesi kullanılır [21].



Şekil 2.8. Karbon elyaf la üretilmiş kumaş

2) Aramid Elyaf:

Aromatik poliamidler olarak ta adlandırılırlar. Aromatik poliamit 1960'lar da DuPont firması tarafından üretilmiştir. İlk başlarda HT-1 olarak isimlendirilen malzeme sonralarında Nomex adıyla ticari isim kazanmıştır. En son 1973'te Kevlar ismini almıştır. Yapısındaki aromatikler oluşturdukları halka zincirinin katıllılığını artırır. Bu katılık elyafın erimemesini sağlar. Ayrıca üretimi sırasında katı polimer moleküllerinin lif eksenine paralel olarak yönlendirilmesi sağlanır bu sayede modülün yüksek özellikler kazanması sağlanır.



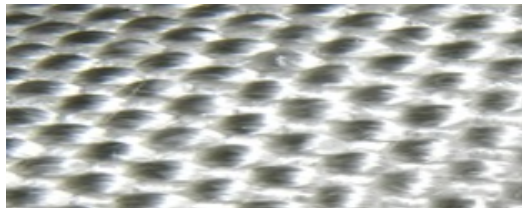
Şekil 2.9. Aramid elyafla üretilmiş kumaş

3) Cam Elyaf:

Cam elyaf takviyeli poliestere kompozitlerde dayanım, malzemede kullanılan cam elyaf oranına, elyafların dizilişine ve cam elyaf poliestere ara yüzeyine bağlıdır. Cam elyaf takviyesi ne kadar fazla ise kompozit malzeme o kadar güçlü olur. Örneğin; Filament sarmayla elde edilen cam elyaf demetlerinde %80 oranında cam elyaf takviyesi sağlanır. Bu oranda takviye edilen cam elyaf ile kompozit malzeme en yüksek dayanımını gösterir.

Cam elyaf demetlerinin paralel dizilişlerindeki oluşturulacak herhangi bir değişik takviye edildiği kompozit malzemesinin mekanik dayanımının azalmasına neden olur. Örneğin; cam elyaf malzemesi kullanılarak dokuma ile üretilen bir kumaş parçasının paralel dizilimle üretilen cam elyaf malzemesine göre dayanımı daha düşük olması verilebilir.

Takviye elemanları içerisinde, satış miktarları ve tüketim oranları göz önüne alındığında en çok tercih edilen takviye elemanı cam elyaftır.



Şekil 2.10. Cam elyafla üretilmiş kumaş

2.3. Cam Elyaf Takviyeli Plastikler (CTP)

CTP; ilk olarak ve en yaygın kullanılan (toplam elyaf takviyeli kompozit üretiminin %75'i), matrise elyaf takviye edilmiş kompozitlerdir. Cam elyafların çeşitli formlarda termoset veya termoplastik matrise takviyesiyle, yüksek kürleşme sıcaklığı veya basıncına gerek duymadan üretilebilirler. CTP'ler; yapısal, endüstriyel ve tüketici odaklı ürünler için devre zemininden tekne gövdelerine kadar geniş boyutta, yüksek korozyon direnci ve düşük maliyet gibi iyi özelliklere sahiptirler. Kompozitlere, %20-%40 arasında elyaf takviyesi yapıldığı zaman genellikle plastik matrisin dayanımını ve sertliğini iki katına çıkarırlar. Sürekli elyaf kullanımı, ısı genleşme ve sürünme oranında arzu edilen azalma ile çarpma dayanımı ve boyutsal kararlılıktaki artışı sağlayarak matrisin dayanımını ve sertliğini dört katına çıkarır [22].

Cam elyaf takviyeli matrisler XX. yüzyılın ilk çeyreğinden bu yana kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli matrisler çok hafif ve dayanıklı malzemelerdir. Bu kompozitlerin matrisinin ekonomik olması ve cam elyafı iyi ıslatma özelliğinden dolayı çoğunlukla poliestерler tercih edilir [23].

Dünya genelindeki takviyeli kompozit tüketiminin yaklaşık yarısına yakın bir pazara sahip olan ABD'de takviyeli kompozitlerin ürünlerin yaklaşık %90'ı cam elyaf ile takviye edilirken, %75'lik bir kısmında matris malzeme olarak doymamış poliestер kullanılmaktadır [24].

Teknolojik gelişmeler günümüzde hızlı bir şekilde ilerleme kaydetmektedir. Bu gelişmelere cevap verebilmek için kullanılan malzemelerinde üstün özelliklere sahip malzemeler olması gerekmektedir. Bu nedenle kompozit malzemeler üzerine daha fazla çalışma yapmak gerekmektedir. Kompozit malzemelerin özelliklerinin artırılması için son yıllarda elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler imal edilmeye başlanmıştır. Elde edilen kompozitler endüstriyel alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu alanlar;

- Havacılık / Uzay / Savunma
- Yapı sektörü
- Elektrik ve elektronik
- Tarım ve gıda sektörüdür.
- Taşımacılık ve otomotiv
- Denizcilik
- Askeri uygulamalar

2.3.1. CTP' nin özellikleri

CTP ana malzeme olarak reçine ve cam elyaftan oluşur. Burada cam elyaf takviyeyi, reçine ise matrisi oluşturur. Cam elyaf takviye olarak mekanik özellikleri iyileştirir, matris ise deformasyon sırasındaki çatlak oluşumunu önleyici rol onar.

Aşağıdaki bilgiler doğrultusunda CTP malzemesinin özellikleri belirlenir.

- Reçine Özellikleri
- Cam elyaf Özellikleri
- Kompozit malzemede kullanılan liflerin mekanik özellikleri

2.3.1.1. Reçineler

Reçine; katı veya yarı akışkan halde bulunan, suda çözünmeyen, organik çözücülerde çözünen, ısıtılınca yumuşayıp eriyen maddeye denir.

Reçineler, bitkilerde bir yağ içerisinde erimiş halde veya zambak halinde bulunur. Çamlar, zambaklar reçine taşıyan bitkilerdendir. Reçine bitkilerden saf olarak elde edilemeyip, yağ ve benzeri maddelerle karıştırılarak elde edilir. Bitkiden reçineyi elde etmek için kesici alet veya ateş yardımı ile bitki kabuğu yaralanır.

Bugün sanayide tabii reçinelerin yerini suni reçineler almıştır. Suni reçineler, fiziksel olarak tabii reçinelere benzeseler de kimyasal yönden farklıdır. Reçine türlerini açıklayacak olursak.

1) Poliester reçine:

Poliester reçineler en ekonomik reçinelerdir. Özellikle doymamış poliester reçineler kompozit malzeme imalatında en çok tercih edilendir. Poliester reçineler, dikarboksilik asit ve polihidrik alkolün polimerizasyonu sonucu oluşturulur. Üretilen reçineden istenen viskozitede akışkan bir sıvı elde etmek için reçine stiren monomerinin içinde çözülür. Elde edilen sıvı akışkan şeklindeki reçine zamanla sertleşirken monomer polimerin üzerinde bulunan doymamış uçlarla etkileşime girerek reçineyi katı termosete dönüştürür.

Poliesterler genel olarak hava ile temas ederken havayı tutarlar ama temas halindeyken sertleşmezler bu nedenle sertleşme öncesi poliestere parafin ilave edilerek sertleşme öncesi poliester ile hava arasında koruyucu bir tabaka oluşturulur. Ancak ikinci bir bağlanma işlemi yapılacak olursa burada kullanılan parafin yapışma yüzeyini azaltacağı için poliester bu işlemten önce parafinden arındırılmalıdır.

2) Vinilester reçine:

Vinilester reçineler; doymamış poliestester reçinelerin ve epoksi reçinelerinin ‘hızlı sertleşme’ ve ‘kolay işleme’ gibi özelliklerinin bir arada kullanılması için suni olarak geliştirilmiştir. Epoksi reçine ile bazı asitlerin reaksiyona sokulmasıyla elde edilmiştir. Bu asitler akrilik asidi ya da meta akrilik asididir. Vinilester reçineler poliestester reçinelere göre daha dayanıklı ve esnektirler. Ayrıca Vinilester mekanik dayanımı artırır ve korozyona karşı da direnç sağlar. Epoksi reçinelerle kıyaslanınca da daha az üretim prosesi ve kullanım becerisi gerektirir. Bu özellikleriyle kullanım sebebidirler.

3) Epoksi reçineler:

Epoksi reçineler, geniş kullanım alanı olan parçaların imalatında en çok tercih edilen reçinedir. Epoksi reçineler diğer reçinelere göre çevresel etkilere karşı direnci yüksektir. Ayrıca mekanik özellik bakımından da daha iyidir. Epoksi reçineler üretimde istenen prosese göre gerekli sertleştirici seçilerek sertleşme hızları kontrol edilebilir. Epoksi reçinelerin çok iyi yapışma özelliğinin olması, korozyona karşı yüksek dayanım göstermeleri ve yüksek ısı değerlerine dayanabilmeleriyle yüksek performans gerektiren kompozit malzemelerde tercih edilirler. Yukarıda sayılan avantajlarından ötürü tez çalışmamız için ürettiğimiz numunede epoksi reçine kullandık.

2.3.1.2. Cam elyaf

Cam elyaf kullanımı eski Mısır'a kadar uzanmaktadır. 1600'li yılların ortasında İngiliz fizikçi Robert HOOKE cam filamentlerle yaptığı deneyler hakkında açıklamalarda bulunmuş ve takip eden yüzyılda Fransız fizikçi Rene Antoine Ferchault de Reaumur cam elyafların dokuma yapılacak kadar esnek olduğu hakkında tahminler yürütmüştür. Camın ilk dokuması 1893 yılında Libbey şirketi kurucusu Edward Libbey tarafından yapılmış ve cam dokuma ile yapılan elbise o yıl Chicago'daki Columbia'n Sergisinde sergilenmiştir. Owens Illinois cam şirketi 1931 yılına kadar cam elyaf üretimi için ticari proses geliştirememiş olup 1936 yılında sürekli cam filament üretimi ile ticari prosesi geliştirmiştir. Bu durum üzerine 1938 yılında Owens Illinois şirketi ile Corning Cam şirketi birleşerek Owens-Corning Cam Elyaf şirketini kurmuşlardır. Bu atılım modern cam elyaf sanayisinin başlangıcı olarak görülür.

Cam elyaf ucuz olması ve iyi bir ağırlık/mukavemet oranı vermesinden ötürü takviye olarak plastik kullanılan işlerin %90'ında kullanılır. Cam elyaf üretilirken çeşitli taşların 1600 °C'ye kadar ısıtılıp elde edilen taş eriyiklerinin birleşerek camı oluşturması ile olur. Elde edilen sıvı haldeki bu cam 9 ile 25 mikron arasında çaplara sahip kovanlardan geçirilerek cam elyaf iplikleri oluşturulur. Oluşan bu iplikler sıkı bir şekilde birleştirilerek liflere ya da gevrek şekilli fitillere dönüştürülür. Bu işlemlerden sonra lifler çeşitli kimyasallarla kaplanarak liflerin aşınmaya karşı dirençli olmaları sağlanır. Oluşan cam elyafların çekme mukavemetleri oldukça iyidir. Buna karşın uzun süreli yüklemeler altında bozulmalar olabilmektedir. Cam elyaf tipleri kullanılan taş tiplerine göre değişim göstermektedir.

Cam elyaf imalatında kullanılan camın yapısı ve cam elyafların oluşumundan bahsedecek olursak.

1) Camın yapısı:

Cam ana maddesi silisyumdan (SiO_2) oluşan toprak alkali metal oksitlerin çözülmesiyle elde edilen akışkan bir malzemedir. Çok eski zamanlardan beri cam gerek süs eşyası gerekte inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise iletişim ve uzay teknolojisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam ayrıca kristalleşmelerin oluşmaması için erişin belirli bir hızda soğutulmasıyla elde edilen amorf bir malzemedir. Amorf, maddeyi oluşturan atomların katı halde iken kararlı bir kristal yapıya sahip olmamasını ifade eden bir terimdir. Bu terim Yunanca morphé yani şekil kelimesinden türemiştir. Cam katılaşıırken amorf yapısını korur. Cam kimyasal açıdan silika ağından meydana gelmektedir. Ancak cam çekilmeden önce çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır. Camın viskozitesini uygun seviyeye getirmek ve homojen bir yapı oluşturmak için belirli kimyasallardan faydalanılır. Kullanılan bu kimyasal ayrıca oluşan gazların uzaklaştırılmasında da önemli rol oynar. Bu işlemler bittikten sonra camın fiziksel özellikleri kullanılan modifiye edicilerin çeşidi ve miktarına göre değişiklik gösterir.

Camın özelliği kullanılan bileşenlere göre farklılık göstermektedir. Günümüzde camda kullanılan bileşen sayısı değişime uğrasa da bu bileşenlerden çok azı cam elyaf üretiminde ticari olarak sağlamaktadır. Örneğin; A-cam (yüksek alkali), S-cam (yüksek dayanım), E-cam (elektrik dayanımı) ticari olarak sağlayan camlardır.

Bunları açıklayacak olursak:

“E” cam elyaf; Çekme, basma mukavemeti oldukça yüksektir. Neme karşı duyarlı olması ve suya karşı dirençli olması ile iyi bir korozyon direnci sağlanmaktadır. Düşük alkali metal olması ile E-cam iyi bir elektrik yalıtımı özelliği sağlar. Ancak darbe dayanımı oldukça düşüktür.

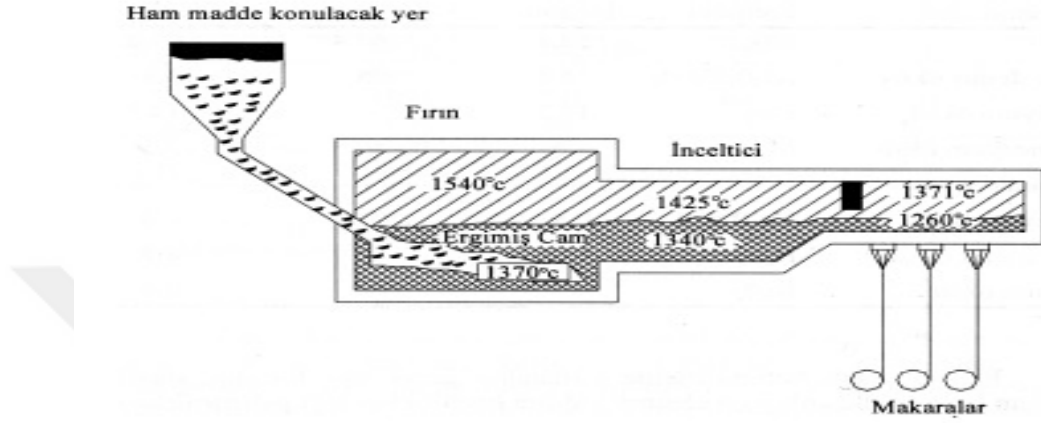
“C” cam elyaf; Kimyasal tepkimelere karşı dayanıklıdır. Bu nedenle kimyasal yakıt taşıyan boruların ya da tankların iç yüzeylerinde katı fazda kullanılır.

“R” cam elyaf; Genel olarak uzay sanayi ve savunma sanayide kullanılırlar. Neme karşı dayanımları yüksektir. E-camdan sonra imal edilmişlerdir ve E-camın mukavemet değerlerinin artırılması ile elde edilmişlerdir. Bu nedenle E-camdan daha yüksek mukavemet değerleri gösterirler. Mukavemetlendirme işlemi sonrası maliyet arttığından E-cama nazaran oldukça pahalıdırlar [25].

Kullanılan toplam Cam elyaf takviye malzemelerinin Pazar payını % 90 oranında E-cam oluşturmaktadır. Çünkü imalat esnasında maliyet ve mukavemet özellikleri göz önüne alındığında en ideal camı E-cam oluşturmaktadır. Bizde bu özelliği göz önünde bulundurarak tez çalışmamız için imal ettiğimiz Cam elyafları E-camdan seçtik.

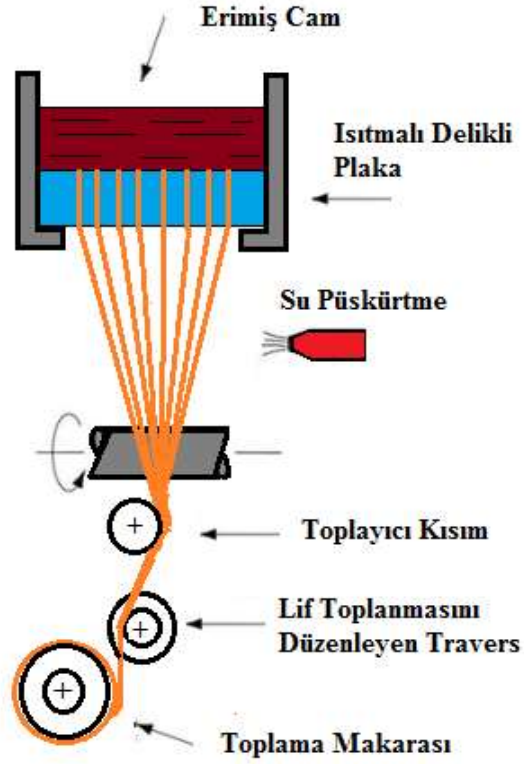
2) Cam elyafın oluşumu:

Camı oluşumundaki ilk kademe kullanılacak hammaddelerin kullanım oranlarını belirlemektir. Bunun için kullanılacak hammaddeler sırasıyla tartılıp gereken oranlarda karıştırılırlar. Karıştırma işleminden sonra hammaddeler eritmek için 3 bölümden oluşan fırınlara götürülürler.



Şekil 2.11. Cam eritme [26]

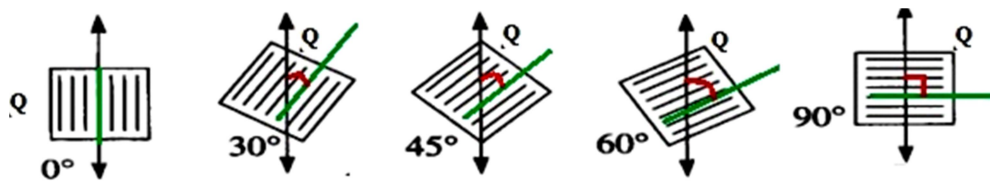
Besleme; erime, gaz bileşenlerin ayrılması ve homojenizasyonu için ilk olarak fırına gönderilir. Daha sonraki bölümde cam eriyiğın sıcaklığı 1370°C'dan 1260°C'a düşürülür. Cam eriyik bu bölümden sonra elyaf oluşumunun gerçekleştiği son bölüme ilerler. Camın belirli viskozite özellikleriyle proses sıcaklıkları belirlenir. Cam eriyiğının bu son bölümde sürekli cam elyaflara dönüşmesi temel olarak bir inceltme prosesidir (Şekil 2.11.). Cam eriyik çok sayıda delik içeren platin-rodyum alaşımlı düzeden akar. Düzede bölümü sabit cam viskozitesini elde etmek amacıyla ısıtılmaktadır. Elyaflar aşağı doğru çekilir ve düzeden çıkar çıkmaz hızlıca soğutulurlar. Daha sonra elyaflar, kaplama çözeltisinde sürekli dönen ve geçen elyafların üzerine ince bir film atacak şekilde ayarlı bir banyodan geçirilir. Bir cam elyafı diğerinden ayrılmasına neden olan özellikler bu basamakta gerçekleştirilir. Kaplama bileşenleri; tel bütünlüğü, yağlanması, matris uyumluluğu, yapışma özelliklerini son ürüne verir. Bu yüzden özel kullanımlar için gerekli elyaflar burada farklı kaplamaya tabi tutulurlar. Kaplama uygulandıktan sonra, sarma aletine yaklaşırken filamentler tel oluşacak şekilde birleştirilirler (Şekil 2.12.). Sonra her uzun tel kumaş, hasır, keçe, tül ve kırılmış cam elyaf haline getirilir [26].



Şekil 2.12. Cam elyaf oluşturma prosesi [27]

2.3.1.3. Liflerin mekanik özellikleri

Kompozitlerde takviye malzemesinin miktarı, geometrik dizilimleri kullanım özelliklerini belirleyen ön önemli faktördür. Kompozitler genellikle oryantasyon açısı 0° derecede yönünde yani elyaf yönü kuvvet yükleme doğrultusunda iken en iyi özellikleri gösterir. Şekil 2.13'te elyaf yönelimleri (oryantasyon açısı) gösterilmektedir. Tablo 2.4'de ise kompozitin elyaf yönelimin iki yönlü veya çok yönlü olmasına göre mekanik özellik değişimlerin gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi 0° ve 90° doğrultusunda numune dayanımları en yüksek değerleri alırken 45° 'de ise en düşük değerleri almaktadır. Dokuma biçimindeki elyaf takviyelerinde ise takviyenin numune dayanımına etkisi biraz daha düşük olmaktadır.



Şekil 2.13. Fiber oryantasyon açısı

Tablo 2.5. Takviye biçiminin özelliklere etkisi [28]

Takviye Biçimi	Tek yönlü 0°		İki yönlü 0°/90°		Dokuma		Keçe çok yönlü
Ölçme yönü	0°	90°	0°	45°	0°	45°	her yönde
Çekme modülü (Gpa)	77	6	39	7	32	7	21
Çekme dayanımı (Mpa)	1400	28	644	98	525	210	200
Basma modülü (Gpa)	77	6	39	7	33	7	-
Basma dayanımı (Mpa)	280	140	203	126	175	126	-
Eğme modülü (Gpa)	77	-	-	-	28	-	19
Eğme dayanımı (Mpa)	630	-	-	-	350	-	249

2.3.2. CTP üretim yöntemleri

Kompozit malzeme üretiminde beklenen çeşitli ihtiyaçları karşılayabilmek için birçok üretim yöntemi ve hibrit prosesi geliştirilmiştir. Bu proseslerin her birinde çeşitli avantajlar sağlamaktadır.

Kompozit malzeme imalatını iki gruba ayıracak olursa:

- Açık kalıplama yöntemleri
- Kapalı kalıplama yöntemleri

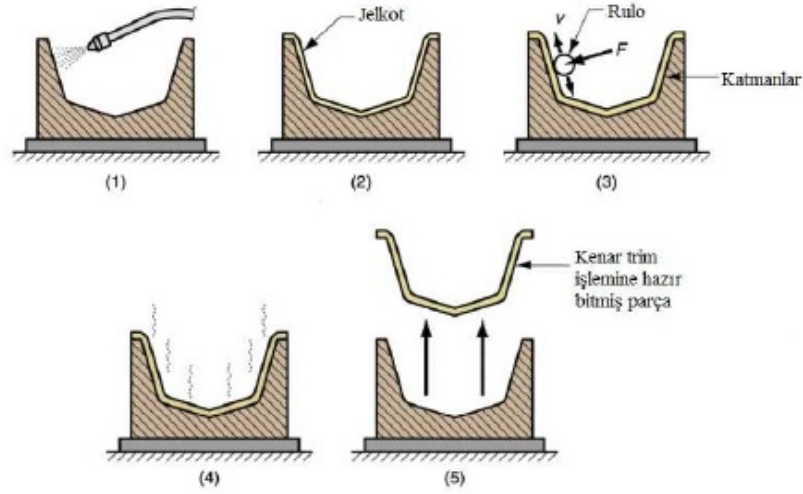
Bu grupların her biri kendi içinde belli başlı yöntemler içermektedir.

2.3.2.1. Açık kalıplama teknikleri

El yatırma yöntemi (Hand lay up):

El yatırma yöntemi geniş yüzey uygulamalı CTP kaplaması için en ideal metottur. Kalıp ayırıcı olan vaks oluşturulduktan sonra jelkot uygulaması yapılır. Cam elyaflama işlemi öncesi kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot yüzey düzgünlüğü istenen yerlerde kullanılan ve cam elyafın görülmesi önlemeye yarayan poliester bir reçinedir. Jelkot sürüme ya da püskürtme yoluyla kalıba ince bir tabaka olacak şekilde sürülür. Jelkot tabakası sertleştikten sonra fırça yardımıyla dokuma tipi cam elyaf ve poliester bağlayıcı uygulanır. El yatırma tekniğinde poliesterin yanı sıra Vinilester ve Fenolik reçineler de kullanılmaktadır [24].

El yatırma yöntemi ile düşük kalıplama maliyeti sağlanmış olur. Bir kalıp malzemesinden günde 2 sefer ürün alınabilmektedir.



Şekil 2.14. El yatırma prosesi aşamaları [28]

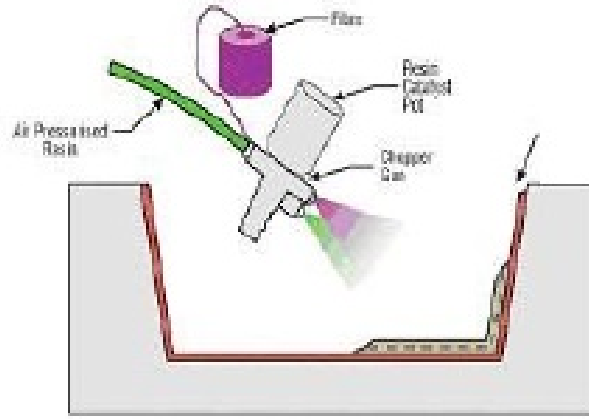
El yatırma yönteminin dezavantajları da bulunmaktadır. Kalıplama işlemi aşamalarının tamamı elle yapıldığı için oluşan ürün bünyesinde hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu kabarcıkları malzeme kalitesini ve kompozitin mukavemetini düşürmektedir. Düşük mukavemete yol açtığı için el yatırma yöntemi ile üretilen kompozitler yapı elemanlarında kullanılmazlar.

Püskürtme yöntemi (Spray up):

Püskürtme yöntemi el yatırma yönteminin biraz daha geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Ancak bu yöntemde reçine ile lifin kalıp yüzeyine uygulanma şekilleri farklılıklar göstermektedir. El yatırma yönteminde reçineleme işlemi el yordamıyla yapılırken bu yöntemde püskürtme tabancasının kullanılmasıyla emek yoğunluğu azaltılmıştır. El yatırma metodunun daha seri olarak uygulanmasını sağlayan bir açık kalıplama metodu olduğundan üretimde oluşan hava kabarcıkları ve karışım oranı hataları azaltılmış olur. Bu durum mukavemeti etkilediğinden ürün dayanımının çok önemli olmadığı yerlerde püskürtme yöntemini seçmek daha uygun olur.

Püskürtme yönteminde, sürekli fitil cam elyafılar püskürtme işlemi esnasında 15-50 mm lik uzunluklarda kesilerek kullanılmaktadır. Bu yöntem geniş yüzeylerde kullanıldığında seri üretim olanağı sağlamaktadır. Böylece işçilik maliyetlerini önemli ölçüde düşmektedir [29].

Bu yöntemin kullanımı ayrıca malzeme tüketimini ve malzemede oluşan fireyi de azaltmaktadır. Bu sayede, reçine tüketimi yaklaşık % 20 azalmaktadır. Püskürme yönteminin el yatırmasına göre diğer önemli bir avantajı ise kalıplama süresinin 1/4' e düşmesidir.



Şekil 2.15. Püskürtme yöntemi [30]

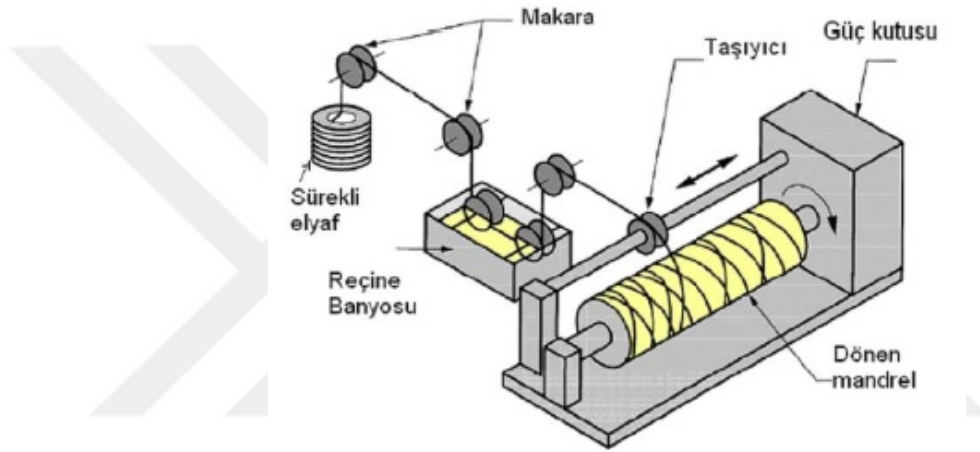
İki tür sprey tabancası bulunmaktadır. Birincisi en yaygın olarak kullanılan katalizör enjeksiyon tabancasıdır. Bu tabanca ile daha önceden hızlandırıcı takviye edilmiş reçineye katalizör ilave edilir. Diğer tabanca ise çift kap sistemli püskürtme tabancasıdır. Bu tabancada reçine iki ayrı bölmeye yönlendirilir. İlk bölmede reçineye katalizör katılır. İkinci bölmede ise reçineye hızlandırıcı ilave edilir. Tabanca iki kısımdan eş zamanlı olarak püskürtme yaparak kendi dış ağzında katalizör ve hızlandırıcının birleşmesini sağlar. Böylece bileşen reçineler püskürme sonrası kalıp yüzeyinde sertleşmeye başlar. Tabanca içinde sağlanan karışma işlemiyle sağlık açısından oluşacak zararlar minimize edilmiş olur.

- Püskürtme yöntemiyle elde edilen malzeme el yatırma yöntemi ile elde edilen malzemeden daha ucuza imal edilir.
- İmalat sonrası atık malzeme azaldığından tasarruf sağlanmış olur.
- Püskürtme tabancasının kullanımıyla reçine uygulama zamanında düşüş yaşanır.
- Çalışan için sağlıksal açıdan riskler azaltılmış olur.
- Katalizörlenmiş reçine kullanımı malzeme israfının önlenmesini sağlar.

Püskürtme yöntemi bu özelliklerinden ötürü el yatırma yönteminden daha avantajlı bir imalat yöntemidir [29].

Elyaf sarma (Filament sarım yöntemi):

Bu yöntemle özel şekillere sahip olan malzemelerin seri imalatı yapılmaktadır. Elyaf sarma yönteminde, sürekli lifler öncelikle reçine havuzuna daldırılır ardından reçine havuzunda ıslatılan bu lifler bir makara yardımı ile dönen bir kalıp üzerinde sarılır. Sarma işlemi yeterli sayıda elyaf katmanı oluşuncaya kadar devam eder. Elyaf katmanları yeterli seviyeye ulaşınca elde edilen ürün sertleşmeye bırakılır. Sertleşme işlemi sonrası döner kalıp sistemden ayrılır. Bu imalat yöntemi ile genellikle silindirik ve dairesel parçaların imalatı yapılır. Araba şaftları, dairesel basınç tankları ve silindirik borular bu imalat yöntemiyle üretilirler. Mekanik özellikleri değiştirmek için cam elyaflar farklı sarım açılarıyla sarılabilirler [30].



Şekil 2.16. Elyaf sarım proses düzeneği [29]

Bu yöntemin kullanımı ayrıca malzeme tüketimini ve malzemede oluşan fireyi de azaltmaktadır. Bu sayede, reçine tüketimi yaklaşık % 20 azalmaktadır. Püskürme yönteminin el yatırmasına göre diğer önemli bir avantajı ise kalıplama süresinin 1/4' e düşmesidir.

Avantajlar:

- Oluşturulan malzemenin özellikleri kontrol altında tutulabilir.
- Sarım açılarında bağlı çeşitli mukavemet değerleri elde edilebilir olması
- İşçiliğin düşük olması
- Çok geniş takviye malzemesi ve reçine çeşitliliği bulunması
- İmalatın otomasyon yönünün yüksek olması
- Termoset ve termoplastik kullanımına imkân tanınması

Dezavantajlar:

- Yalnızca eksenel ürünlerin imalatı için kullanılabilir olması
- Ek maliyet oluşturmaya otomasyon sistemine geçişte
- Uçucu organik emisyon salınımı nedeniyle mekanik kontrol gerektirmesi [24].

2.3.2.2. Kapalı kalıplama teknikleri

Profil çekme (pultrüzyon) yöntemi:

Bu yöntem 1960'ların sonundan itibaren kullanmaya başlanmış olup istenilen şekilde profiller ve özel kesitli kompozit malzemeler üretilmiştir. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlı olup malzeme mukavemeti oldukça yüksektir. Profil çekme yöntemi genel olarak lif yönleri eş alan parçaların imalatında kullanılır. Takviye olarak E-cam, S-cam, Aramid ve karbon lifleri kullanılır. Bunlar içinde en çok kullanılan ise E-cam takviye lifleridir [29].

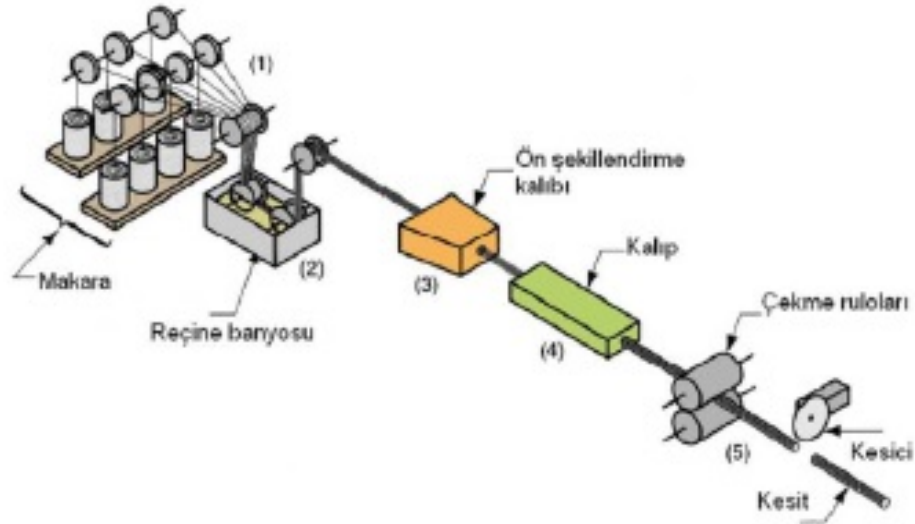
Bu yöntem ile 120-150 °C'ye ısıtılmış elyaflar çelik kaptan çekilir ve belirlenen kesitlerde sertleşmesi sağlanır.

Profil çekme yönetiminde elyaflar iki ayrı uygulama ile ısıtılmış çelik kalıptan çekilirler.

- Elyaflar önceden katalize edilmiş şekilde reçine banyosundan geçirilirler. Reçine banyosu sonrası ısıtılmış çelik kalıptan çekilme işlemi yapılır. Bu esnada reçine fazlaları sıyrılır.
- İkinci çekme işleminde ise elyaflar belli bir gerilim ile kuru olarak ısıtılmış çelik kalıptan çekilirler ve çekilme işleminden sonra reçine enjeksiyonu kalıp içinde yapılır [21].

Kalıp içerisinden geçirilen malzeme herhangi ek işlem gerektirmeyecek şekilde kürlenmiş olup düzgün bir parça olarak işleminden çıkar.

İmal edilen malzemenin takviye yönündeki yüklemelere karşı mekanik özellikleri sürekli elyaf kullanımdan ötürü oldukça yüksektir. Enine yüklemelerde ise mekanik açıdan yetersiz kalmaktadır. Bu sorunu çözmek için özel dokuma yöntemleri kullanılır [29].



Şekil 2.17. Profil çekme yöntemi düzeneği [30]

Pultrüzyon yönteminin avantajları:

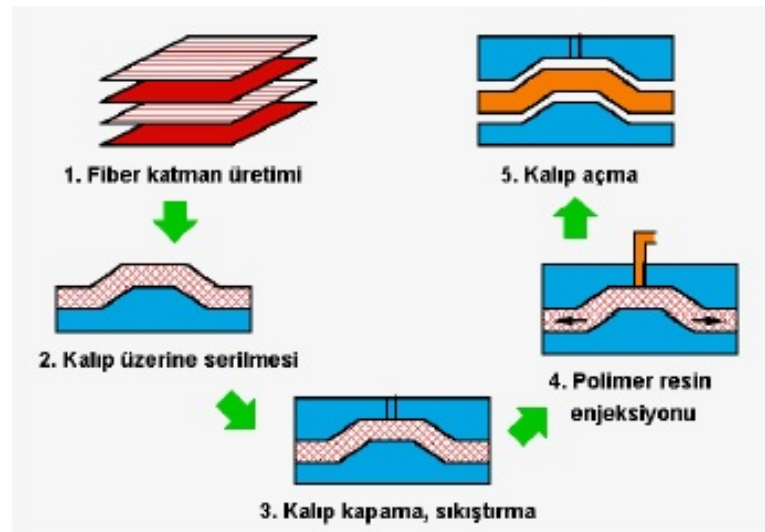
Bu proseste yönlendirilmiş elyaf kullanılmıştır. Burada kullanılan elyafın bir kısmı çekme dayanımı elde edecek yönde oryantasyon açısı 0^0 olacak şekilde yerleştirilirken bir kısım elyaf ise üründen istenen özelliğe göre farklı yönlerde yerleştirilir. Bu işlemde düşük işçilik gerektiği ekonomik bir yöntemdir. Bu yöntemde ekipman yatırım masrafları diğer üretim yöntemleri ile kıyaslanınca oldukça düşük değerlerde çıkmaktadır. Sayılan bu özellikler orta-yüksek hacimli uygulamalar için pultrüzyon yönteminin öne çıkmasını sağlamaktadır [24].

Dezavantajları:

Elyaf lar çekme yönünde kuvvet uygulanacak yönde dizildiği için çapraz yönde etkiyecek kuvvetlere karşı mukavemet dayanımları düşük olmaktadır. Elde edilen numunelerin rijitlik değerleri diğer üretim yöntemleri ile elde edilen numunelerden düşük çıktığı için bu durumu dengelemek adına kesit ve et kalınlığında değişiklikler yapmak gerekmektedir [24].

Reçine transfer yöntemi (RTM):

Reçine enjeksiyon yöntemi; el yatırma ve püskürtme yöntemlerinin yetersiz kaldığı alanlarda kullanılır. Malzeme imalatı yapılırken istenen hızı karşılaması ve imalat sonrası oluşan malzeme kalitesinin diğer yöntemlere nazaran daha yüksek olması tercih edilme sebebidir. Bu yöntemde dişi ve erkekten oluşan iki kalıp kullanılır. Üretimde öncelikle cam elyaf lar kalıp yüzeylerine yerleştirilir ve kalıplar kapatılır. Daha sonra bağlayıcı malzeme bir özel bir kanal vasıtasıyla belli bir basınç altında kapatılan kalıpların içine enjekte edilir. Reçine kalıp içine düşük basınçlı bir pompa yardımı ile akıtılır. Bu sayede kalıpların zorlanması engellenmiş olur. Bu durum kalıp sızdırmazlığına, enjeksiyon sırasında içeri hava boşluğu dolmasına yardımcı olur. Kullanılan pompanın basınç aralığı 1-4 atm arasında değişir. Reçine pompa yardımı ile kalıplara aktarılırken aynı zamanda vakumlama işlemi yapılır bu şekilde reçinenin kalıp içerisine iyi bir şekilde yayılması sağlanmış olur. Vakum kullanımı malzeme kalitesini oldukça arttırmaktadır [31].



Şekil 2.18. RTM ile kompozit parça üretim yöntemi adımları [32].

RTM (Resin Transfer Moulding) yöntemi genellikle keçe veya dokuma tipi cam elyaf takviyeleri için kullanılır. Bu yöntemde el yatırma yöntemi ile hazırlanmış düşük maliyetli CTP kalıpları tercih edilir. Kalıplama işleminde takviye malzemesi ve reçinenin karışımını kolaylaştırmak ve üretim sürelerinin kısaltmak için düşük viskoziteli polyester reçineler kullanılır. Kalıp maliyetleri düşük olduğundan ve imalatta kullanılan ekipmanların basit ekipmanlar olmasından ötürü ilk yatırım maliyetleri oldukça düşüktür.

Tez çalışmamızda kullandığımız CTP/Al hibrit malzemesinin açıklamasına devam etmek için Hibrit Kompozit ve kompozit imalat şekli olan Prepreg hakkında gerekli bilgi aşağıda verilmiştir.

2.4. Hibrit Kompozitler

Lifler kompozit malzemeler için takviye elemanı olarak kullanılır. Takviye elemanı olarak kullanılan bu lifler çeşitlilik gösterir. Kullanılan liflere göre malzemeler de mekanik özellikler bakımından çeşitlilik gösterir. Bu çeşitliliği malzemenin lehine kullanmak için hibrit kompozit malzeme imalatı ortaya çıkmıştır.

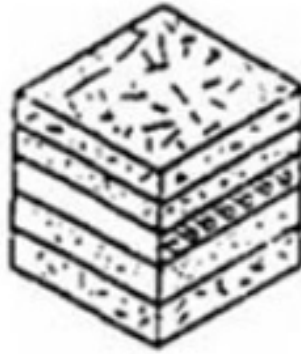
Hibrit kompozit, iki veya daha fazla sayıdaki farklı fiberin aynı kompozit içinde kullanılarak matrisle bir araya gelmesiyle oluşan malzemelere denir. Bu sayede yeni ve farklı özellikteki kompozitler imal edilir. Örneğin, aramid karbona nazaran daha ucuz ve tok bir elyafıdır. Ancak aramidin basma mukavemeti karbondan düşüktür. Aramid ve karbon kullanılarak imal edilen bir hibrit kompozitin tokluğu karbon elyafı kompozitten, maliyeti ve basma mukavemeti karbon elyafı kompozitten daha iyi olur. Cam elyafları ve karbon elyaflarından oluşan hibrit kompozitler maliyet ve performans açısından en çok tercih edilendir.

Hibrit kompozit içinde yer alan yüksek modüllü elyaflar kompozitte sertlik ve yük taşıma özelliği sağlarken, düşük modüllü fiberler ise kompozitin hasara karşı dayanıklı olmasını ve malzeme maliyetinin düşmesini sağlar.

Hibrit kompozitlerin geleneksel kompozitler üzerindeki avantajlarından bazıları şunlardır.

- Dengeli mukavemet ve Sertlik
- Dengeli termal bozulma stabilitesi
- Düşük ağırlık ve/ veya Maliyet
- Gelişmiş yorulma direnci
- Azaltılmış çentik hassasiyeti
- Geliştirilmiş kırılma tokluğu
- Geliştirilmiş darbe direnci

Bir hibrit kompozitin mekanik özellikleri, kompoziti oluşturan farklı katmanların hacimsel oranının ve istiflenme sırasının değiştirilmesi ile değişir. Metal matrisli ve reçine matrisli kompozitler çeşitli yapıştırma teknikleri ile bir araya getirilerek süper hibritler elde edilir.



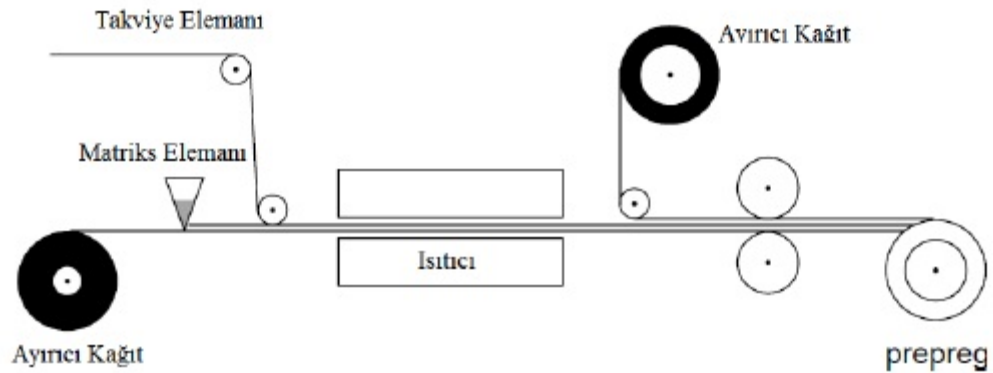
Şekil 2.19. Hibrit (Karma) kompozit [33]

Hibrit kompozitlerin darbe dayanımları oldukça karmaşık özellik göstermektedir. Örneğin, malzemeye hızlı bir şekilde darbe uygulanırsa malzemede gözle görünür hasarlar meydana gelmektedir. Eğer hafif bir darbe uygulanırsa gözle görünen hasar oluşmasa da malzeme içi kısmında matrislerde çatlaklar ve delaminasyon hasarları meydana getirir. Bu çatlaklar sonucu potansiyel tehlikeler oluşur.

Matris çatlakları ve delaminasyon hakkında detaylı bilgi Yorulma konu başlığı altında detaylı bir şekilde verilecektir.

2.5. Prepreg

Prepreg kelimesi “pre-impregnated” sözcüğünün kısaltmasından meydana gelmektedir. Prepreg imal ederken sürekli fiber ve bu fiberleri ön ve arka yüzlerinden kaplayan reçine kaplı kâğıtlar kullanılır. Reçine kaplı kâğıtlarla fiberler kaplanır. Kaplama işlemi sonrası düşük bir sıcaklıkta reçinelerin hafif kürlenmesi sağlanır. Reçinelilerde jelleşme olana kadar literatürde B-stage olarak tarif edilen jelleşme anına kadar ısıtıl işlem devam eder. Şekil 2.20 ‘de standart bir prepreg cihazının şematik görünümü mevcuttur. Şemada da görüldüğü gibi fiber malzeme matris malzemesi ile emdirildikten sonra ısıtıcı içinden geçerek reçine jelleşmesi başlar. Bu işlemten sonra fiber-reçine demeti bir mandren üzerinde yan yana sarılır. Alt ve üst kısımlarda bulunan ayırıcı kâğıtlar fiber malzeme üzerindeki matrisin yüzeye yapışmasını önler ayrıca malzeme yapısına zarar gelmesini engeller. Sarma işlemi sonrası oluşan silindirik fiber-reçine kompoziti kesilir. Kesme işlemi sonrası elimizde dikdörtgen şeklinde kompozit bir levha elde edilir.



Şekil 2.20. Bir Prepreg üretim prosesinin şematik gösterimi [34]

Oluşan prepreglerin yüzeyleri yapışkan olduğundan koruyucu kâğıtlar arasında korunurlar. Bu sayede prepregler rulo olarak sarılıp stoklanabilirler. Stoklama sonrası gerekli stoklama koşullarına uyulması ile son kullanım tarihlerine kadar muhafaza edilebilirler.

Pregrelerden bir tanesi, fiberlerden ve düşük sıcaklıkta ön kürlenerek bu fiberlerle birleştirilmiş reçineden meydana gelir. Prepreglerin en önemli avantajları, yüksek fiber oranlı kompozit malzeme imalatının hammaddesini oluşturmalarıdır. Prepregle imal edilen kompozitin malzemenin kalınlığı, fiber ve matris malzeme oranları homojen olur.

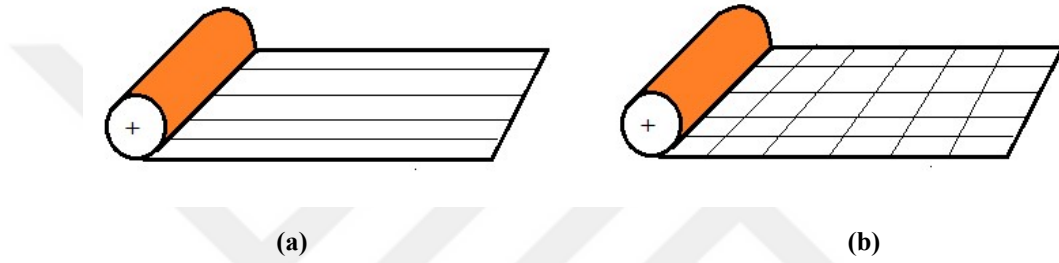
Prepregler iki şekilde imal edilir. Bunlar tek yönlü Prepreg ve örgü Prepreg olmak üzere 2 çeşittir.

Tek yönlü prepregler:

Bu yöntemle tüm fiber yönelimleri için tabakalar oluşturulabilir. Üretilen kompozitler yüksek mukavemetlidir. Ancak bu yöntemde işçilik çok uzun süre alır.

Örgü prepregler:

Bu yöntemle sadece $0^\circ/90^\circ$ açıları ile imalat yapılabilir. Bununla birlikte örgü prepregler tek seferde iki tabaka yerleştirme imkânı tanır bu sayede işlem kolaylığı sağlar.

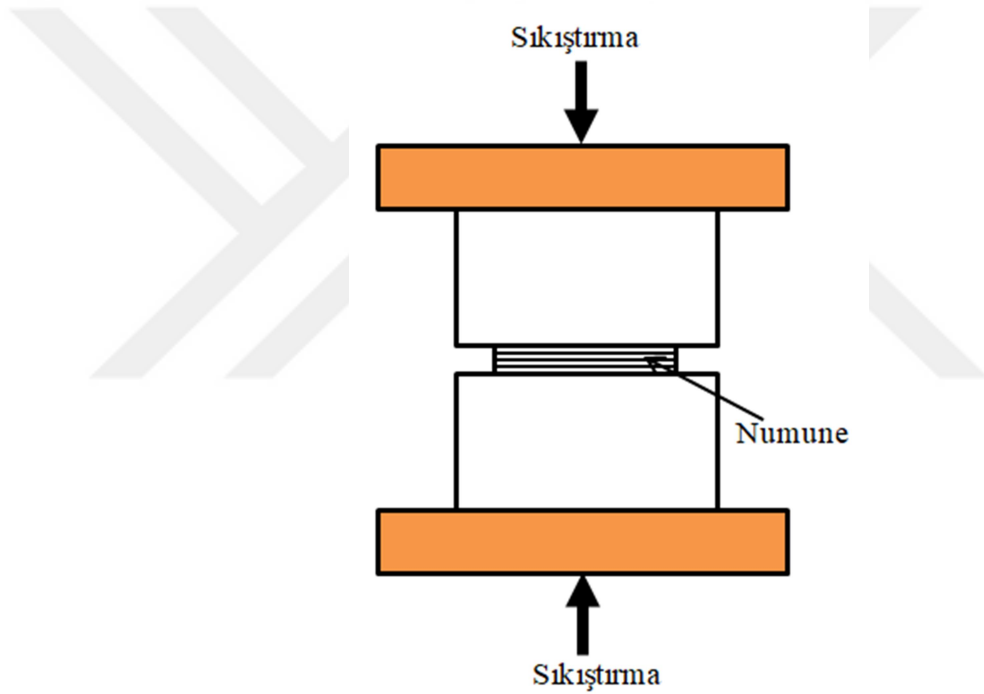


Şekil 2.21. Prepreg çeşitleri, a) Tek yönlü prepreg, b) Örgü prepreg [35]

2.5.1. Sıcak presleme

Tek yönlü sürekli liflerden oluşan prepregler birbirleri üzerine istiflenir ve daha sonra ısıtılmış kalıplar arasına yerleştirilir. Elyafların konumunu muhafaza etmek için elyaflar metal folyeler arasına yerleştirilir ve daha sonra belirli sıcaklıkta presleme yapılır. Presleme sırasında numuneye uygulanacak olan basınç kompozite bağlı olarak 5-150 bar arası uygulanmaktadır. Kompozite uygulanacak sıcaklık ise reçine sıcaklığına bağlı olarak 80-170 C⁰ aralığında uygulanmaktadır. Presleme işlemi sonrası numunenin içyapısında oluşacak gözenekler ortadan kalkar.

Bu yöntem genellikle Alüminyum, Magnezyum, Titanyum alaşımlarının matris olarak kullanıldığı numuneler için kullanılır.



Şekil 2.22. Sıcak presleme sistemi

2.5. Yorulma

Günümüzde kullandığımız makine parçaları ve yapı elemanları kullanımları esnasında tekrarlı yüklemelere maruz kalırlar. Tekrarlı yükler altında çalışan metalik malzemelerde, gerilmeler malzemelerin statik dayanımlarından küçük olmalarına rağmen, belirli bir sıklıkta devam eden bu yüklemeler sonucu genelde yüzeyde olmak üzere çatlaklar meydana gelir. Çatlak oluşumu sonrası ilerleyen aşamalarda malzemede kopma meydana gelir.

Tarihte yorulma olayının önemi 8 Mayıs 1842 yılında Versailles tren kazasından sonra önem kazandı. Çift yönlü trenin ön taraflarındaki lokomotiflerinden birinin askı yorulup koptu. Olayda 75' ten fazla kişi hayatını kaybetti. Kaza ile ilgili yapılan araştırmalar sonrası yorulma terimi tekrarlı baskılardan ortaya çıkan ani kırılmayı tanımlamak için kullanıldı. Sonraki yıllarda yorulma olayını anlamak için belli başlı çalışmalar yapıldı.

Kazadan 8 yıl sonra Wöhler tren askı ile ilgili yaptığı çalışmalarla şu sonuçlara varmıştır.

- Malzeme akma gerilmesinden alt bir değerde tekrarlı yükler altında kırıldı.
- Malzeme ömrünü belirleyen maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığıdır.
- Belirli bir gerilme aralığı limitinde malzeme sonsuz ömürlü görünür [36].

Yorulma; malzemelerin statik dayanımlarından daha düşük yüklemelerde (tekrarlı yüklemeler) malzemede oluşan çatlakların ilerlemesi sonucu oluşan hasara denir. Yorulma olayı ASTM E 1150 standartına göre şöyle tanımlanır. Yorulma olayı: “Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan, lokalize sürekli gelişen, kalıcı yapı değişikliği olayıdır” denilir [37].

2.5.1. Yorulma olayı

Değişken zorlamalara maruz kalan malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler malzemenin kopmasına sebep olur. Kopmaya yol açan değişikliklere de yorulma denir. Burada önemli olan değişken zorlama kavramıdır. Bu kavramı darbeli zorlamayla karıştırmamak gerekir.

Darbeli zorlama;

Malzemeye uygulanacak yükün ani olarak yüklenmesi sonucu ortaya çıkan zorlamaya denir.

Değişken zorlama;

Malzemeye uygulanan yükün zamana bağlı olarak yönünün veya değerinin değiştiği zorlamaya denir.

Değişken zorlamada malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler N (yük değişme sayısına) bağlıdır. Değişken zorlamayı yük değişim sayısına göre 2 kısma ayıracak olursak.

- $N \leq 10^4$ olduğu kısım alçak yük değişim bölgesini kapsar. Bu bölgede meydana gelen kopma olayı statik kopma gibidir. Bu kısımdaki olay yorulma kopması tanımına uymamaktadır.
- $N > 10^4$ olduğu bölge ise yüksek yük değişim sayısının olduğu bölgedir. Bu bölgede statik kopmadan farklı olan yorulma kopması meydana gelir.

Değişken zorlama etkisi $N \geq 10^3$ yük değişme sayısından sonra başlamış olduğu için $N=0$ ve $N=10^3$ değerleri arasındaki zorlamalar statik zorlama olarak kabul edilir [38].

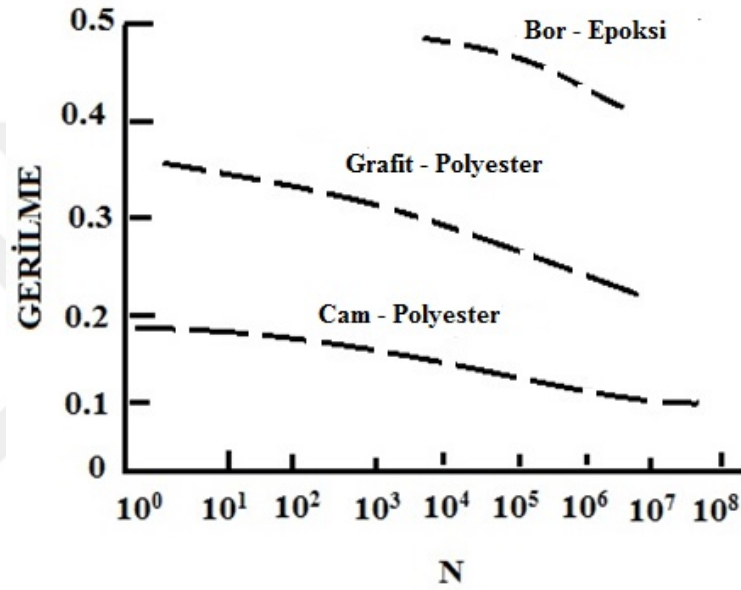
2.5.2. Yorulmaya etki eden faktörler

Kompozitlerde yorulmaya etki eden faktörler şu şekilde sıralanabilir.

- Fiber Özellikleri
- Matris Özelliği
- Tabaka Ayrılması (Delaminasyon)

2.5.2.1. Fiber tipinin yorulma üzerine etkisi

Tek tabakalı yüksek dayanımlı ve yüksek rijitliğe sahip kompozitlerin yorulma dayanımları oldukça yüksektir. Yüksek rijitliğe sahip fiberler, matriste oluşacak şekil değişimini sınırlar, matriste çatlak oluşmasını geciktirirler. Malzemenin statik dayanımı arttıkça yorulma dayanımı da artar. Bu sayede yüksek rijitlik ve dayanıma sahip fiberlerden oluşan kompozitin de yorulma dayanımı artar.

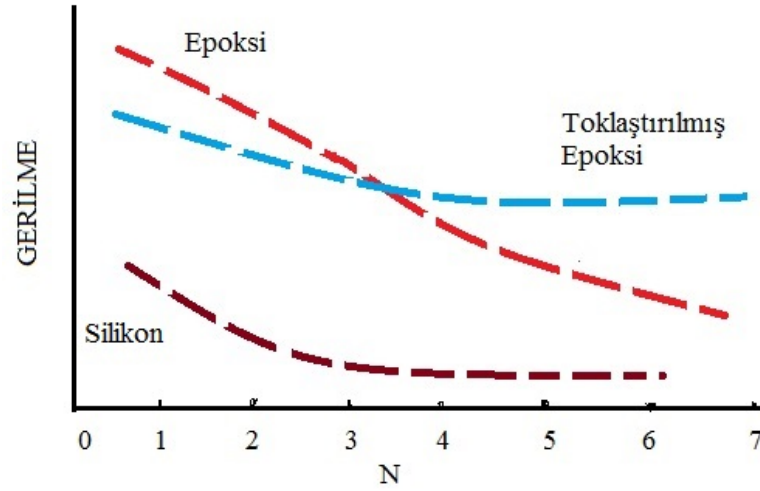


Şekil 2.23. Fiber tipinin yorulma üstünde etkisi [39]

2.5.2.2. Matrisin yorulma üzerinde etkisi

Matrisin görevi fibere uygulanan yükü iletmektir. İmalat yapılırken fiber-matris arasında belli bir hacimsel oran olması gerekmektedir. Matrisin hacimsel olarak az olması yorulma deneyi esnasında fiber-matris arasındaki bağın kopmasına sebep olur. Bu olay ara yüzey ayrılması olarak tanımlanır.

Kullanılan matris malzemesinin tokluğu arttıkça kompozite statik açıdan kazanç sağlar. Gevrek matris takviyeli kompozitler, sünek termoplastik matrisli kompozitlerden daha yüksek yorulma limiti verir.



Şekil 2.24. Farklı tür matris içeren E-Cam takviyeli fiber kompozitlerin matrise bağlı özellikleri [40]

Düşük mukavemetli silikon matrisli malzemenin yorulma mukavemeti de düşük olmuştur. Epoksi matrisli kompozitin yorulma mukavemeti en yüksek değerde çıkmıştır. Sertleştirilmiş epoksi matrisli kompozitin yorulma mukavemeti Epoksi matrisli kompozitten düşük çıkmıştır. Bu da bize sadece matris türü farklı olan aynı tür kompozitin farklı yorulma dayanımlarında sahip olduğunu gösterir [40].

2.5.2.3. Tabaka ayrılması (Delaminasyon) etkisi

Delaminasyon; bir kompozit malzemenin farklı tabakaları arasında oluşup büyüyen çatlak olarak ifade edilir. Delaminasyon 3 şekilde oluşur.

Başlangıç delaminasyonu (Primary Delamination (PD)):

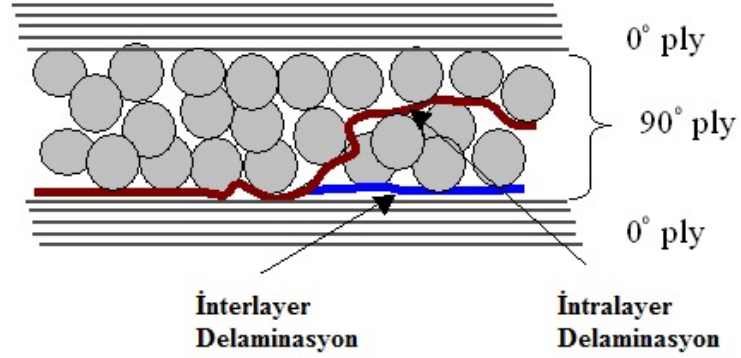
Kompozit malzemenin iç yapısına belli ölçülerde teflon film yerleştirilmesiyle oluşturulan çatlaktır.



Şekil 2.25. Kompozit malzemede başlangıç delaminasyonu (PD) [41]

İnterlayer delaminasyon:

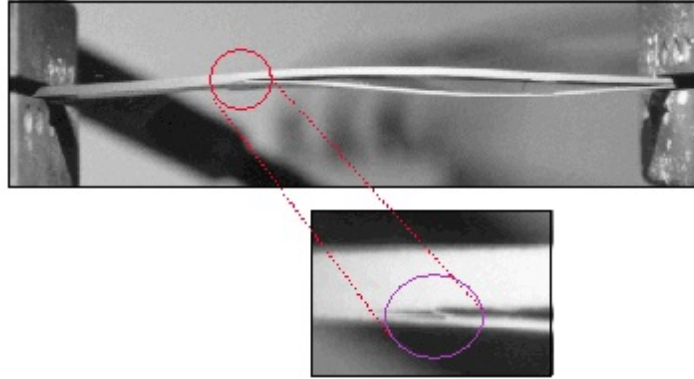
Kompozit tabakalarında kırılma olmaksızın iki farklı tabakanın arayüzeyinde büyüyen bir çatlak ifade eder. Tabaklarda kırılma yapmadığı için bu çatlakın tabakalarla aynı yönde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.26. İnterlayer ve İntralayer delaminasyon [41]

İntralayer delaminasyon:

Kompozit tabakaların arayüzlerinde oluşan çatlaklar nadiren komşu ara yüze sıçar ve çatlak oluşturur. Sıçradığı arayüzdeki katmanları kırar ve oryantasyonu değiştirir.



Şekil 2.27. İntralayer delaminasyon [41]

Bileşik bir bileşenin mekanik davranışı ve ömrü kısmen ara katmanlar ve katmanlar arası delaminasyonlara bağlıdır. İntralayer delaminasyon İnterlayer delaminasyona nazaran büyümeye daha meyillidir ve kırılmaya sebep olur. Buda onu oldukça tehlikeli yapar. Bu nedenle interlayerden intralayere dönmeden gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

2.5.3. Yorulma hasarı oluşumu

Sürekli elyafli polimerik kompozitlerde elyaf doğrultusundaki yorulma direnci metallere nazaran çok daha iyidir. Ancak kompozit malzemeler heterojen ve anizotrop özelliklere sahip olduklarından dolayı yorulma davranışları homojen ve izotrop malzemelere göre karmaşıklık gösterir. Ayrıca kompoziti oluşturan elyafların oryantasyon açılarına bağlı olarakta yorulma davranışları farklılıklar gösterir.

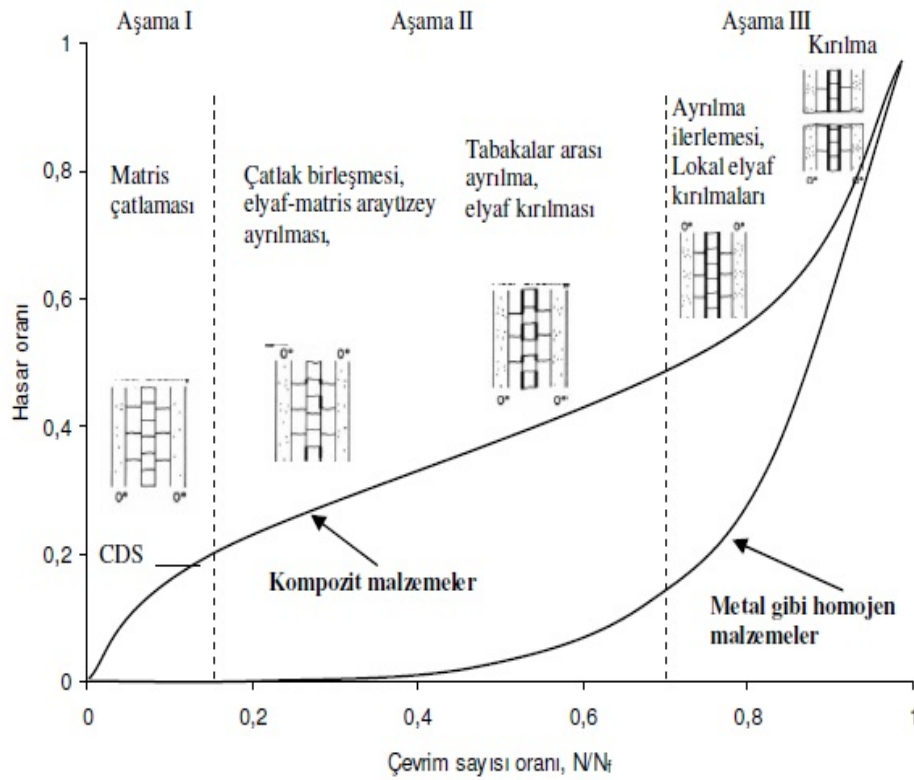
Metal malzemelerde yorulma hasarı genelde tek çatlak şeklinde başlangıçta düşük hızlarda başlar ve yükleme eksenine dik doğrultuda ilerler. Kompozitte ise başlangıç hasar oluşumu metale nazaran daha hızlı gerçekleşir ve hasar tüm parçada meydana gelir.

Kompozit malzemede hasar ise birçok şekilde oluşur.

- Matris çatlaması
- Elyaf-matris ara yüzey ayrılması
- Tabaka ayrılması
- Elyaf kırılması

Kompozit malzemelerde hasar oluşumunu aşamalı olarak açıklayacak olursak;

- İlk aşamada ağırlıklı olarak matris çatlaklarında hasar meydana gelir ve yorulma ömrünün %10-%25'inde gerçekleşir. Bu aşamada malzemede mukavemet azalması oldukça küçüktür.
- İkinci aşama elyaf-matris ara yüzeyleri ayrılması ve tabakalar arası ayrılma başlangıcının olduğu aşamadır. Bu aşamada hasar oluşumu ve ilerleme süresi birinci aşamaya nazaran oldukça yavaştır. Yorulma ömrünün %70-%80'i bu aşamada harcanmaktadır.
- Üçüncü aşamada ise ikinci aşamada ayrılmaya başlayan tabakalar ayrılır ve ayrılma sonrası elyaf kırılması meydana gelir. Elyaf kırılmalarından sonra malzeme kopmaktadır. Bu aşama en hızlı gerçekleşen aşamadır [42].



Şekil 2.28. Kompozit malzemeler ve metal gibi homojen malzemeler için yorulma ömrü boyunca oluşan hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca oluşan hasar tipleri [43]

Metal malzemelerde yorulma hasarı genelde tek çatlak şeklinde başlangıçta düşük hızlarda başlar ve yükleme eksenine dik doğrultuda ilerler. Kompozitte ise başlangıç hasar oluşumu metale nazaran daha hızlı gerçekleşir ve hasar tüm parçada meydana gelir.

Tek tabakalı:

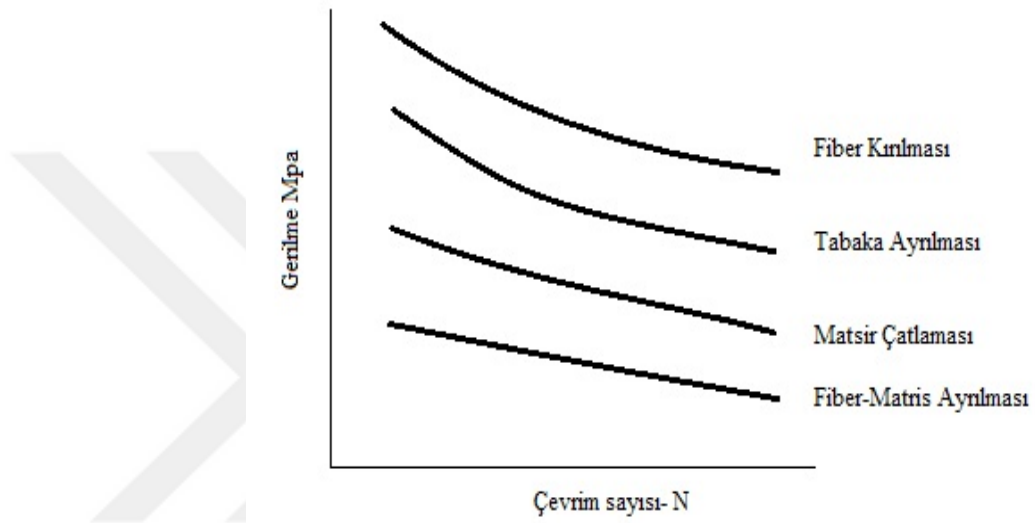
Tek yönlü ve tek tabakalı kompozitlerde yorulma hasarı 3 aşamada oluşur.

- Fiber kırılması
- Matris çatlağı
- Fiber- Matris ayrılması

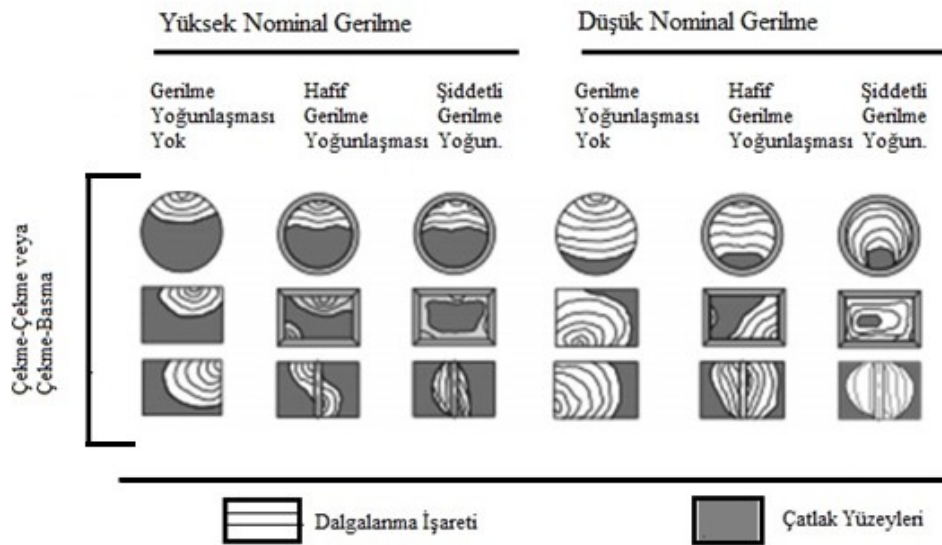
Burada Fiber kırılması olayı fiberin mukavemetine bağlıdır. Fiberin rijitliği yüksek ise şekil değiştirme esnasında kısmi olarak matrise destek olarak matrisin çatlamasını geciktirir. Eğer fiber-matris ara yüzünde ayrılma meydana gelirse bu durum fiber/matris arasında zayıf bir mukavemet olduğunu gösterir.

Çok tabakalı:

Çok tabakalı kompozitlerde hasar oluşum durumu tek tabakalıya göre daha farklıdır. Burada tek tabakada görülen fiber kırılması, matris çatlağı, fiber-matris ayrılmasına ilaveten yorulma gerilmesinin sebep olduğu tabaka ayrılması hasarı meydana gelir. Çok katlıda öncelikle elyaf-matris ara yüzey ayrılması meydana gelir. Fiber-matris ara yüz ayrılma sonrası gerilme ile birlikte matris çatlakları meydana gelir. Bu çatlaklar elyaf yönlenmesine dik olacak şekilde meydana gelir.



Şekil 2.29. Kompozit malzemelerde yorulma hasar şekli S-N grafiği [40]

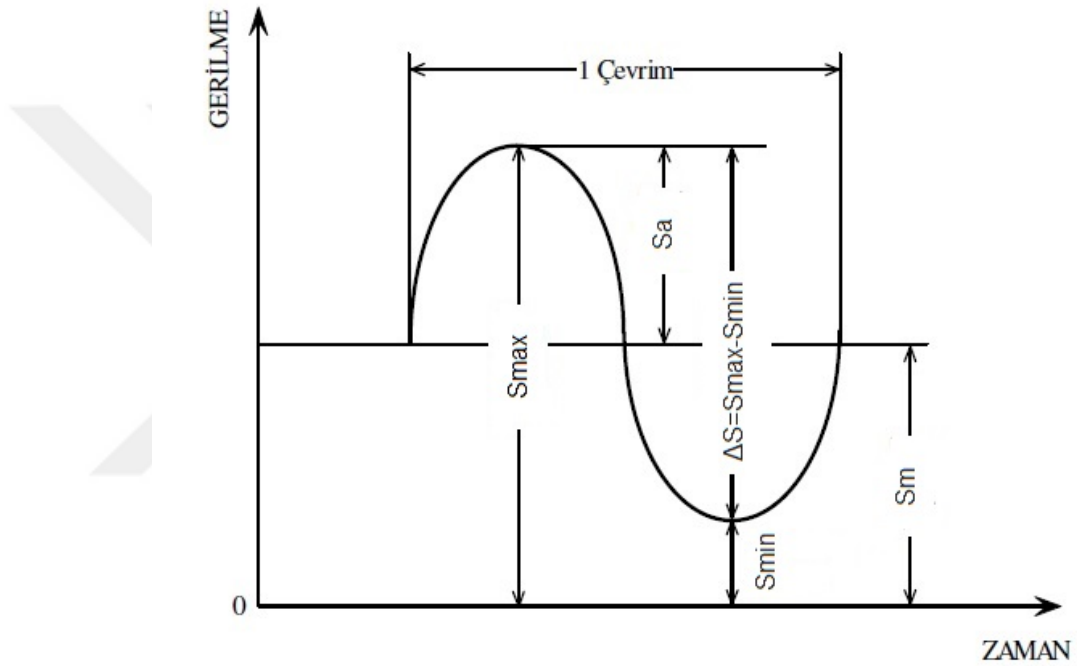


Şekil 2.30. Yorulma hasar şekilleri [44]

2.5.4. Yorulma deneyi

Yorulma deneylerinde çoğunlukla kullanılan yüklemenin şekli sinüs dalgası gibidir. Gerçek yükleme durumunda sinyaller sinüs gibi olmaz, bu yüzden çevrim 1/2 tekrar kullanılır ve sinüs şekil elde edilir. Bir tekrar gerilmenin maksimum değeri çıkıp oradan minimuma indikten sonra tekrar maksimuma çıkmasıyla oluşur. Bu durumda tam bir periyot olmuş olur.

Maksimum ve minimum gerilmenin belirlenmesiyle; gerilme aralığı ΔS , gerilme genliği S_a , ortalama gerilme S_m ve yükleme oranı R-Ratio kolaylıkla hesaplanır.



Şekil 2.31. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme tipi [40]

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min} \quad (2.1)$$

$$(S_a, S_{\text{amp}}) = (S_{\max} - S_{\min})/2 \quad (2.2)$$

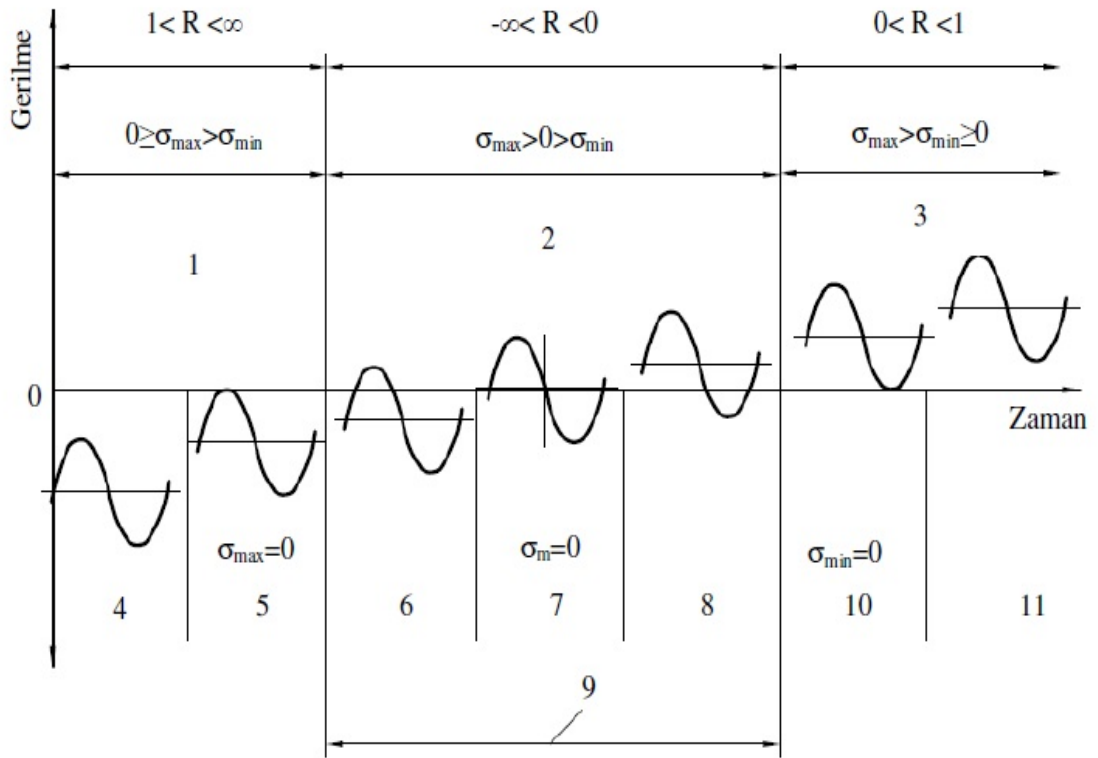
$$(R\text{-Ratio}) = S_{\min}/S_{\max} \quad (2.3)$$

$$(S_m) = (S_{\max} + S_{\min})/2 \quad (2.4)$$

$R = S_{\min}/S_{\max}$ değeri, çevrimsel yüklemenin tipini gösteren değerdir. Farklı R değerleri için yükleme tipleri aşağıdaki gibidir [40].

Tablo 2.6. R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları [40]

Yorulma Yükleme Oranı	Yorulma yükü modu
$R=1$	Statik Yükleme
$R=0$	Çekme-Yüksüz
$0<R<1$	Çekme-Çekme
$R=-1$	Çekme-Basma , Tam Ters
$-1<R<0$	Çekme- Basma

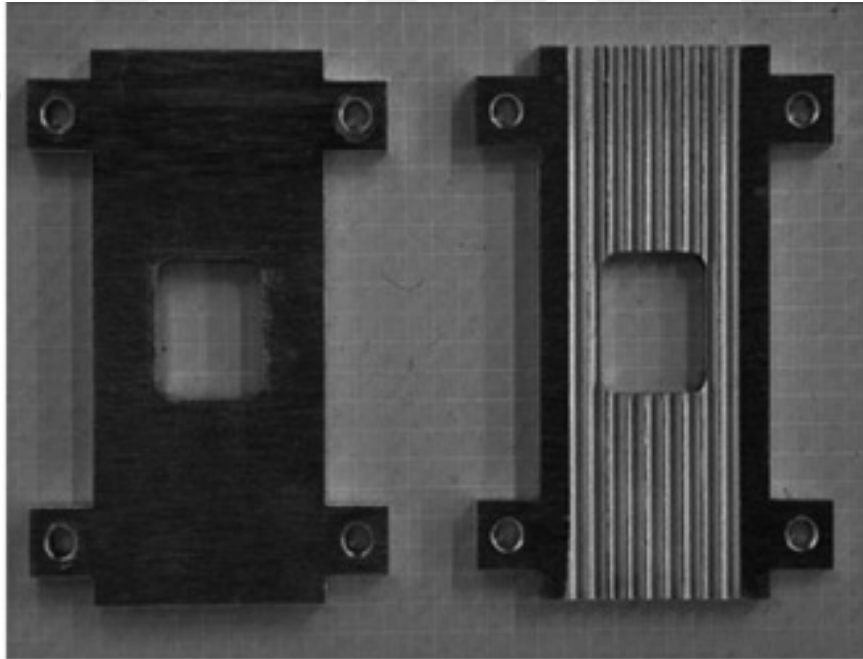
**Şekil 2.32.** Yorulma deneylerinde kullanılan çevrimsel yükleme tipleri [45]

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1- Basma-basma bölgesi | 7- Tam ters veya alternatif çevrim |
| 2- Çekme-basma bölgesi | 8- Çekme ağırlıklı alternatif çevrim |
| 3- Çekme-çekme bölgesi | 9- Alternatif çevrim |
| 4- Basma-basma çevrimi | 10- Sıfır-çekme çevrimi |
| 5- Sıfır-basma çevrimi | 11- Çekme-çekme çevrimi |
| 6- Basma ağırlıklı alternatif çevrim | |

Kompozit malzemelerde yorulma testi sırasında numune tutucun kavrama bölgesinde hasar, basma yükü uygulandığı sırada burkulma olayının olması ve yüksek frekansta uygulanan çevrimsel yük sırasında numunede sıcaklık artışı gibi problemler gözlemlenmektedir.

Numunenin kavrama bölgesinde oluşan hasarı minimize etmek için cihazın uyguladığı kavrama basıncı mümkün olduğunca düşük tutulmalı ve numunenin kavranan kısmına destek parçaları yapıştırılmalıdır. Bu çalışmamızda; kullandığımız numunelerde bu sorunu ortadan kaldırmak için numunenin alt ve üst uç kavrama bölgelerine destekleme parçaları yapıştırıldı. Destekleme parçası olarak 50x30x1 mm'lik alüminyumlar kullanıldı.

Çekme-basma ve basma-basma yorulma testleri çekme-çekme yorulma testlerine nazaran gerçekleştirilmesi daha problemli deneylerdir. Çünkü çekme-basma veya basma-basma deneyinde oluşan burkulmayı önlemek için ek önlemler almak gerekmektedir. Önlem olarak numune boyunun kısa olması ve numune kararlılığının yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca burkulmayı önlemek için ek teçhizatlarla kullanmak gerekmektedir.



Şekil 2.33. Yorulma deneyleri için burkulma önleyici test aparatı [2]

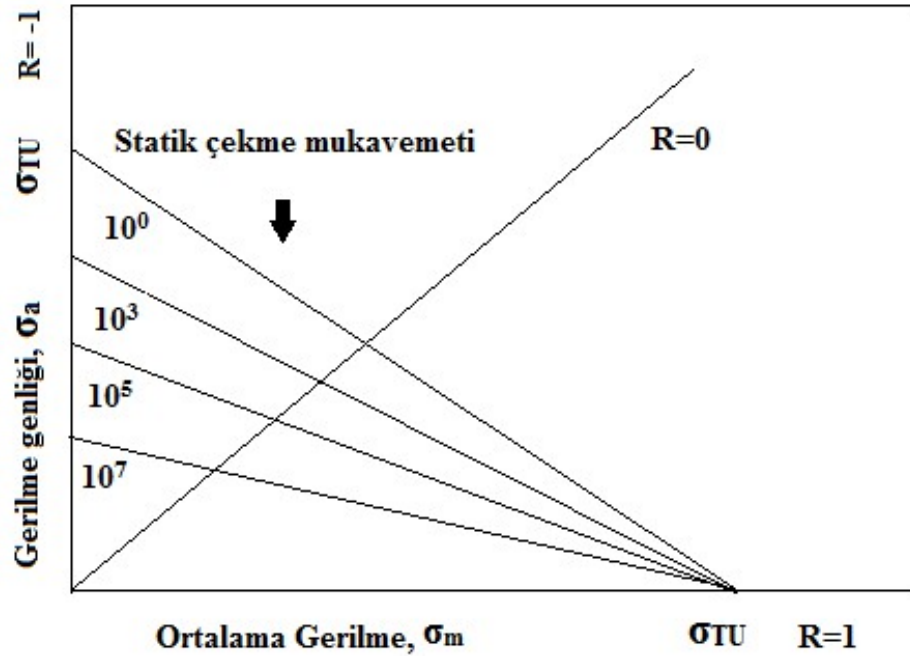
2.5.5. Yorulma mukavemetine ortalama gerilme etkisi

Herhangi bir yük genliğinde bir çevrim ömür için hesaplanan yorulma mukavemeti ortalama gerilmeye bağlıdır. Ortalama gerilme (σ_m) arttıkça gerilme genliği (yorulma mukavemeti, σ_a) azalmaktadır. Oluşabilecek tüm mümkün yük değerleri için yorulma ömrünü hesaplamak oldukça uzun sürmektedir. Bu yüzden bu işlemten kaçınmak için genellikle ampirik (deneysel) bir metot olan Goodman eğrisinden faydalanılır. Goodman eğrisinde yorulma mukavemeti ile ortalama gerilme lineer bir ilişki içindedir ve biri arttıkça diğeri azalmaktadır. Goodman diyagramında parametre olarak gerilme genliği (verilen bir ömür için yorulma mukavemeti, σ_a), ortalama gerilmenin sıfır olduğu yorulma mukavemeti (σ_a^0 = tam ters yükleme), ortalama gerilme (σ_m) ve çekme mukavemeti (σ_{TU}) kullanılır. Bu parametreleri formüllerle ifade edecek olursak.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_a^0} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TU}} \quad (2.5)$$

Çelik gibi metallerin sahip olduğu gerilme sonsuz yorulma ömrünü sağlar. Malzemeler bu gerilme altında yorulma hasarına uğramazlar. Bu tür malzemeler için dayanım sınırı denilen bir değere başvurulur. Alüminyum gibi metallerde ise bu tür durumlarda başvurulacak bir dayanım sınırı bulunmamaktadır. Bu nedenle alüminyum gibi metallerde yaklaşık bir yorulma ömrü seçilmelidir. Bu yaklaşık yorulma ömrü 10 milyon, 1 milyon, 100.000 cycle (devir) ömürdür [40].

Goodman diyagramında kullanılan “Goodman çizgileri” statik yüklemeler için 10^3 , 10^5 , 10^7 gibi yorulma ömürlerinde çizilmiştir. Bu durum Şekil 2.34’te detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.34. Metal yorulması için tipik bir master diyagram [40]

2.5.6. Yorulma ömrü hesaplama

Yorulma ömür hesabı için en çok kullanılan yöntemler 3’e ayrılır.

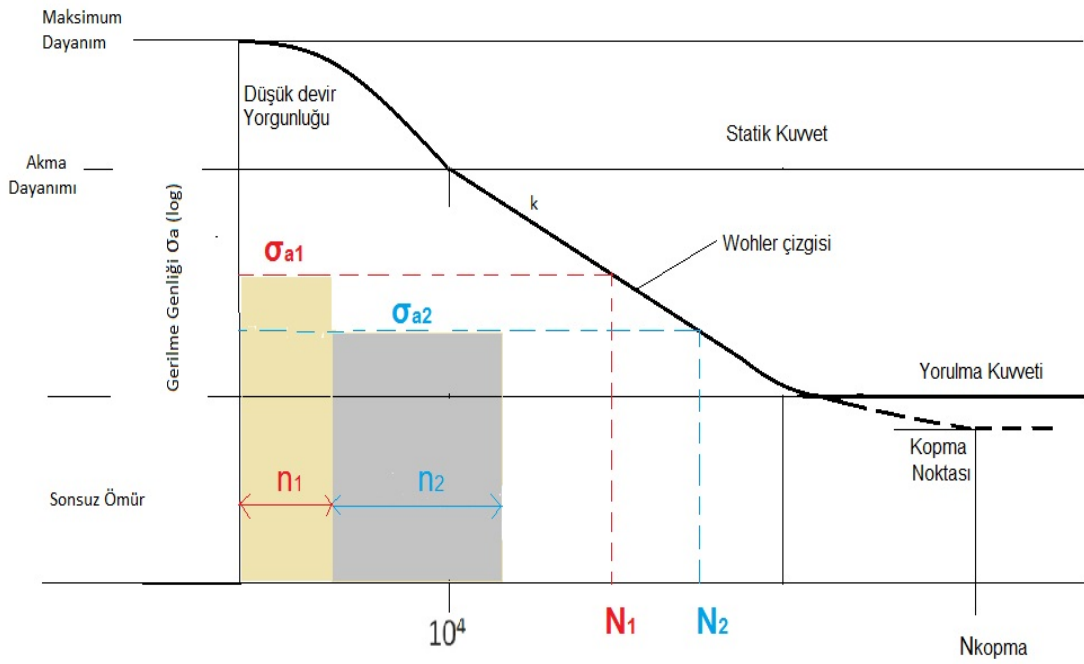
- S-N (Gerilme-Çevrim sayısı): Bu diyagramda malzemenin genel kesit gerilmesi ya da lokal elastik gerilme ile toplam ömür arasında ilişkilendirme yapılır.
- ϵ -N (Gerinim-Ömür): Bölgesel gerinim değerinin çatlak başlangıcı ile ilişkilendirilmesidir.
- LEFM (Çatlak yayılması): Bu yöntemde çatlak ilerlemesini gerilme yoğunluğu ile ilişkilendirir.

Bu tez çalışmasında Wöhler ya da S-N eğrisi olarak bilinen yorulma ömür hesabı yöntemi kullanıldı. S-N eğrisini detaylı açıklayacak olursak.

2.5.6.1. Wöhler S-N eğrisi

Yorulma ömrü, numuneye uygulanan maksimum gerilme sürecinde hasarın oluştuğu çevrim sayısı olarak ifade edilir. Yorulma ömrünü belirleyen parametreler ortalama gerilme (σ_m) ve yükleme oranı (R)'dır. Çünkü yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, yüklemenin durumuna ve çevre şartlarına bağlıdır.

Yorulma testi grafiğinde hasarın meydana geldiği çevrim sayısı logaritmik skalada yatay eksenle gösterilir, gerilme değerleri de düşey eksenle olacak şekilde şematize edilir.



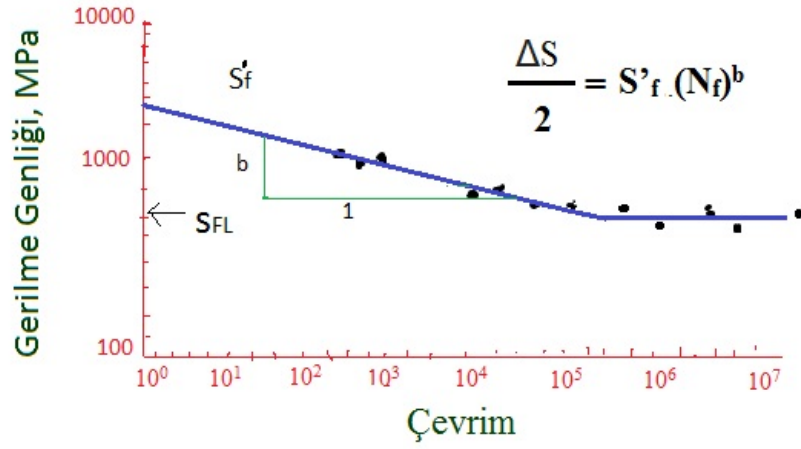
Şekil 2.35. Wöhler (S-N) eğrisi [46]

Düşük ömürlü yorulmalarda $\sigma_{\max} > \sigma_a$ 'dır. Numune kopma çevrim sayısı $N \leq 10^4$ 'dur.

Yüksek ömürlü yorulmalarda ise $\sigma_{\max} < \sigma_a$ 'dır. Numune kopma çevrim sayısı $N \geq 10^4$ 'dur.

Sonsuz ömür için çevrim sayısı $1 \times 10^6 - 100 \times 10^6$ arasında değişmektedir.

Yorulma ömür hesabı aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.36. Gerilme genliği- ömür eğrisi [47]

S'_f = b eğrisinin y- eksenini kestiği nokta

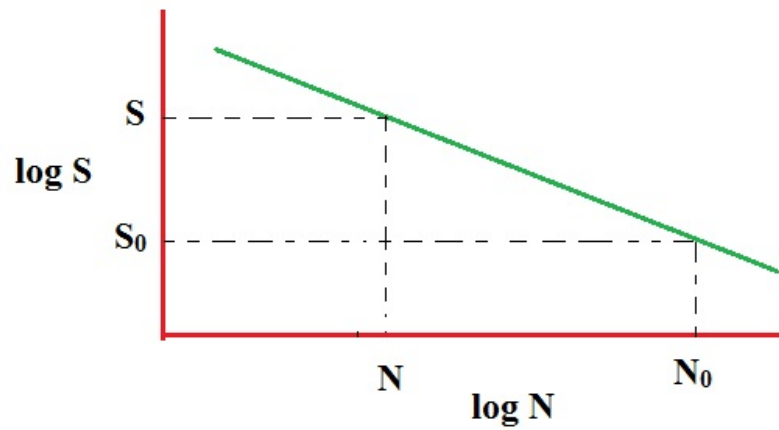
S_{FL} = Sonsuz ömür çizgisi

$\Delta S/2$: Gerilme genliği

N_f = Çevrim

$b = - (\log S - \log S_0) / (\log N_0 - \log N)$

$\log N = \log N_0 + 1/b \log(S/S_0)$



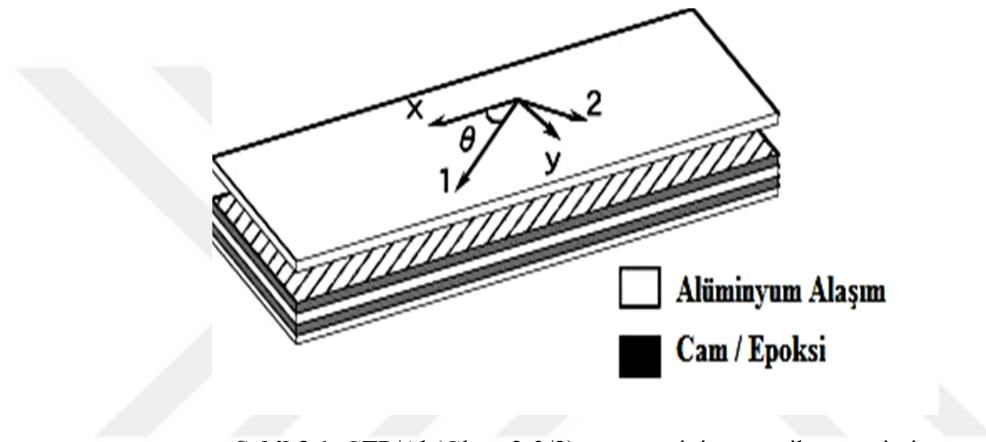
Şekil 2.37. Log S- Log N eğrisi [47]

Yukarda verilen formülleri kullanarak, imal ettirdiğimiz Glare-2/3 numunesinin S-N diagramlarını çizip sonuçları yorumladık.

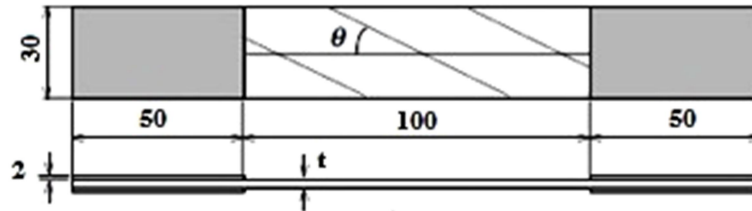
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler ve Numuneler

Bu çalışmada kullanılan tek yönlü GLARE-2-3/2 tabakalı hibrit kompozit plaklar İzmir’de bulunan FİBERMAK Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. firmasında üretildi. Glare-2-3/2 numuneleri sıcak presleme yöntemiyle alüminyum ve prepreg kompozit plakaların istiflenmesiyle üretilmiştir. Prepreg kompozit epoksi reçine ve E-cam elyaf malzemesinden oluşmaktadır. Tabakalı hibrit kompozit plaklar 5 tabakadan oluşmaktadır. Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi 3 tabaka Alüminyum, 2 tabaka E-cam/epoksi’ den meydana gelmektedir. Şekil 3.2’ de üretim sonrası numunenin (Glare-2’nin) geometrik ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. CTP/Al (Glare-2-3/2) numunesinin şematik gösterimi



Şekil 3.2. CTP/Al (Glare-2-3/2) numune boyutları

Glare-2-3/2 (CTP/Al) oluşturan malzemeleri açıklayacak olursak:

- CTP (Cam fiber takviyeli plastik) malzemesi Cam fiber ve Epoksi’ den meydana gelmektedir. Cam fiber olarak E-cam seçilmiştir. E-camın seçilme sebebi yüksek mukavemet değerine ve korozyon direncine sahip olmasından ötürüdür.
- Epoksi reçine olarak Araldite LY1564 ve sertleştirici olarak Aradur 3487 kullanılmıştır.

➤ Alüminyum alaşımı olarak Al 5754 seçilmiştir. Al 5754'nin yorulma dayanımı yüksek olduğu için tercih edilmiştir. Ayrıca E-camda olduğu gibi alüminyumun da korozyon direnci oldukça yüksektir ve bir arada kullanılmaları korozyon direnci açısından önemli bir kazanım oluşturmaktadır.

$\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ gibi 7 farklı fiber oryantasyon açısına sahip hibrit kompozit plakalardan numune boyutları Şekil 3.2' de verilen ASTM D3479 standardına göre kesilmiştir. Üretim sonrası hazırlanan test numuneleri Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.3. İmalat sonrası GLARE-2-3/2 deney numunesi

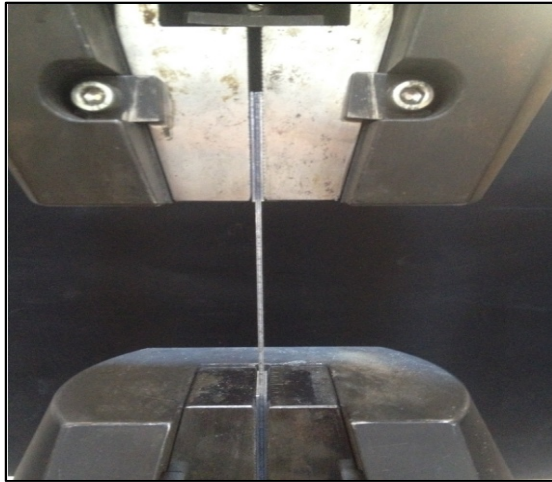
Numuneler yorulma test parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle statik olarak çekme testlerine tabi tutuldu. Tüm oryantasyon açıları için 3' er adet numune test edildi. Elde edilen test sonuçları kullanılarak yorulma için $R = 0,3$; $R = 0,1$ ve $R = -0,1$ yük oranları tespit edildi. Bu üç farklı R-oranı ile yorulma testlerine gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Statik çekme testi

Çekme testleri, Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 250 kN yük kapasiteli Shimadzu Marka Universal Çekme Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° gibi farklı oryantasyon açılarına sahip numuneler, (Glare-2) yorulma testi yükleme oranının (R-oranı) belirlenmesi için her oryantasyon açısı için 3'er adet numune kullanılarak 1 mm/dak hız ile statik çekme testleri gerçekleştirildi (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Böylece her oryantasyon açısı için numunelerin dayanabileceği maksimum yük değerleri belirlendi.

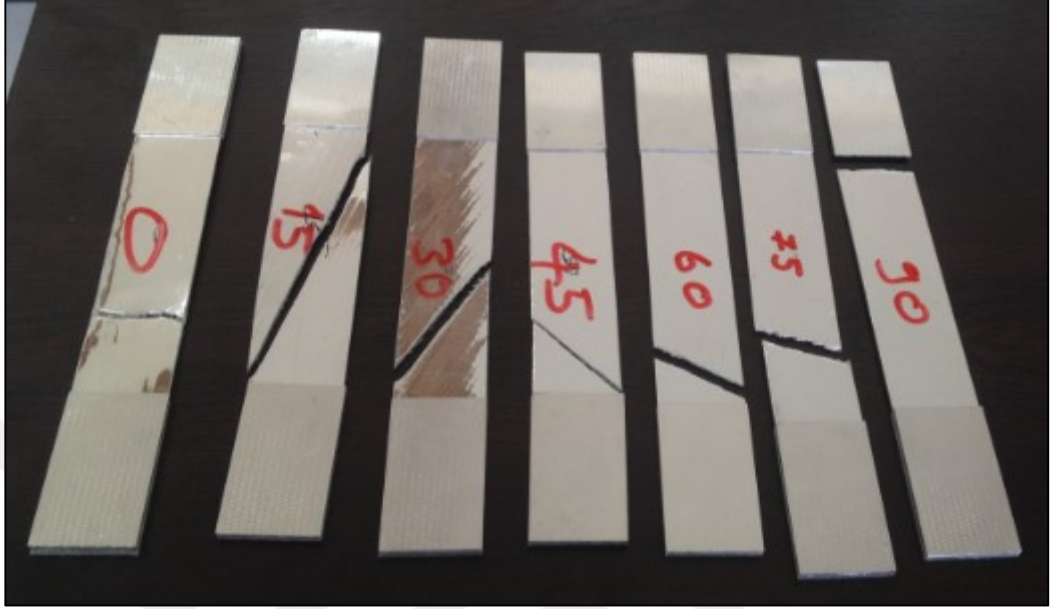


Şekil 3.4. Çekme test cihazı



Şekil 3.5. Numunenin cihaza bağlanmış biçimi

Statik çekme testleri tüm numuneler için yapıldıktan sonra numunelerin hasarlı görüntüleri Şekil 3.6’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi numuneler genel olarak oryantasyon açıları doğrultusunda kopma hasarına uğramıştır.



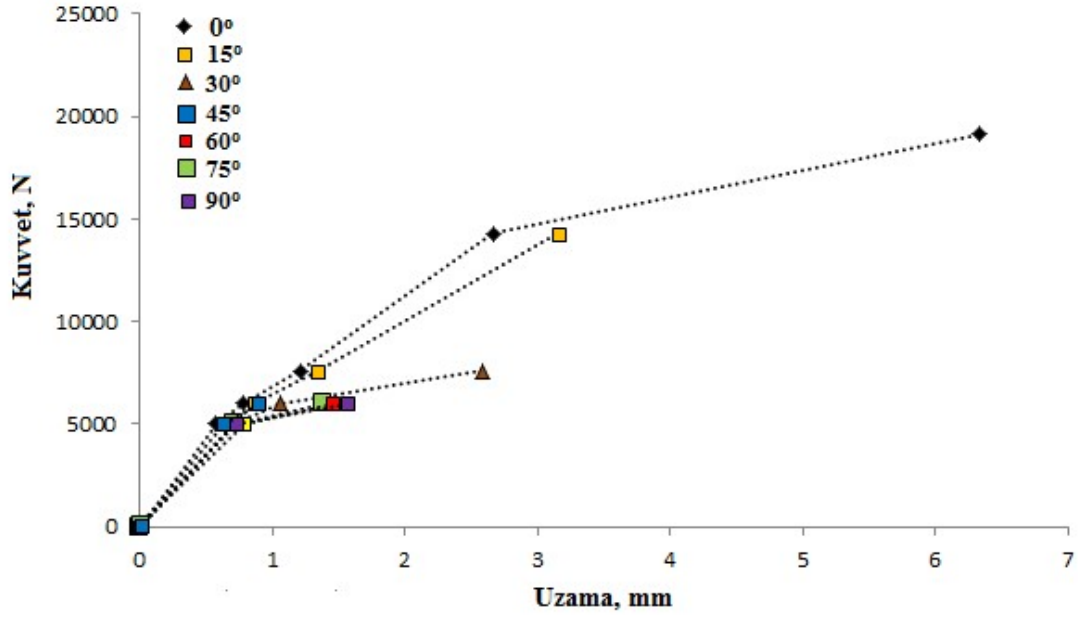
Şekil 3.6. Çekme testi sonrası oryantasyon açısına bağlı kopma biçimleri

Çekme test sonuçlarının tüm oryantasyon açıları için elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin ortalamaları Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tüm oryantasyon açıları için numunelere ait statik çekme test sonuçları

Oryantasyon Açısı (θ)	(P_{Max}) _{ort}	Oryantasyon Açısı (θ)	(P_{Max}) _{ort}
0°	19145 N	75°	6258 N
15°	14301 N	90°	6129 N
30°	7606 N	AL	2871 N
45°	6797 N		
60°	6477 N		

Elde edilen çekme test sonuçlarının, oryantasyon açılarına bağlı davranışlarının daha iyi gözlemlenebilmesi için kuvvet-uzama grafiğinden faydalanıldı. Oryantasyon açısına bağlı kuvvet-uzama grafiği Şekil 3.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Oryantasyon açısına bağlı kuvvet-uzama grafiği

Aşağıdaki tabloda oryantasyon açısına bağlı % azalma oranları verilmiştir. % azalma oranları 0° oryantasyon açısı ile diğer oryantasyon açılarının kıyaslanması şeklinde ele alınmıştır.

Tablo 3.2. Oryantasyon açılara bağlı yüzde azalma oranları

Oryantasyon Açısı (θ)	% Azalma
0°-15°	25,30
0°-30°	60,27
0°-45°	64,49
0°-60°	66,17
0°-75°	67,31
0°-90°	67,99

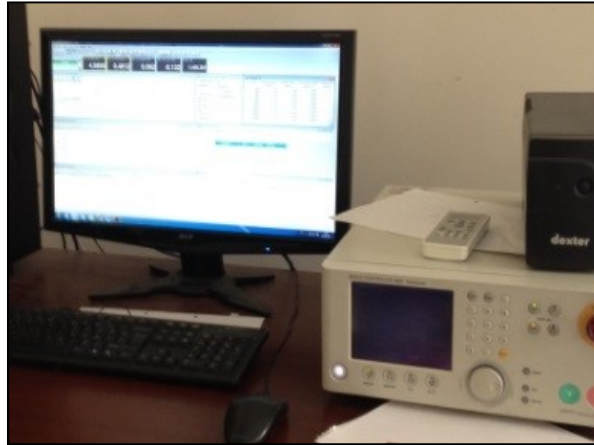
Yukarıda verilen tablolar yardımı ile tabakalı hibrit kompozit numunelerin yorulma yük oranlarının tespiti için maksimum statik yük değerlerinin %25-%75'i alındı. Böylece her R yükleme oranı için ($R = R_{\min}/R_{\max}$) gereken maksimum ve minimum yük değerleri hesaplanmış oldu.

3.1.2. Yorulma (Dinamik) testi

Yorulma testleri de Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN yük kapasiteli Shidmadzu Marka Servo Pulser Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Yorulma testi için yük oranları ($R = 0,3$; $R = 0,1$ ve $R = -0,1$) maksimum statik çekme yük değerleri kullanılarak tespit edilmiştir. Şekil 3.8.'de yorulma test cihazı ve Şekil 3.9.'da cihaz kontrol ünitesi verilmiştir. Elde edilen test sonuçları kullanılarak $R = 0,3$; $0,1$; $-0,1$ olmak üzere üç farklı yükleme oranında sabit genlikli yorulma testleri gerçekleştirildi. Yorulma testleri 15 Hz frekanslı bir sinüzoidal dalga şeklinde uygulandı. Tüm yorulma testlerinde kopma hasarı oluşuncaya kadar teste devam edilmiştir.



Şekil 3.8. Hidrolik yorulma test cihazı



Şekil 3.9. Kontrol ünitesi

Numuneler belirlenen yükleme oranlarında sırasıyla yorulma test cihazına bağlandılar (Şekil 3.8 ve Şekil 3.10). Numune sabitleme işlemi bittikten sonra Şekli 3.9’ da gösterilen kontrol ünitesi ve bilgisayar yardımı ile numuneler belirlenen R oranlarında sırasıyla yorulma testlerine tabi tutuldular.

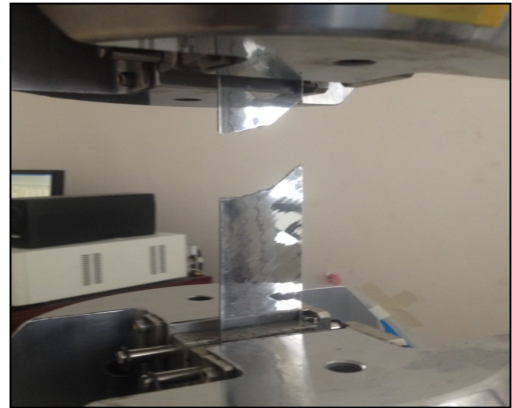


Şekil 3.10. Numunenin cihaza bağlanması

$R = 0,3$; $0,1$ ve $-0,1$ yükleme oranlarında tüm oryantasyon açıları için yorulma testleri gerçekleştirildi. Testler esnasında numunede çataklar ilk olarak iç kısımda ve sonrasında yüzeye doğru ilerlediği görüldü. Bu olayları şekillerle gösterecek olursak. Şekil 3.11’ de 15° oryantasyon açısına sahip numunede oluşan yüzey çatlağı, Şekil 3.12’ de ise çatlama sonrası kopman numune biçimi görülmektedir.



Şekil 3.11. Numune yüzey çatlağı



Şekil 3.12. Kopma olayı sonrası numune

Yorulma sonucu numunelerde meydana gelen kopma şekillerinin oryantasyon açılarına bağlı davranışlarını göz önüne almak için $R = 0,3$ ve $R = 0,1$ yükleme oranlarında numunelerde meydana gelen kopma şekilleri aşağıda verilmiştir. Şekil 3.13' te $R = 0,3$ yükleme oranı için oryantasyon açısına bağlı kopma şekilleri, Şekil 3.14' te ise $R = 0,1$ yükleme oranı için oryantasyon açılarına bağlı kopma şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.13. $R = 0,3$ yükleme oranı için oryantasyon açılarına bağlı kopma şekilleri



Şekil 3.14. $R = 0,1$ yükleme oranı için oryantasyon açılarına bağlı kopma şekilleri

Testlerin tamamlanmasından sonra elde edilen veriler kullanılarak S-N diyagramları çizildi. Çizilen diyagramlar detaylı bir şekilde aşağıda grafikler yardımıyla yorumlandı.

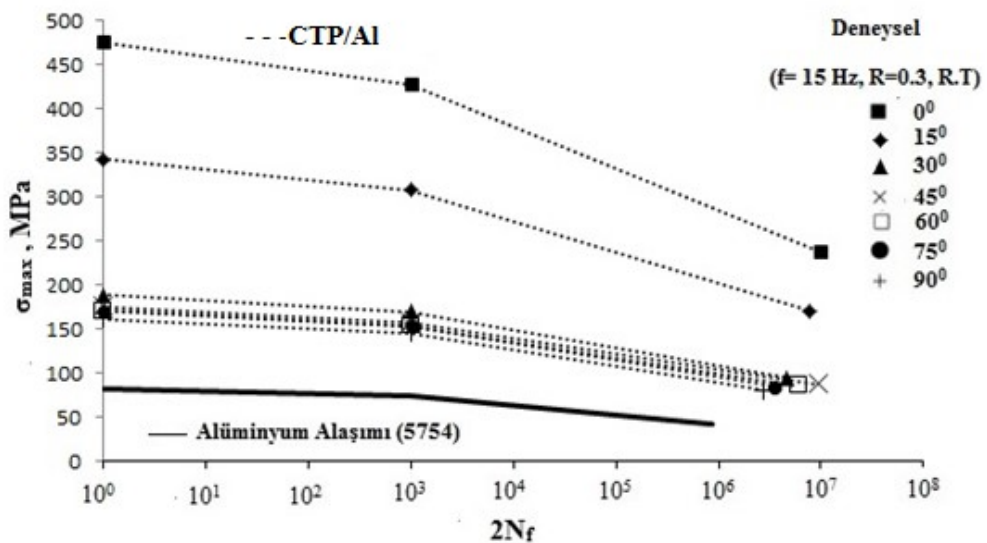
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Yükleme Oranlarına Bağlı S-N İlişkisi

Yorulma testleri bittikten sonra numunelerin yorulma davranışlarının daha iyi incelenmesi için S-N diyagramlarından faydalandı. Grafikler logaritmik skalada çizilmiştir. Gerçek yükleme durumunda, sinyaller sinüs şeklinde olmadığı için tam tekrar görülmeyebilir, bu yüzden çevrimde 1/2 tekrar kullanıldı. $N_f = 0,5$ olacak şekilde $2N_f$ olarak grafikler çizildi.

R = 0,3 yükleme oranı:

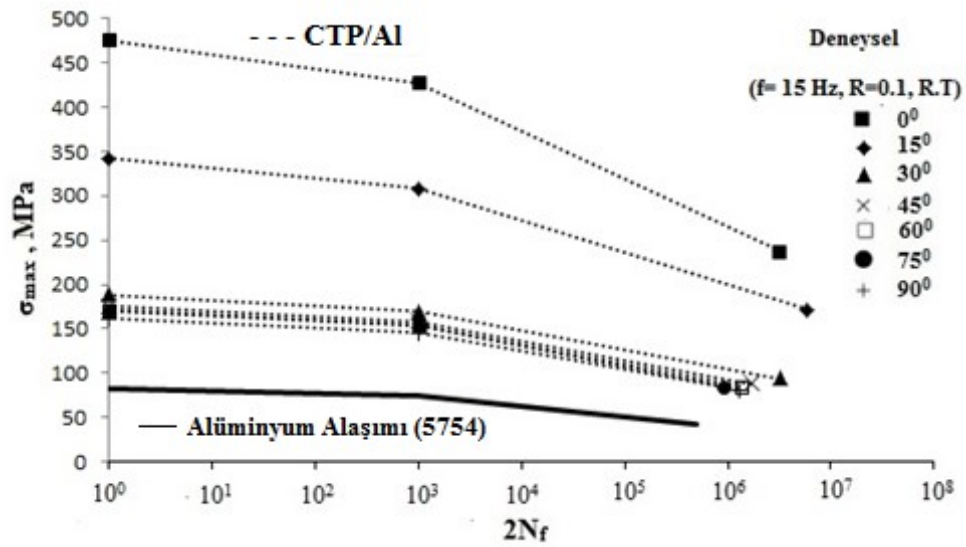
Şekil 3.15' te R = 0,3 yükleme oranı için $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ oryantasyon açılarına sahip numunelerin yorulma ve ömür (S-N) ilişkileri verilmiştir. R = 0,3 yükleme oranında numuneler oryantasyon açıları göz önüne alındığında en yüksek yorulma ömrü $\theta = 0^\circ$ de görülmüştür ve oryantasyon açısı 0° den 90° ye doğru numune yorulma ömründe oryantasyon açısına bağlı olarak (45° hariç) düşme meydana gelmiştir. Ayrıca en yüksek yorulma dayanımı 0° oryantasyon açılarında sahip numunelerde elde edilmiştir. $10^3 \leq N_f \leq 10^7$ aralıkları göz önüne alındığında 0° ve 15° oryantasyon açıları için yorulma dayanımındaki düşüş diğer oryantasyon açılarından daha büyüktür ve 10° - 10^7 'e doğru yorulma dayanımında yaklaşık 2 kat azalma meydana gelmiştir. Tüm CTP/Al hibrit kompozit numuneler için elde edilen yorulma dayanımları alüminyum alaşımından elde edilen yorulma dayanımlarından daha yüksek olmuştur.



Şekil 3.15. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin R = 0,3 yükleme oranındaki davranışı

R = 0,1 yükleme oranı;

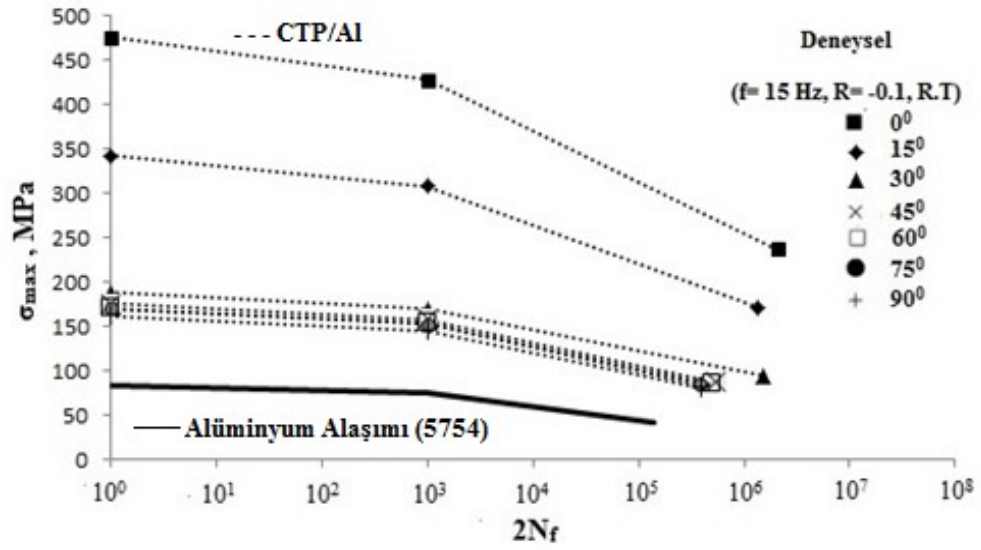
R = 0,1 yükleme oranında numuneler oryantasyon açıları göz önüne alındığında en yüksek yorulma ömrü $\theta = 15^\circ$ de görülmüştür ve oryantasyon açısı 0° den 90° ye doğru gidildikçe numune yorulma ömründe oryantasyon açısına bağlı olarak azalma meydana gelmiştir (Şekil 3.16). Yükleme oranı azaldıkça (R = 0,3' ten R = 0,1' e) numunelerin yorulma ömründe düşüş meydana geldiği 10^6 devire doğru yaklaşmaktadır. 90° lik oryantasyon açısına sahip numune 75° lik oryantasyon açısına sahip numuneden daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 3.16. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin R = 0,1 yükleme oranındaki davranışı

R = -0,1 yükleme oranı;

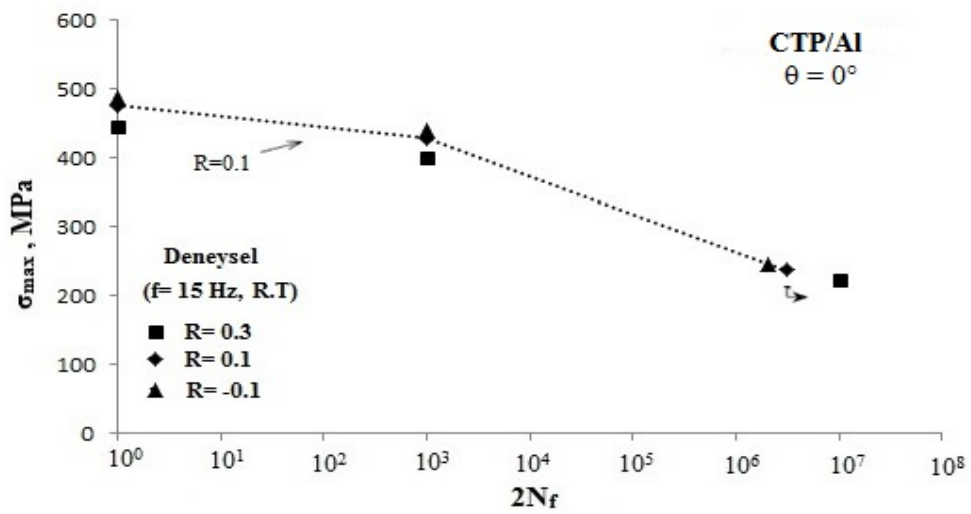
R = -0,1 yükleme oranında numuneler oryantasyon açıları göz önüne alındığında en yüksek ömür $\theta = 0^\circ$ de görülmüştür. R = -0,1' de yükleme tipi çekme-basma şeklinde olur. En düşük yorulma ömrü bu yükleme oranında gözlemlenmiştir. Bu da bize yükleme oranının R = 0,3' ten R = -0,1' e doğru gidildikçe yani yükleme oranı sayısal olarak azaldıkça numunelerin yorulma ömründe azalma görülmüştür. R = 0,1 ve R = -0,1 yükleme oranlarında 30° den sonra 45° , 60° , 75° , 90° ye doğru oryantasyon açılarında sola doğru yönelimli bir yorulma ömrü azalımı (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17) görülmektedir.



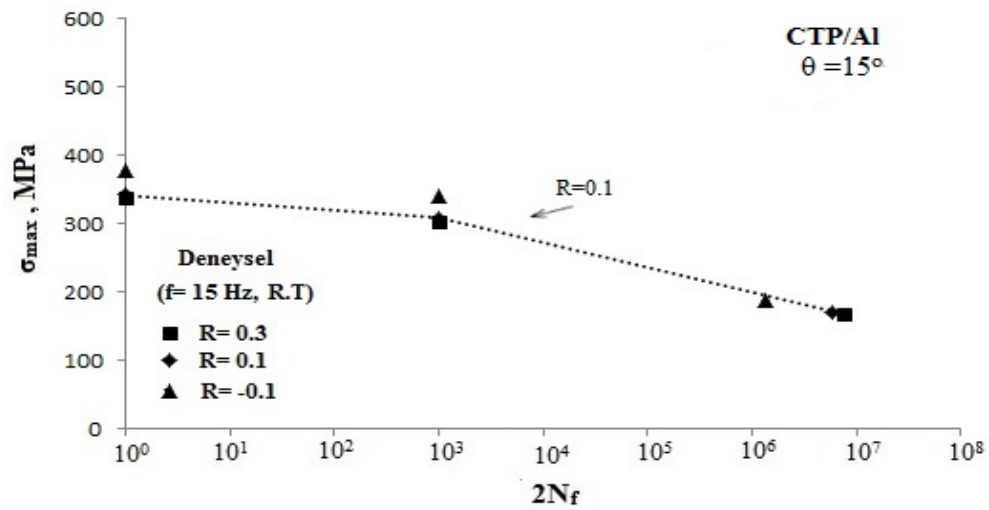
Şekil 3.17. Glare-2-3/2 (CTP/Al)'nin $R = -0,1$ yükleme oranındaki davranışı

4.2. Yükleme Oranının Etkisi

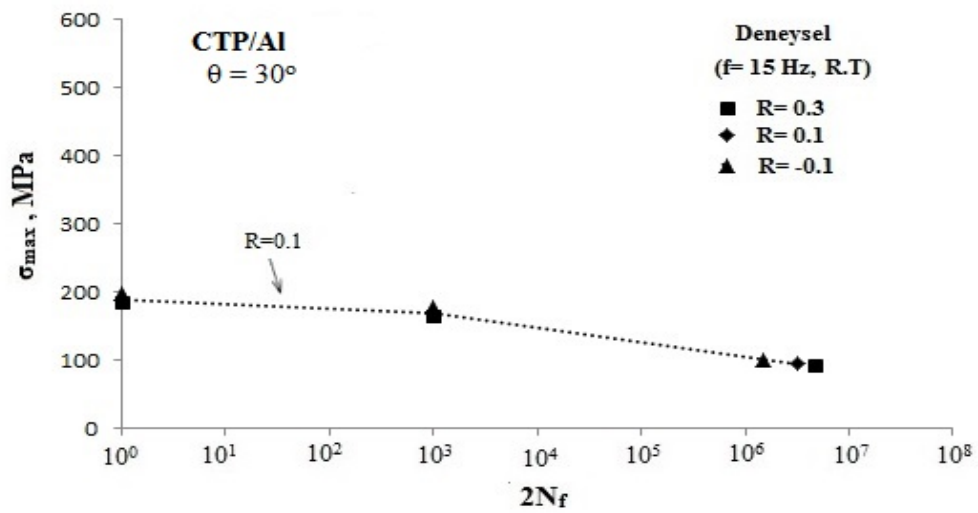
Şekil 3.18' de (a)-(b)-(c)-(d)-(e)-(f)-(g) ile gösterilen grafiklerin temsil ettikleri oryantasyon açıları ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) için fiberlerin farklı yükleme oranlarındaki ($R = 0,3; 0,1; -0,1$) S-N ilişkileri karşılaştırmaları sırasıyla gösterilmiştir. Yükleme oran davranışlarını incelemek için kesikli çizgi ile $R = 0,1$ yüklemesi referans alınarak sabit bir oryantasyon açısı için her üç yükleme oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



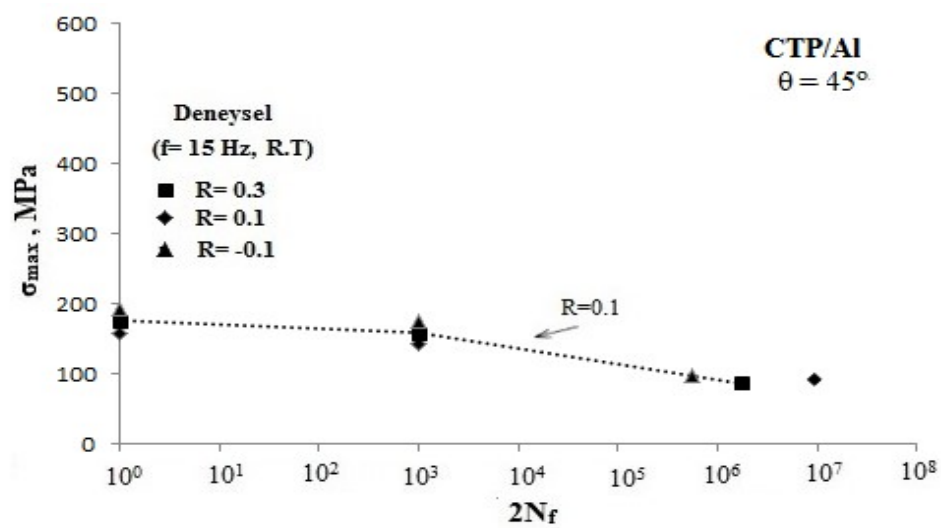
(a)



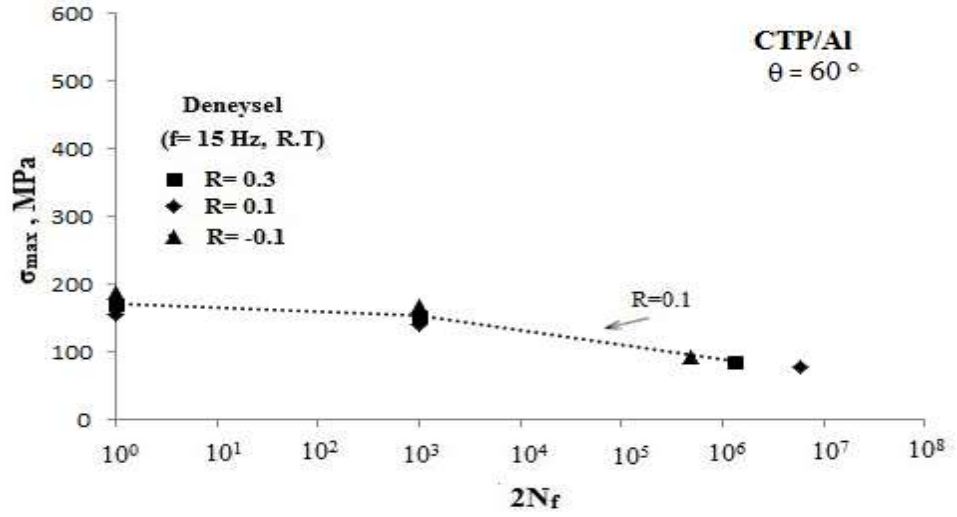
(b)



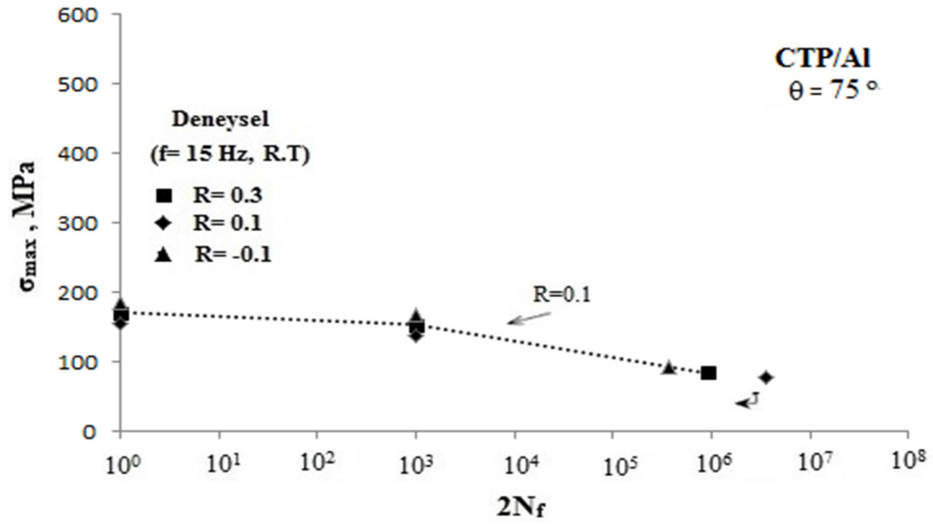
(c)



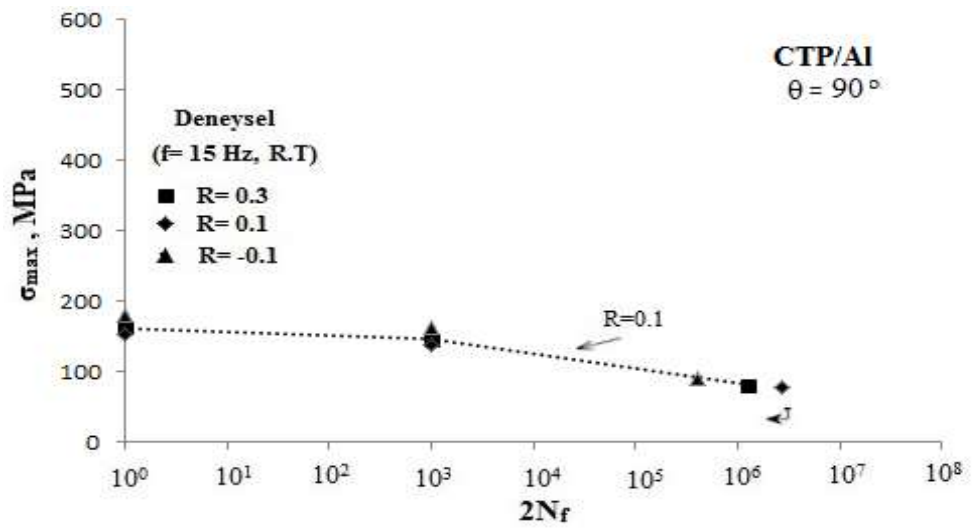
(d)



(e)



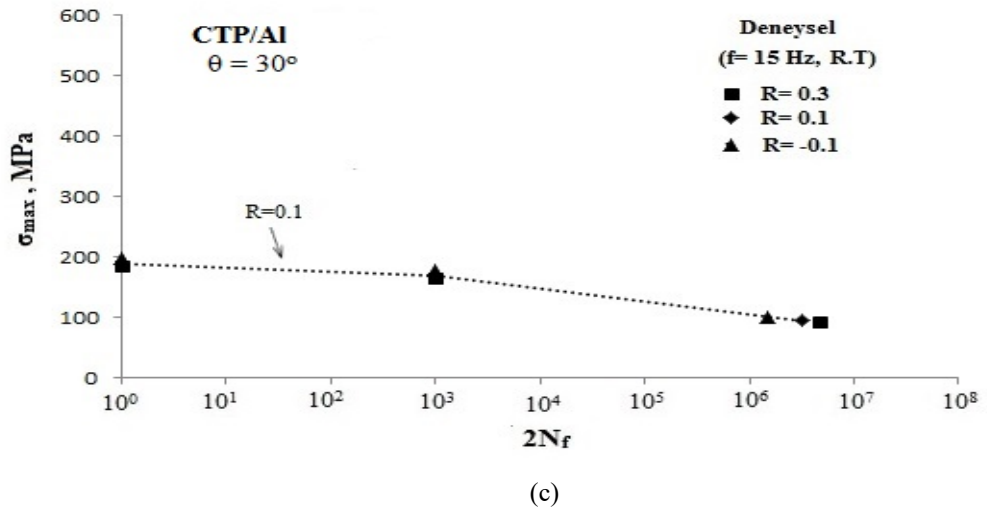
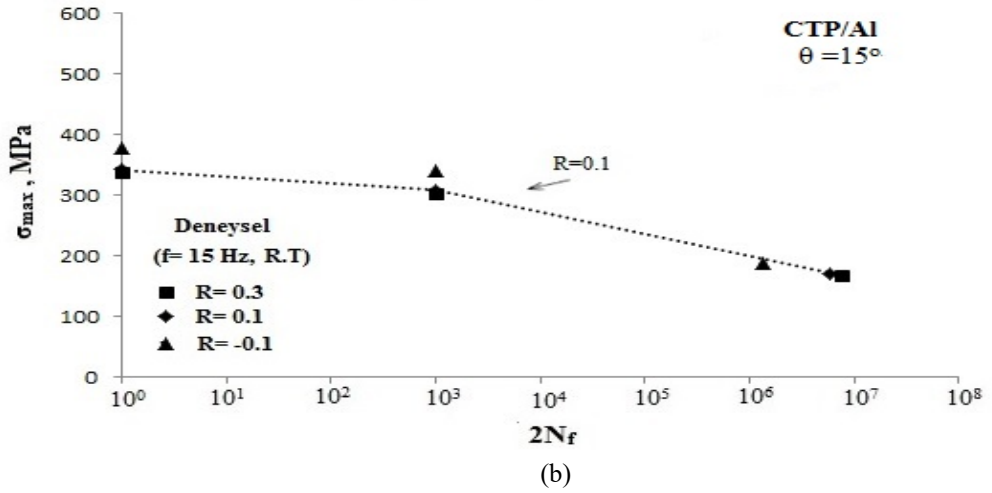
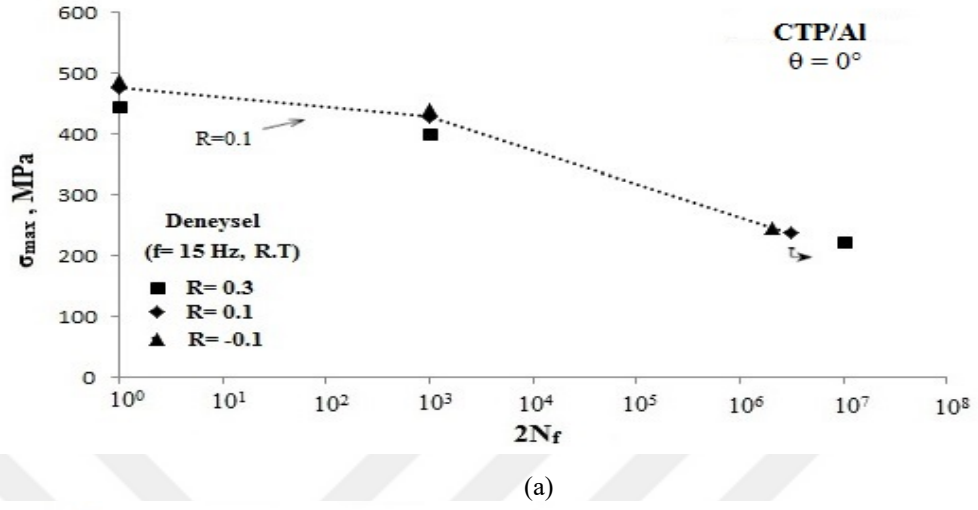
(f)



(g)

Şekil 3.18. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri
(a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 15^\circ$, (c) $\theta = 30^\circ$, (d) $\theta = 45^\circ$, (e) $\theta = 60^\circ$, (f) $\theta = 75^\circ$ ve (g) $\theta = 90^\circ$

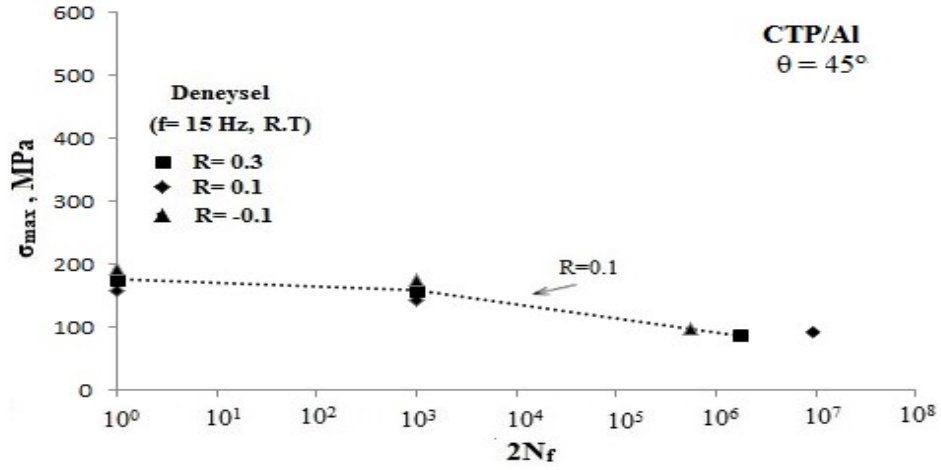
Şekil 3.19-(a-b-c)' da daha geniş bir yükleme oranındaki yorulma verisinin fiber yönelimlerine bakılmaksızın (oryantasyon açısı göz ardı edilerek) $R = 0,1$ için sağa doğru kaydığı görülmektedir. Yorulma ömrü 10^6 ' dan 10^7 ' ye doğru ilerlemektedir.



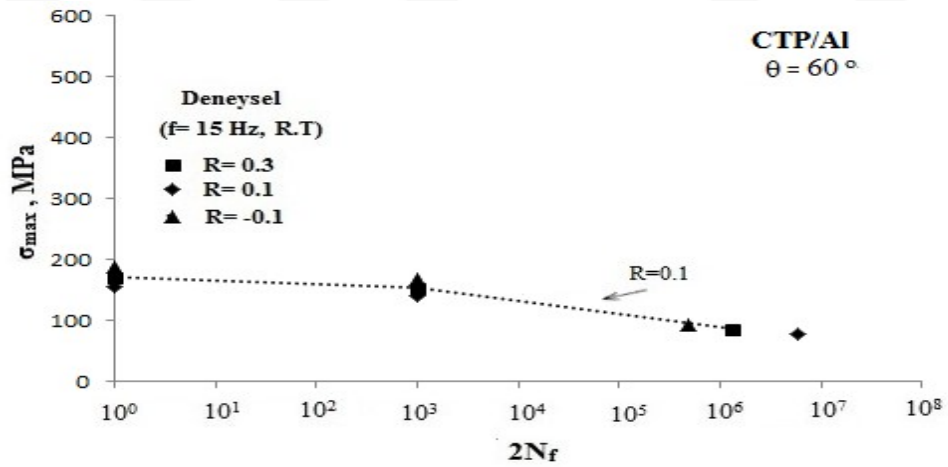
Şekil 3.19. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri

(a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 15^\circ$ ve (c) $\theta = 30^\circ$

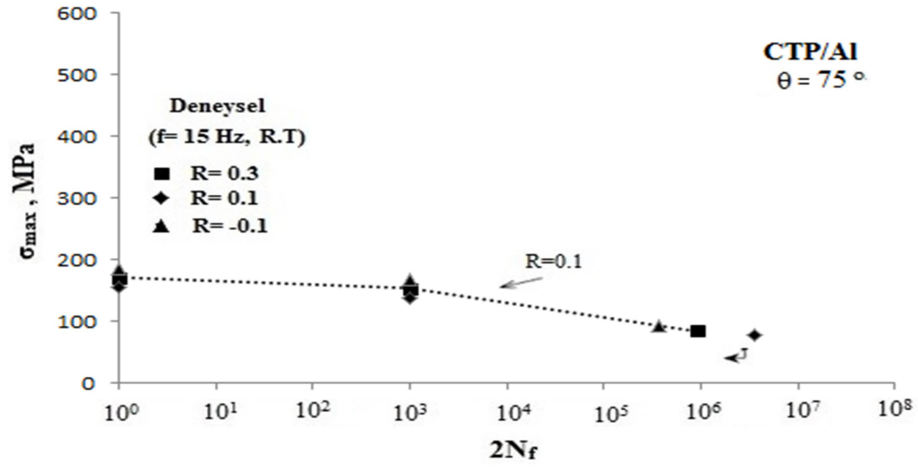
Şekil 3.20-(d-e-f-g)' de daha geniş bir yükleme oranındaki yorulma verisinin fiber yönelimlerine bakılmaksızın (oryantasyon açısı göz ardı edilerek) $R = 0,1$ için sola doğru kaydığı görülmektedir. 45° oryantasyon açısı için $R = 0,1$ yükleme oranında yorulma ömrü 10^7 değerinde iken, oryantasyon açısı 90° ye doğru ilerledikçe yükleme oranlarına bağlı yorulma ömürlerinin 10^7 ' dan 10^6 ye sola doğru toplanarak hareket ettiği gözlemlenmektedir.



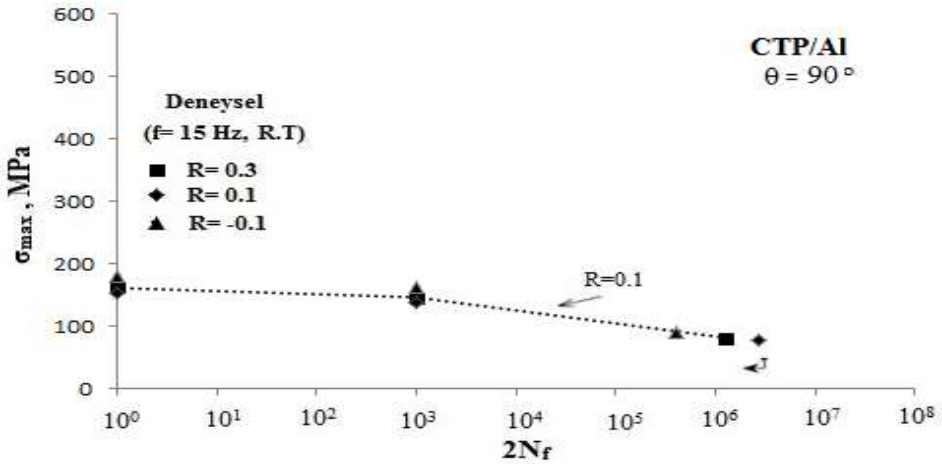
(d)



(e)



(f)

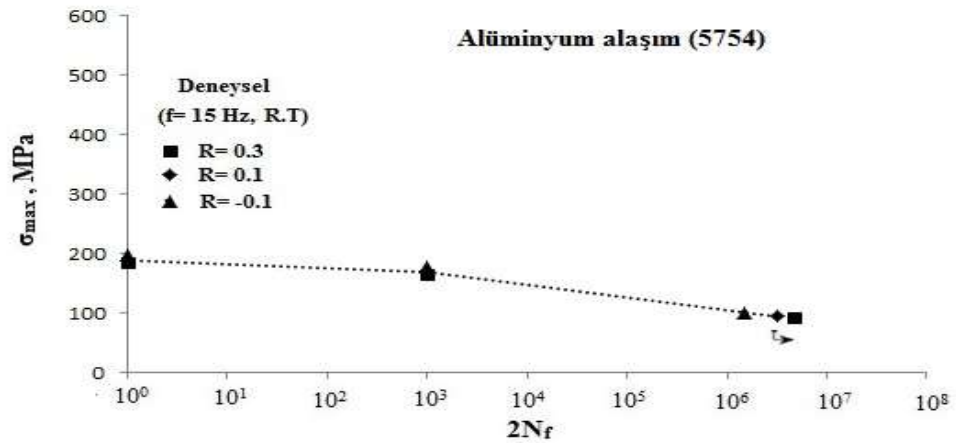


(g)

Şekil 3.20. Yükleme oranlarının Glare-2-3/2'nin yorulma mukavemeti üzerine etkileri

(d) $\theta = 45^\circ$, (e) $\theta = 60^\circ$, (f) $\theta = 75^\circ$ ve (g) $\theta = 90^\circ$

Şekil 3.21'de ise alüminyum alaşımının yükleme oranlarına bağlı olarak gösterdiği davranışlar görülmektedir.



Şekil 3.21. Yükleme oranlarının Al (5754)' un yorulma mukavemeti üzerine etkileri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tek yönlü hibrit CTP/AL tabakalı kompozit malzemelerin yorulma davranışına yükleme oranının etkisi oda sıcaklığında incelendi. Yükleme oranı etkisinin daha iyi anlaşılması için numuneler $R = 0,3$; $0,1$ ve $-0,1$ yükleme oranlarında testlere maruz bırakılmıştır. Farklı oryantasyon açılarına sahip numunelerden elde edilen veriler kullanılarak S-N diyagramları çizilmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- ✓ Alüminyum alaşımı, CTP' nin çekirdek katmalarını korur ve mekanik açıdan üstünlük sağladığı görülmüştür.
- ✓ CTP/AL tabakalı numuneler tüm yorulma testlerinde alüminyum alaşımdan daha yüksek yorulma dayanımı göstermiştir.
- ✓ $R = 0,1$ yükleme oranında en yüksek yorulma ömrü 15° oryantasyon açısına sahip numunede görülmüştür. Bu da bize $R = 0,1$ yükleme oranında, 0° oryantasyon açısına sahip numuneye gelen yükün tamamının fiber tarafından taşındığını, 15° oryantasyon açısına sahip numunede ise gelen yükün fiber ve matris tarafından taşındığını ve yorulma ömrünün bu sayede uzadığı kanaatine varılmıştır.
- ✓ Hibrit tabakalama sistemi yorulma yükü altındaki alüminyum alaşımının tabakalarında oluşacak çatlakların büyümesini ve yayılmasını önlediği tespit edilmiştir.
- ✓ Oryantasyon açısı doğrultusu 0° den 90° ye doğru değiştikçe numunenin yorulma ömrünün azaldığı görülmüştür.
- ✓ Yükleme oranı sayısal olarak arttıkça malzemenin yorulma ömrü de artmıştır ($R=0,3$ ' te en uzun, $R = -0,1$ ' de en düşük ömür).
- ✓ Alüminyum alaşımı ve prepreg kompozit tabakalarının yorulma dayanımının, yükleme oranına bağlı olması CTP/Al' un genel yorulma davranışının yükleme oranına bağlı olmasına sebep olmuştur.
- ✓ Yükleme oranlarındaki değişimin, numunelerin yorulma ömrü üzerinde, oryantasyon açılarından bağımsız davranışlara sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Daha sonra yapılacak çalışmalar için birkaç öneri şöyle sıralanabilir:

- ✓ Daha farklı yükleme oranlarının yorulma davranışına etkisi incelenebilir.
- ✓ Farklı takviye elemanı, matris malzemesi ve tabakalama sistemi ile yorulma davranışı incelenebilir.
- ✓ Farklı frekanslar kullanılarak kompozitlerin yorulma davranışları üzerine etkisi incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Colombo, C. and Vergani, L., (2011) “Multi-axial fatigue life estimation of unidirectional GFRP composite”, *International Journal of Fatigue Vol.3*, p.1032-1039
2. Kawai, M., (2006) “Effects of R-ratio on the off-axis fatigue behavior of unidirectional hybrid GFRP/Al laminates at room temperature”, *University of Tsukuba, Japan*, p.1228
3. Reis, L., and Freitas, M., (1997) “Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels”, *Composite Structures*, p.509-515
4. Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S., (2003) “Experimental Investigations on the Response of Stitched/Unstitched Woven S2-Glass/SC15 Epoxy Composites under Single and Repeated Low Velocity Impact Loading”. *Composite Structures*, p. 89–102
5. Sayer, M., (2009) “Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 134s,
6. Laliberte, J.F., Poon C., Straznicky, P.V. and Fahr, A., (2002) “Post-Impact Fatigue Damage Growth in Fiber–Metal Laminates”, *International Journal of Fatigue*, p. 249–256
7. Liang, S., Gning, P.B. and Guillaumat, L., (2012) “A Comparative Study of Fatigue Behaviour of Flax/Epoxy and Glass/Epoxy Composites”, *Composites Science and Technology*, p. 535–543
8. Tai, N.H., Ma, C.C.M., Lin, J.M. and Wu, G.Y., (1999) “Effects of Thickness on The Fatigue-Behavior of Quasi-Isotropic Carbon/Epoxy Composites Before and After Low Energy Impacts”, *Composites Science and Technology*, p.1753–1762
9. Bezazi, A., Boukharouba, W. and Scarpa, F., (2009) “Mechanical Properties of Auxetic Carbon/Epoxy Composites: Static and Cyclic Fatigue Behavior”, *Basic Solid State Physics*, p.2102–2110
10. Karabeyoğlu, S.S., (2007) “Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Eksenel Yükler Altında Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Edirne
11. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, (2018) *Guide to citing Internet sources* [online], <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/boksit> , [Ziyaret Tarihi: 17 Nisan 2018]
12. Hall, New Jersey., (1996) Askeland, R. D., (1990) “The Science and Engineering of Materials”, *Chapman and Hall Publishing Company*, UK.

13. ASM Handbook, (1990) “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials” *ASM International, Materials Park, USA.*
14. Askeland, R. D., (1990) *The Science and Engineering of Materials*, Chapman and Hall Publishing Company, UK
15. Lesson Learned, (2016) *Guide to citing Internet sources* [online],
http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=2&LLID=75&LLTypeID=2
[Ziyaret Tarihi: 19 Şubat 2016]
16. Jones, D.A., (1996) “Pitting and Crevice Corrosion, Atmospheric Corrosion and Elevated Temperature Oxidation”, *Principles and Prevention of Corrosion*, New Jersey, p. 210-421,
17. Callister ,W.D., (1990) ”Materials Science and Engineering”, *Second edition, John Wiley and Sons Inc.*, Singapore
18. Schaffer, J.P., Saxena, A., Antolovich, S.D., Sanders, T.H., Wander, S.B., (1995) “The Science And Design Of Engineering Materials”, *Von Hoffman Press*, U.S.A, p.595-612
19. Adem, O., (2015) “Kompozit malzemeler ders notu”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya, p. 3-4,
20. Saçak, M., (2005) “Polimer Teknolojisi”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, p. 277-278, 292-294, 226-227
21. Aricasoy, O., (2006) "Kompozit Sektörü Raporu", *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul
22. Jacobs, J.A., Kildult, T.F., (2001) “Engineering Materials Technology 4th edition”, *Prentice Hall*, New Jersey, p.526 -540 -552
23. Chawla, K.K., (1987) “Composite Materials Science And Engineering”, *SpingerVerlag*, New York, p. 95-99
24. Cam Elyaf Sanayi A.Ş., (2006) “CTP Teknolojisi”, *Kocaeli*, p. 9, 13-18, 32
25. SP Systems., (1998) “SP Systems Guide to Composites”, *SP Systems*, p. 9-16
26. ASM International., (1987) “Engineered Materials Handbook Volume 1 (Composites)”, *ASM International*, USA, p. 107-111,122
27. John Wiley & Sons, Inc., M P Groover., (2007) “Fundamentals of Modern Manufacturing”, *Guide to citing Internet sources* [online],
<https://futureingscientist.files.wordpress.com/2014/01/fundamentals-of-modern-manufacturing-4th-edition-by-mikell-p-groover.pdf>
28. Aran, A., (1990) “Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notu”, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul

29. IŞIK, A., (2008) “Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. F.B.E.*, İstanbul
30. Cam Elyaf., *Guide to citing Internet sources* [online], www.camelyaf.com.tr, [Ziyaret Tarihi:26 Ocak 2018]
31. Turhan, M., (2007) "Ctp'lerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya
32. Guclu, G.T., (2007) “Mold Design in Resin Transfer Molding (RTM) Process Using Point Voltage Sensors,” *Master of Science, Koc University Mechanical Engineering*, İstanbul
33. Kompozit Malzeme., *Guide to citing Internet sources* [online], <http://www.metalurjik.net/tag/kompozit-malzemeler>, [Ziyaret Tarihi:11 Şubat 2018].
34. Composite Material., (2005) *Guide to citing Internet sources* [online], Hexcel Comporation
35. D. Gay., (1898) “ Materiaux Composite,” Hermes Paris, p.506
36. Fatigue., *Guide to citing Internet sources* [online], https://www.efatigue.com/training/fatigue_made_easy_1.pdf, [Ziyaret Tarihi:16 Mart 2018].
37. ASTM E1150., (1993) “Definitions of Terms Relating to Fatigue,” ASTM (American Society for Testing and Materials)
38. Akkurt, M., (1977) “ Makine Konstrüksiyonunda Güvenirliğin Esasları,” *Makine Müh. Odası Yayını, No.106*, İstanbul
39. Khashaba, U.A., (2003)“ Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Load,” *Journal of Composite Materials, Cilt.37, No.4, 2003, Sayfa 317-331*
40. Fatigue Of Composite., *Guide to citing Internet sources* [online], www.aero.iitb.ac.in:8081/~awarman/composite_course/Chapter18.pdf, [Ziyaret Tarihi:15 Nisan 2018].
41. Amy L. Stratton. and Assimina, A., (1999) “İnvestigation of interlayer and intralayer delaminations,” *Pelegr College of Engineering, Rutgers University Piscataway, NJ*
42. Schaffer, J.P., Saxena, A., Antolovich, S.D., Sanders, T.H., Wander, S.B., (1995) “The Science And Design Of Engineering Materials,” *Von Hoffman Press, USA, p. 595-612 .*

43. Freitas, M., (1997) “Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels”, *Composite Structures*, p. 509-515
44. Richard. C., (1997) “SAE Fatigue Desing Handbook 3edition,” *Society of Automotive Engineers*, England
45. Sims, G.D., (2004) “Fatigue test methods, problems and standards,” *Fatigue in composites-Science and technology of the fatigue response of fibrereinforced plastics*, CRC
46. Finite Life Fatigue Strenght., *Guide to citing Internet sources* [online],
<http://www.cae-sim-sol.com/en/limit-stress-evaluation/finite-life-fatigue-strength>, [Ziyaret Tarihi:09 Mart 2018]
47. Stress Life., *Guide to citing Internet sources* [online],
<https://www.efatigue.com/constantamplitude/stresslife/#a>, [Ziyaret Tarihi:16 Mart 2018]

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fırat AYDIN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : BATMAN/20.06.1989
Telefon : 05457192411
Faks : -
e-mail : firat.aydin.192@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Fatih Lisesi (BATMAN)	2006
Üniversite	: Dicle Üniversitesi	2014
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi	2018
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	TPAO	Saha Şefi
2016	TÜPRAŞ	Saha Şefi

UZMANLIK ALANI

Mekanik

YABANCI DİLLER

İngilizce