

**TABAKALI HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN YORULMA
DAVRANIŞLARININ ANALİZİ**

Anıl İMAK

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

TEMMUZ-2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAKALI HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN YORULMA
DAVRANIŞLARININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl İMAK

(112120101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Haziran 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Temmuz 2015

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ (Fırat Üniv.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Aydın TURGUT (Bingöl Üniv.)

Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (Fırat Üniv.)

TEMMUZ-2015

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimde bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren ve hiçbir yardımını benden esirgemeyen kıymetli danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ' a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve lisansüstü eğitimimde kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocalarım Prof. Dr. Aydın TURGUT, Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR ve Doç. Dr. Mete Onur KAMAN' a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Tolga TOPKAYA' ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamda benden hiçbir yardımını esirgemeyen arkadaşlarım Arş. Gör. Bilal BALUN, Arş. Gör. Erman ÇELİK ve Arş. Gör. Sercan VANÇİN' e teşekkürlerimi sunarım.

Bütün hayatım boyunca bana maddi ve manevi yönden destek olan sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Anıl İMAK
Elazığ-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1 Takviye Malzemeleri.....	5
2.1.1 Cam Elyafı.....	6
2.1.2 Karbon Elyafı.....	7
2.1.3 Aramid Elyafı.....	7
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
2.2.1 Fiber Takviyeli Kompozitler	8
2.2.2 Partikül Takviyeli Kompozitler	9
2.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler	9
2.3 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	10
2.3.1 Elle yatırma (hand lay-up)	10
2.3.2 Püskürtme (spray-up)	11
2.3.3 Reçine transfer kalıplama	11
2.3.4 Vakum torbalama / vakum bagging	12
2.4 Kompozit Malzemelerde Yorulma	12
2.4.1 Yorulma Testleri	14
2.4.2 S-N Eğrileri.....	17
2.4.3 Yorulma Ömrü Tahmin Metotları.....	18
2.4.4 Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışları	19
2.4.5 Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler	21
3. MATERYAL VE METOT	24
4. SONUÇLAR	30
5. DEĞERLENDİRME.....	56
6. ÖNERİLER.....	58
7. KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	64

ÖZET

Endüstride geniş kullanım alanına sahip tabakalı kompozit malzemeler, kullanıldıkları alanlara bağlı olarak tekrarlı yüklere maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle malzemelerin tekrarlı yüklere karşı dayanımı önemli bir parametredir. İzotropik malzemelerden farklı olarak kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının tespiti daha zordur. Bunun sebebi kompozit malzemelerin tasarımı sırasında ele alınan parametrelerin sayısının fazlalığıdır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada karbon ve cam olmak üzere sekiz farklı hibrit numune elle yatırma yöntemi ile epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Elyafların reçine ile birleştirilmesinin ardından kompozit levhalara hidrolik sıcak pres uygulanmıştır. Yorulma deneylerinin yapılabilmesi için gerekli olan numuneler ASTM standartlarına uygun şekilde boyutlandırılmıştır. Deneyler sırasında gerilme oranı 0.1 ve frekans 10 Hz seçilmiştir. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, Tabakalı Hibrit Kompozit, Yorulma Deneyi, S-N eğrisi

SUMMARY

The Analysis of Fatigue Behaviours of The Laminated Hybrid Composite Materials

Layered composite materials with a wide range of applications in industry, may be exposed to the cyclic load depending on the field used. So, resistance of the materials to cyclic loads is significant parameter. Unlike isotropic materials, detection of the fatigue behavior of the composite materials is more difficult. The reason for this are the more number of parameters considered during the design of the composite materials.

Fatigue behavior of layered hybrid composite materials has been investigated experimentally in this study performed. In this study, eight different hybrid samples including carbon and glass were produced with hand lay-up method using epoxy resin. Hydraulic hot press was applied to the composite plates after combining the fibers with the resin. Necessary samples to be made fatigue tests, were scaled up according to appropriate ASTM standards. Stretch ratio and frequency were selected 0.1 and 10 Hz respectively. The results obtained at the end of the experiment have been presented in graphics by comparing them.

Key Words: Composite Materials, Laminated Hybrid Composite, Fatigue Analysis, S-N Curve

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Takviye elemanlı kompozitler a) fiber takviyeli b) partikül takviyeli c) tabakalı kompozitler d) dolgu kompozitler.....	8
Şekil 2.2. Farklı açılara sahip tabakalı kompozit plak.....	9
Şekil 2.3. Elle yatırma yöntemi.....	10
Şekil 2.4. Püskürtme yöntemi.....	11
Şekil 2.5. Vakum torbalama işlemi.....	12
Şekil 2.6. Kompozit malzemeler ve metal gibi homojen malzemeler için yorulma ömrü boyunca oluşan hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca oluşan hasar tipleri.....	13
Şekil 2.7. Çevrimsel yükleme sırasında dokuma kumaş kompozitlerde oluşan hasarlar, a) test başlangıcı (hasarsız), b) enine elyaf demetinde (weft) çatlak oluşumu, c) boyuna elyaf demetinde (warp) kesme hasarları ve reçine zengin bölgelerde enine çatlaklar, d) enine ve boyuna elyaf demeti arasında ayrılma, e) tabakalar arası ayrılma ilerlemesi ve elyaf demetlerinin kopması.....	14
Şekil 2.8. Polimerik kompozitlerin a) gerilme b) şekil değişim kontrollü çevrimsel yükleme altında davranış farklılıkları.....	15
Şekil 2.9. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme tipi.....	16
Şekil 2.10. Yorulma testlerinde kullanılan çevrimsel yükleme tipleri.....	16
Şekil 2.11. Çekme-basma çevrimsel yükleme altında grafit/epoksi plakaların elyaf oryantasyonları.....	18
Şekil 2.12. Tipik kırılma modları a) interlaminer kırılma b) intaralaminar kırılma c) transalaminar kırılma d) matris çatlağı e) fiber-matris ayrılması f) fiber kırılması.....	20
Şekil 2.13. Çeşitli fiber takviyeli kompozitlerin yorulma diyagramı.....	20
Şekil 2.14. Fiber doğrultusuna 450 açılı test edilmiş R=0.1.....	21
Şekil 2.15. Kevlar-49 fiberin yorulma sonucu kırılması ve yırtılması.....	22
Şekil 2.16. Kısa ve sürekli fiber takviyeli karbon/epoksi kompozitin yorulma eğrisi.....	22
Şekil 2.17. Karbon fiber takviyeli kompozitin farklı frekanslardaki çevrim sonucu oluşan numune ısınması.....	23
Şekil 3.1. a) plain elyaf, b) twill elyaf.....	24

Şekil 3.2.	Karbon ve cam elyafların dizilimlerinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.3.	Elyaf ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazi.....	25
Şekil 3.4.	Kullanılan kalıp ve reçine sürülmüş elyaflar.....	26
Şekil 3.5.	Hidrolik pompa, hidrolik sıcak pres ve kontrol ünitesi.....	26
Şekil 3.6.	Deneylerde kullanılan numune örneği.....	27
Şekil 3.7.	Çekme deneylerinde kullanılan üniversal test cihazı.....	27
Şekil 3.8.	Yorulma deney düzeneği.....	28
Şekil 3.9.	Yorulma testleri sırasında kullanılan dalga formu.....	29
Şekil 3.10.	Yorulma cihazına bağlı numune görüntüsü.....	29
Şekil 4.1.	Gerilme-Uzama grafikleri.....	30
Şekil 4.2.	Çekme deneyi sonrası numunelerde oluşan hasarlar.....	31
Şekil 4.3.	7 nolu numunede meydana gelen hasarlar.....	32
Şekil 4.4.	1 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	33
Şekil 4.5.	2 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	33
Şekil 4.6.	3 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	34
Şekil 4.7.	4 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	35
Şekil 4.8.	5 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	35
Şekil 4.9.	6 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	36
Şekil 4.10.	7 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	37
Şekil 4.11.	8 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği.....	37
Şekil 4.12.	Bütün numunelerin gerilme-ömür grafiğinin tek grafikte gösterilmesi.....	38
Şekil 4.13.	1 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	40
Şekil 4.14.	1 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğrilerin denklemleri.....	40
Şekil 4.15.	1 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	41
Şekil 4.16.	2 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	42
Şekil 4.17.	2 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	43
Şekil 4.18.	3 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	43
Şekil 4.19.	3 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	44
Şekil 4.20.	4 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	45
Şekil 4.21.	4 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	46
Şekil 4.22.	5 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	46
Şekil 4.23.	5 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	47
Şekil 4.24.	6 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	48

Şekil 4.25. 6 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	49
Şekil 4.26. 7 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	49
Şekil 4.27. 7 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	50
Şekil 4.28. 8 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri....	51
Şekil 4.29. 8 nolu numunenin çevrim sayılarına karşı gelen eğim açıları.....	52
Şekil 4.30. Numune eğim açılarının tek grafikte gösterimi.....	52
Şekil 4.31. 7 nolu numunenin yorulma deneyi sonrası görüntüsü.....	53
Şekil 4.32. 4 nolu numunenin yorulma deneyi sonrası görüntüsü.....	53
Şekil 4.33. SEM analizlerinde kullanılan elektron mikroskopu.....	54
Şekil 4.34. Karbon kaplama yöntemi.....	54
Şekil 4.35. 4 nolu numunenin kırılan yüzey görüntüleri	55
Şekil 4.36. 7 nolu numunenin kırılan yüzey görüntüleri	55

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Numunelerde kullanılan elyafların oryantasyon açıları.....	24
Tablo 4.1 Numunelerin maksimum gerilmeleri.....	31
Tablo 4.2 Numunelerin oryantasyon açıları, maksimum yorulma gerilmesi ve maksimum çevrim sayıları.....	39
Tablo 4.3 1 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	41
Tablo 4.4 2 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	42
Tablo 4.5 3 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	44
Tablo 4.6 4 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	45
Tablo 4.7 5 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	47
Tablo 4.8 6 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	48
Tablo 4.9 7 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	50
Tablo 4.10 8 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi.....	51

SEMBOLLER LİSTESİ

N	: Çevrim sayısı
R	: Gerilme oranı
σ_a	: Gerilme genliği
σ_{ar}	: Gerilme aralığı
$\sigma_{\dot{c}}$	: Ortalama statik mukavemet
σ_{ort}	: Ortalama gerilme
σ_{max}	: Maksimum gerilme
σ_{min}	: Minimum gerilme

KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BMC	: Bulk Moulding Composites
MWCNT	: Multiwall Carbon Nanotubes
RTM	: Resin Transfer Molding
SMC	: Sheet Moulding Composites

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler yüksek elastisite modülü ve özgül mukavemet avantajlarından dolayı, havacılık ve gemi sanayisinde tercih sebebidir. Özellikle tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerin yorulma hasarı davranışı doğru tanımlanmalıdır. Kompozit malzemeler hasarı bünyelerinde depolarlar ve hasar her zaman makroskobik olarak meydana gelmez. Fiber hasarı, delaminasyon, ters yönlü tabaka çatlağı ve matris çatlağı gibi hasar türleri oluşabilmektedir. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Karahan ve diğ. [1] 3 boyutlu dokuma karbon epoksi kompozit malzemelerin dinamik çekme yüklemesi altında yorulma davranışını incelemişlerdir. Yorulma yüklemesi altında kompozit malzeme içinde hasarın z-ipliklerinin atkı iplikleri ile kesiştikleri kısımlarda başladığı ve buradan yayıldığı görülmüştür. Üç boyutlu dokuma yapıda z-iplikleri iplik katmanlarını bir arada tuttuğu için, klasik iki boyutlu kompozitlerde meydana gelen delaminasyon hasarları meydana gelmemiştir.

Jen ve Lee [2] eş yönlü karbon fiber takviyeli kompozit plakaların çekme-basma ve basma-basma durumunda yorulma davranışlarını $-\infty$, 5, 0, 0.2 gerilme genliği için araştırmıştır. Sonuçlar normalize edilmiş S-N diyagramının çekme-basma ve basma-basma durumunda belirgin farklılıklar göstermemiştir.

Borrego [3] nanopartiküllerle güçlendirilmiş cam fiber epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışını incelemiştir. %1 nanokalay ve %5 MWCNT (Multiwall Carbon Nanotubes) eklenmiş kompozit ile normal kompozit malzemenin aynı etkileri gösterdiği gözlemlenirken, nanopartikül fazla koyulduğunda ise yorulma gerilmesini düşürdüğü görülmüştür.

Yudhanto ve diğ. [4] dikiş yoğunluğunun yorulmaya etkisini incelemişlerdir. Vectran ipliği kullanılan kompozitler, dikişsiz kompozitler ile orta ve yüksek dikişli kompozitler test edilip karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda yorulma dayanımı en iyi 3x3 dikişli kompozitte tespit edilmiştir.

Colombo ve Vergani [5] cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin çok eksenli statik ve yorulma davranışını araştırmıştır. Fiber oryantasyon açısı olarak 0° , 30° , 45° , 90° kullanan araştırmacılar, en düşük yorulma mukavemetinin 0° oryantasyon açısına sahip numunelerde görüldüğünü belirtmiştir.

Kawai ve Suda [6] karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların yorulma davranışlarını farklı fiber oryantasyon açıları için araştırmıştır. Oryantasyon açısının 0° 'den büyük olduğu modellerde gerilme genliği olarak -1, 0.1 ve 0.5 ve oryantasyon açısının 0° olduğu modellerde ise -0.3, 0.1, 0.5 olmak üzere üç farklı değerin yorulma etkisi araştırılmıştır. En düşük yorulma mukavemeti oryantasyon açısının 0° 'den büyük olduğu modeller için, gerilme genliğinin -1 olduğu modellerde, fiber oryantasyon açısının 0° olduğu modellerde ise -0.3 olduğu modellerde görülmüştür.

Doğanay ve diğ. [7] Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışını incelemiştir. Takviyesiz, %1, %3 ve %6 olmak üzere dört farklı oranlarda takviyelendirilmiş polyester reçine numuneleri deniz suyunda 30 dakika bekletilerek yorulma testi yapılmış ve maksimum uzamaları ölçülmüştür. Takviye oranına bağlı olmadan deniz suyunda bekletme süresi arttıkça uzama değerinin düştüğü görülmüştür.

Tomita ve diğ. [8] uzun karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme yorulmasını araştırmıştır. Fiber dizilimi olarak $[0^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ olan numuneleri kullanan araştırmacılar plakalarda meydana gelen hasarın temel sebebinin 0° oryantasyon açısına sahip olan tabakada oluşan basınç hasarı olduğunu rapor etmiştir.

Koricho ve diğ. [9] twill E-glass epoksi kompozitlerin eğilme yorulma davranışlarını incelemiştir. Deneylerde gerilme genliği 0.1 alınmıştır ve 1,000,000 çevrimden sonra test durdurulup özellikleri ölçülmüştür. Malzemenin mukavemeti ve elastisite modülü üzerindeki farklı azalma seviyelerin, yorulma yükleme düzeyine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Kujawski [10] tabakalı kompozit plakaların genişliğinin çekme mukavemetine ve yorulma davranışına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. 6 farklı fiber oryantasyon açısı ve 5 farklı genişlik değeri kullanan Kujawski fiber oryantasyon açısının ve genişliğin artışının yorulma mukavemetini arttırdığını göstermiştir.

Vasconcellos [11] örgü fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin çekme-çekme yorulma davranışını incelemiştir. Farklı teknikleri birleştirerek yaptıkları yorulma hasar analizleri sonucunda $[\pm 45]_7$ dizilimli kompozit malzeme $[0/90]_7$ diziliminden daha iyi yorulma dayanımı göstermiştir.

El Kadi ve Ellyin [12] eş yönlü cam fiber takviyeli kompozitlerin farklı gerilme genliği için farklı fiber oryantasyon açılarında yorulma testlerini gerçekleştirmiştir.

Analizlerde kullanılan fiber oryantasyon açısı değişimi göz ardı edilirse en düşük gerilme değerleri, gerilme genliğinin -1 olması durumunda gözlenmiştir.

Cheng ve diğ. [13] tek yönlü karbon kompozitin farklı yorulma çevriminden sonra iç sürtünme davranışını araştırmışlardır. Karbon/karbon kompozitlerde farklı yoğunluklarda kullanılmış ve boşluklu yapının artışıyla içteki sürtünmenin arttığı belirtilmiştir.

Cardrick ve Smith [14] Alüminyum alaşımları ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin açılı birleştirilmesinin yorulma davranışlarını araştırmış ve yükleme frekansının yorulmayı etkilediğini tespit etmişlerdir.

Jen [15] 5052-H32 Alüminyum alaşımının açılı birleştirilmesinde açının ömre etkisini araştırmıştır. Birleştirme açısı olarak 0° , 30° , 45° , 60° olmak üzere 4 farklı değer kullanmıştır. Artan açının yorulma mukavemetini arttırdığını rapor etmiştir.

Siriruk ve diğ. [16] karbon fiber-vinil ester kompozit malzemenin deniz ortamında yorulma davranışını incelemişlerdir. Yapılan incelemeler neticesinde gemi yapılarında deniz suyunun büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Coronado ve diğ. [17] farklı test sıcaklıklarında karbon fiber epoksi kompozit malzemelerin Mod I kırılma davranışını analiz etmiştir. Malzemeler tek yönlü karbon fiber ve epoksiden üretilmiştir. $[0^\circ]_{16/S}$, 20° , 0° , -30° , ve 60° sıcaklıklarda test edilmiş ve sıcaklık düştükçe malzemelerin daha kırılma davranış sergiledikleri görülmüştür.

Kim ve diğ. [18] yapıştırıcıyla birleştirilmiş silindirik bağlantıların yorulma ömrüne, yapıştırıcı tabaka kalınlığının ve yüzey kalitesinin etkisini araştırmıştır. Deney sonuçları optimum yüzey pürüzlülüğünün 0.02 mm ve optimum yapıştırıcı kalınlığının 0.15 mm olduğunu göstermiştir.

Belingardi ve diğ. [19] cam ve karbon takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme yorulma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Bir milyon çevrimin sonunda, numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve kopma mukavemetleri ile elastisite modülleri farklı yükler için tespit edilmiştir. Sonuçlar test frekansının 4 veya 10 Hz olmasının kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Smith ve Hardy [20] Alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit plakaların açılı birleştirilmesi sonucu oluşan bağlantının ömrüne test frekansının etkisini araştırmıştır. Araştırmacılar artan frekansın, bağlantının ömrünü arttırdığını belirtmişlerdir.

Paepegem ve diğ. [21] örgü fiber takviyeli kompozit plakaların eğilme yorulması davranışlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Sonuçlar yorulma deneyi sırasında ortaya çıkan gerilmenin numune boyunca dağıldığını göstermiştir.

Sakin ve diğ. [22] cam fiber takviyeli kompozit plakaların eğilme yorulması davranışına fiber yoğunluğunun etkisini araştırmak için 800 g/m², 500 g/m², 300 g/m² ve 200 g/m² olmak üzere dört farklı örgü ve 225 g/m², 450 g/m² ve 600 g/m² olmak üzere üç farklı geliş güzel dizilime sahip fiber kullanmıştır. Fiber dizilimi olarak [0°/90°] ve [±45°] kullanan araştırmacılar, deneyleri sabit gerilme yorulma tipine göre gerçekleştirmiştir. En yüksek yorulma ömrü 800 g/m² fiber yoğunluğuna ve [0°/90°] fiber dizilimine sahip numunelerde gözlenmiştir.

Yapılan çalışmada farklı malzeme, fiber dokuma ve oryantasyon açılarında karbon ve cam elyafların birleşimiyle oluşturulmuş sekiz farklı tabakalı hibrit kompozit numunenin çekme-çekme yorulma davranışları incelenmiştir. 6 tabaka cam ve 6 tabaka karbon elyaf olacak şekilde 12 tabakalı olarak kompozit plakalar üretilmiştir. Numunelerin üretiminde elle yatırma yöntemi uygulanmıştır ve kompozit levhalara sıcak presleme yapılarak kürleme işlemi yapılmıştır. Yorulma deneyleri neticesinde en yüksek yorulma ömrü karbon 0°/ cam 0° dizilimli numunede tespit edilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, özel bir amaç doğrultusunda birden fazla sayıdaki aynı veya farklı kategorideki malzemelerin yararlı özelliklerini yeni ve tek bir malzemede birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu malzemeler, mikroskobik olarak parçanın değişik bölgelerinde aynı zamanda heterojen olup, yöne bağlı farklı özellikleri anizotrop yapıdadır. Genellikle kompozit malzeme oluşturulmasında mukavemetli rijit takviye, matris olarak adlandırılan nispeten yumuşak bileşenin içerisine yerleştirilmektedir. Matriks bileşeni, kompozit içerisinde daha kararlı olup fazla miktarda bulunmaktadır. Takviye bileşeni, parçacık ya da elyaf biçiminde olabilmektedir ayrıca matriksin mekanik özelliklerini sağlamlaştırmaktadır. Bazı istisnalar hariç genel olarak takviye bileşeni matriks malzemeden daha mukavemetlidir [23,24].

2.1 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemesi kompoziti meydana getiren bileşenlerin en önemlisi olup kompozite etki eden yükün büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Elyafı iletebilmesi için yükün matriksle elyaf arasında kimyasal ve fiziksel uyumu olmalıdır. Yapısal gerilmelerin sürekli hale gelmesi bakımından, matriks ile takviye bileşenin termal genleşme katsayıları arasında koordinasyon önemlidir [25].

Polimerlerin takviyesinde çok çeşit malzeme kullanılmaktadır. Bazıları endüstriyel olarak üretilmektedir, bazıları da doğada kendiliğinden vardır. Mühendislikte kullanılan takviye bileşenlerinin birçoğu elyaf biçiminde üretildiklerinden sağlamlıkları katı haldeki konumlarından yaklaşık onlarca kat daha dayanıklıdır ve kütle halindeki özelliklerine nispeten düşük performans gösterirler [26].

Elyaf takviyeli katmanlı kompozit malzemelerin üretimlerinde yarı mamul tabakalar matriks malzemenin emdirilmesi sonucu elde edilmektedir. Matriks malzemenin viskoz bir yapıda olması nedeniyle silikon tabakalar arasında tutulmaktadır. Bu tabakalar, 0° ve 90° elyaf oryantasyonlarından oluşan örgü tabakalarda üretilmektedir. Üretilen tabakalı plakanın üretim kolaylığı açısından kalınlığı, kütlesi ve elyaf matriks malzeme oranı homojen olmalıdır. Fakat, yarı mamul tabakalarla üretimde cam/polyester, cam/epoksi, karbon/epoksi gibi elyaf ile matriks malzemenin birlikte seçilmesi gerekmektedir [25].

Kompozit üretilirken; takviye bileşeninin seçimi üretim sırasında, elyafların matriks tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri, üretim tekniği ve elyaf içeriği kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi söz konusudur. Elyafalarda olması gereken özellikler:

- Yüksek elastisite modülü
- Yüksek dayanım
- Düşük yoğunluk
- Kimyasal uyumluluk
- Üretim kolaylığı
- Isıl dirençtir

2.1.1 Cam Elyafı

Cam elyafın içeriği; Silis-kum ile belirlenen oranlarda Demir, Kalsiyum, Sodyum, Bor, Alüminyum gibi elementlerin oksitlenmesiyle oluşmaktadır. Polimer içerikli kompozitlerde kullanılan maliyeti düşük takviye elemanıdır. Cam elyaflar, camların 1200-1500 C°' de elektrik fırınında ergitilmesi ve ergiyen camların pota tabanındaki çok sayıdaki deliklerden geçerek soğutulmasıyla elde edilirler [25,26].

Cam elyafların özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Çekme mukavemetleri yüksektir.
- Isıl dirençleri düşük seviyededir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gevşerler.
- Nem tutmazlar fakat cam elyafın tutma ihtimaline karşı elyaf kaplama işlemleri geliştirilmiştir.
- İletkenlik özelliği yoktur, bu sayede cam elyafların kompozitlerde kullanımını mümkün kılar.
- Cam elyaf üretiminde Silis-kumuna farklı katkı malzemeleri ilave ederek farklı özelliklerde A-camı, C-camı, E-camı, S- camı ve R-camı gibi farklı elyaflar elde edilmektedir [25, 26].

2.1.2 Karbon Elyafı

Karbon elyaflar yaygın bir biçimde kullanılan bir elyaf grubu olup cam elyaflardan daha sonra gelişmiştir. Karbon elyafı ilk olarak ısıtma işlemi ve yanmaya tabi tutularak sentetik liflerin karbon elyafına dönüştürülmesi ile üretilmiştir. Sentetik esaslı elyaflar genel olarak, polikronitril üretilmektedir. Bu liflerin özellikleri, işlem sırasındaki sıcaklık ve gerilim koşullarının değiştirilmesiyle stabil tutulmaktadır [25].

Karbon elyafın diğer bir üretim yöntemi ise zift kullanarak elde edilmiştir. Sıvı kristal yanma işlemine tabi tutularak yüksek mukavemet değerine ve takviye özelliği sağlam olan ürün eldesi amacıyla ısı uygulanarak elyaf elde edilmektedir [25].

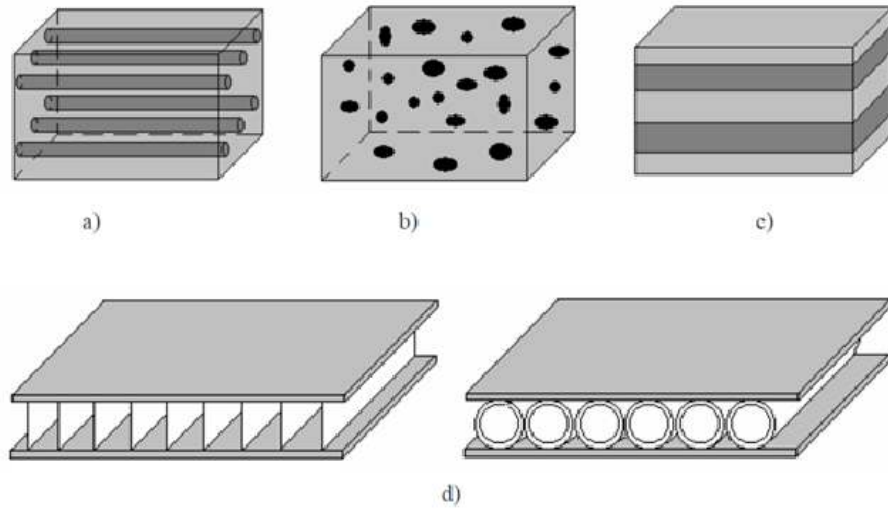
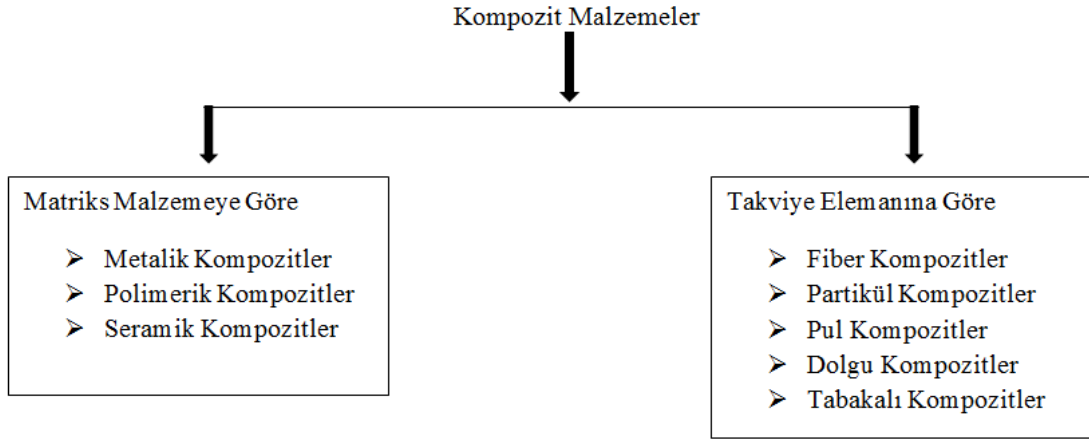
Karbon elyaf, nispeten yüksek mukavemet, düşük elyaf yoğunluğu ve modül özelliklerini bir araya getirmesiyle diğer takviye liflerine göre avantajlı olup üstün bir özellik ortaya koymaktadır [26].

2.1.3 Aramid Elyafı

Aramid elyaflar, oksijen, hidrojen, karbon ve azotu ihtiva eden organik bir bileşiktir. Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49 olmak üzere iki farklı aramid elyaf bulunmaktadır. Kevlar elyafın yoğunluğu karbon ve cam elyaflarından daha düşüktür. Aramid elyaflar elektriği iletmezler. Ayrıca basma mukavemetleri ve nem absorbe etme özellikleri kötüdür [25].

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matriks malzemesinin çeşidine göre polimerik kompozitler, seramik kompozitler, metalik kompozitler vb. gibi sınıflandırılmasının yanında partikül kompozitler, fiber kompozitler, dolgu kompozitler, tabakalı kompozitler gibi yapı bileşenlerinin formatına göre de sınıflandırma yapılabilir. Şekil 2.1’de takviye elemanlı kompozitler gösterilmiştir [27].



Şekil 2.1. Takviye elemanlı kompozitler a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler [27]

2.2.1 Fiber Takviyeli Kompozitler

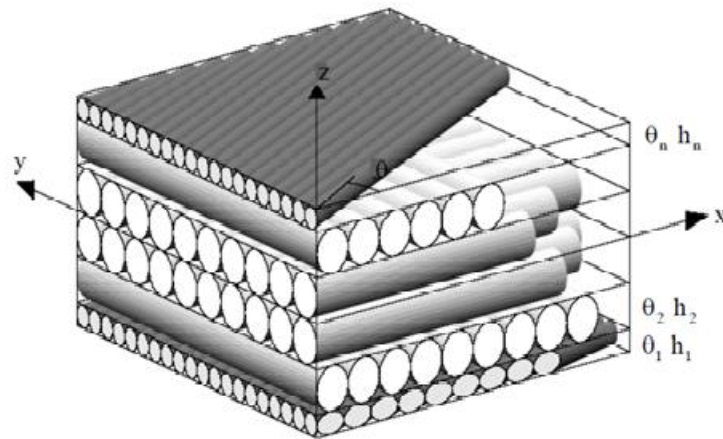
Fiber şeklinde üretilen malzemelerin mukavemeti kütle hallerindekinden daha iyi olabilmektedir. Yüksek etkinliği olan liflerin ilavesi ile bu malzemelerin özellikleri iyileştirilebilir [27].

2.2.2 Partikül Takviyeli Kompozitler

Küçük granül dolgu maddesi ile şekillendirilerek elde edilir. Bu sayede rijitliği ve mukavemetinde artış sağlanır. Mikroskobik partiküllerin matris malzeme ile meydana getirdikleri malzemelerdir. Partikül kompozitler iki gruba ayrılırlar; büyük ölçekli partikül kompozit malzemeler ve homojen karışımli sertleştirilmiş kompozit malzemeler [27].

2.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Birden fazla farklı malzemenin katmanlar halinde oluşturduğu kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemenin rijitliği, termal izolasyonu, aşınma direnci, mukavemeti, korozyon direnci, tabakalama işlemi sayesinde iyileştirilir. Plastik tabakalı laminelerde, tabakalanmış camlarda, bimetallerden oluşmuş metallerde bu iyileştirilmiş özellikler görülmektedir. Şekil 2.2’de farklı açılara sahip tabakalı kompozit plak gösterilmiştir [28].



Şekil 2.2. Farklı açılara sahip tabakalı kompozit plak [29]

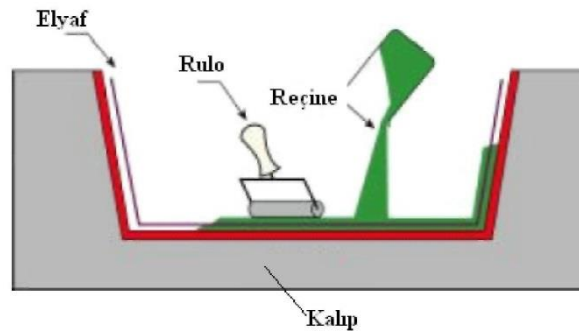
2.3 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Elle yatırma (hand lay-up)
2. Püskürtme (spray-up)
3. Elyaf sarma (filament winding)
4. RTM (Reçine Transfer Kalıplama) / reçine enjeksiyonu
5. Profil çekme / pultrüzyon (pultrusion)
6. Hazır kalıplama / compression molding (SMC,BMC)
7. Hazır kalıplama pestili / SMC (sheet moulding composites)
8. Hazır kalıplama hamuru / BMC (bulk moulding composites)
9. Vakum bonding / vakum bagging
10. Otoklav / autoclave bonding
11. Preslenebilir takviyeli termoplastik [30].

2.3.1 Elle yatırma (hand lay-up)

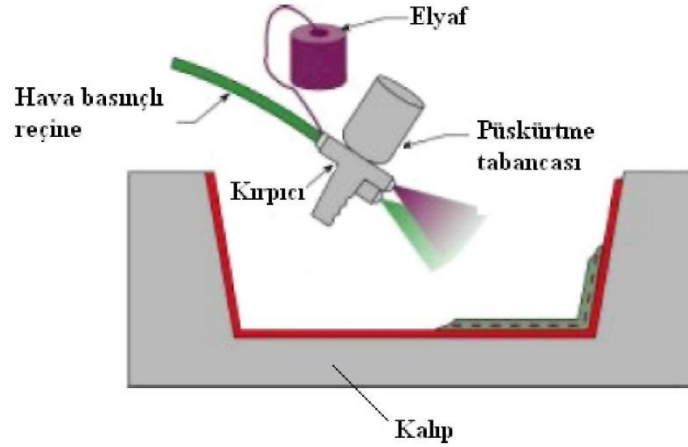
Kırpılmış elyaflarla ya da örgü takviyeli kumaşlar kalıp üzerine yerleştirilmeden önce kalıba jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaflar kalıp üzerine yatırılır ve reçine kumaşa sürülür (Şekil 2.3). İşlem sırasında reçine elyafa iyi nüfuz etmelidir. Elle yatırma yönteminde vinil ester ve fenolik reçineler haricinde polyester ve epoksi de tercih edilmektedir. Bu yöntem düşük sayıdaki üretimler için tercih edilmesinin yanında yoğun işçilik gerektirir [30].



Şekil 2.3. Elle yatırma yöntemi [31].

2.3.2 Püskürtme (spray-up)

Bu yöntem elle yatırma yöntemine oldukça benzemektedir (Şekil 2.4). Kesilmiş elyaflar kalıp üzerine, özel bir tabanca ile birlikte reçine püskürtülür. Elyafın kesilme prosesi tabanca üstünde bulunan kırpıcı vasıtasıyla yapılır. Püskürtülme işlemi ardından yüzeye rulo sürülerek düzeltilir [30].



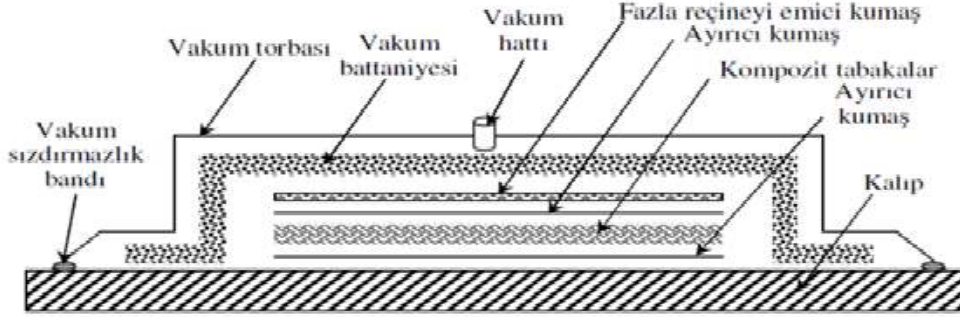
Şekil 2.4. Püskürtme yöntemi [25].

2.3.3 Reçine transfer kalıplama

Bu imalat yönteminde iki parçalı kalıp kullanılmaktadır. Kalıbın çelik kalıp maliyetine göre daha düşük olması kompozit malzemeyle yapılmasından ötürüdür. Bu yöntem jelkotlu ya da jelkotsuz her iki yüzeyinde pürüzsüz olması istenen malzemelerde çoğunlukla kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Reçine basınç yoluyla kalıba pompalanır. Bu işlem fazla zaman gerektirir. Matriks enjeksiyonu ılık, soğuk ya da maksimum 80 C°'ye kadar ısıtılmış kaplarda gerçekleştirilebilir. Vakumun bu yöntemde kullanılması gaye reçinenin elyaf içerisine iyi işlemesi ve içerdeki havanın dışarı çıkarılmasıdır. Bu yöntemle gözeneksiz ve karmaşık malzemeler üretilebilir [30].

2.3.4 Vakum torbalama / vakum bagging

Kompozit malzeme ilk olarak kalıba yerleştirilir, sonra en üst katman olarak vakum torbası yerleştirilir (Şekil 2.5). Vakum torbası havanın emilmesiyle, malzemenin üzerine basınç altında aşağı çekilir. Ardından reçinenin kür işlemi için numune fırına yerleştirilerek ısıtılır. Kompozit malzeme onarım işlemlerinde de bu yöntem sıkça kullanılmaktadır [30].



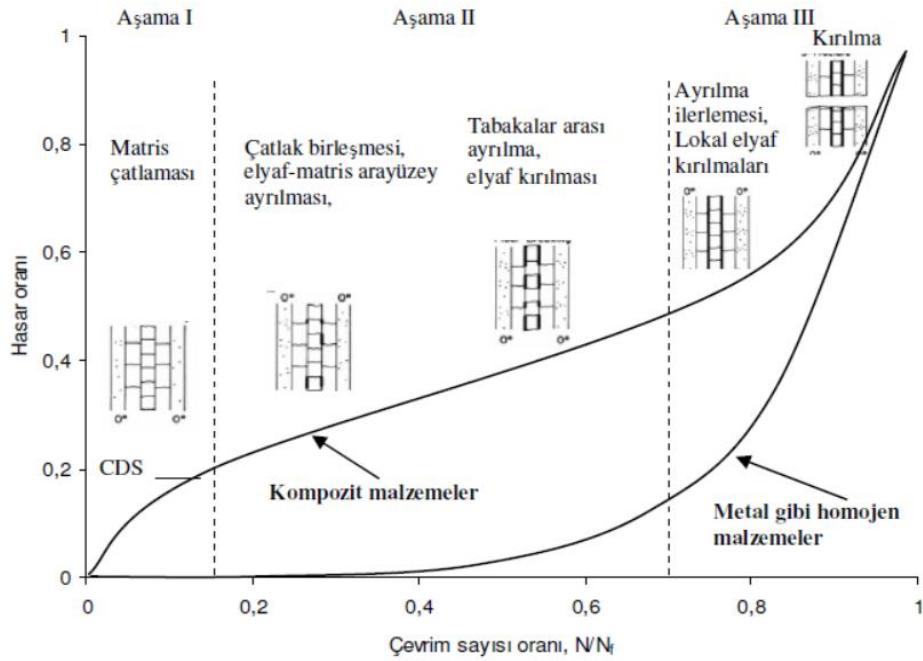
Şekil 2.5. Vakum torbalama işlemi [32].

2.4 Kompozit Malzemelerde Yorulma

Tekrarlı yükler altındaki malzemeler, uygulanan yüke karşılık malzemenin güvenli gerilme sınırının altındaki gerilmelere maruz kalsa da; uygulanan yükün tekrarlı dinamik karakterine bağlı olarak başlayan çatlak oluşumu ve ilerlemesi, malzemede meydana gelen yorulma hasarlarının başlıca nedenidir. Sürekli elyaf polimerik kompozitler, elyaflar doğrultusunda, metallerle karşılaştırıldığında üstün performans göstermektedir. Fakat, kompozit malzemeler anizotrop ve heterojen özelliklerinden ötürü homojen ve izotrop malzemelerden daha karmaşık elyaf uyumları ve yükleme yönüne göre hasar mekanizmalarında değişik özellikler sergilemektedir [33-36].

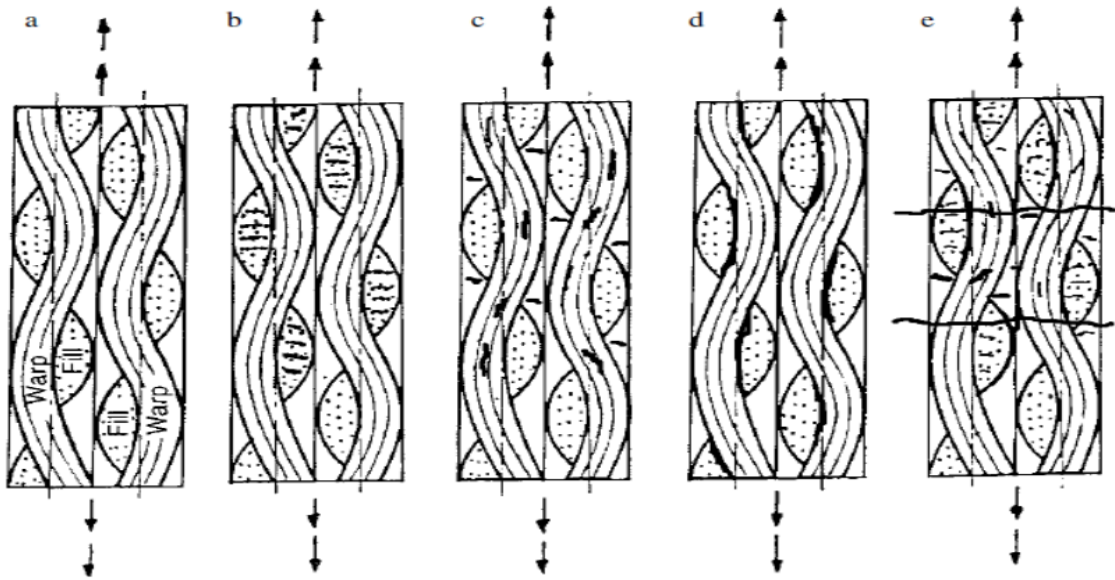
Şekil 2.6'da, kompozit ve metal malzemeler için yorulma ömrü süresince meydana gelen hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü süresince meydana gelen hasar çeşitleri şematik olarak gösterilmektedir. Metal parçalarda yorulma hasarları, ilk olarak düşük hızda ortaya çıkıp daha sonra genel olarak tek bir çatlak biçiminde çevrimsel yükleme eksenine dik olarak ilerlemektedir. Kompozit malzemelerde ise ilk olarak çeşitli hasar tipleri (elyaf kırılması, matris çatlaması, tabaka ayrılması, elyaf-matriks ara yüzey ayrılması vb.) daha hızlı bir biçimde meydana gelmekte ve bu hasarlara parçanın bütününde rastlanabilmektedir.

Hasar oluşumu, kompozit malzemelerde yorulma ömrünün bir işlevi olarak üç farklı fazda incelenmektedir. İlki daha çok matriks çatlaklarından meydana gelen hasar, yorulma ömrünün yaklaşık %10-25'inde oluşmaktadır. Bu süreçte malzeme mukavemetindeki düşüş gözardı edilebilir seviyede azdır. Fakat, rijitlik azalması, malzeme rijitliğinin yaklaşık %8'i düzeyindedir. Süregelen yük çevrimlerinde oluşacak hasar süreci ilk olarak oluşan bu matriks çatlaklarına bağlıdır. İkinci aşamada, elyaf-matris ara yüzey ayrılması, tabakalar arası ayrılma başlangıcı, çatlakların birleşmesi ve elyaf kırılması gibi birçok sayıda hasar çeşidi oluşmaktadır. Bu evrede hasarların oluşumu ve ilerlemesi ilk aşamaya nazaran çok yavaştır ve yorulma ömrünün yaklaşık %70-80'i harcanmaktadır. Son aşamada tabaka ayrılmaları ve elyaf kırılmalarının meydana geldiği üçüncü aşamadır. Hasar bu bölümde hızlı bir biçimde ilerlemekte ve parça kırılmaktadır [33,36,37].



Şekil 2.6. Kompozit malzemeler ve metal gibi homojen malzemeler için yorulma ömrü boyunca oluşan hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca oluşan hasar tipleri [33,36,37].

Çevrimsel yükleme esnasında dokuma kumaş kompozitlerde hasar oluşum sırası Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Dokuma kumaş kompozitler, enine elyaf demeti, boyuna elyaf demeti ve reçine zengin alan olarak isimlendirilen 3 yapısal eleman ihtiva etmektedir. Çevrimsel yükleme esnasında reçine zengin alanlarda enine çatlaklar, enine elyaf demetinde (weft) çatlak meydana gelmesi, boyuna elyaf demetinde (warp) kesme hasarları, tabakalar arası ayrılma, enine ve boyuna elyaf demeti arasında ayrılma, elyaf demetlerinin kopması ve son olarak kırılma oluşmaktadır [33,39,40].

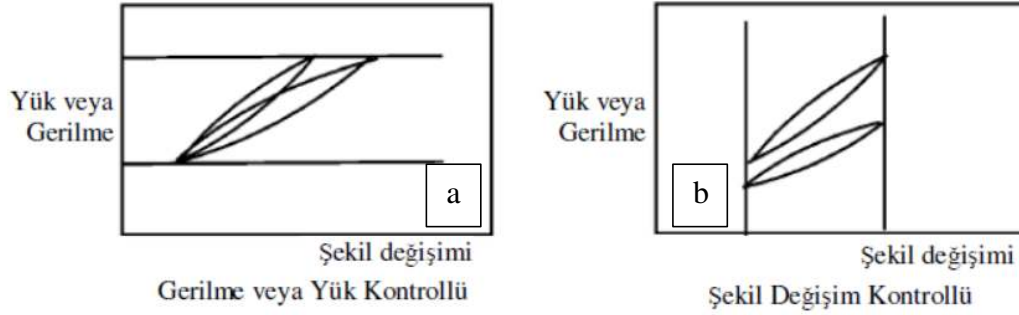


Şekil 2.7. Çevrimsel yükleme sırasında dokuma kumaş kompozitlerde oluşan hasarlar, a) test başlangıcı (hasarsız), b) enine elyaf demetinde (weft) çatlak oluşumu, c) boyuna elyaf demetinde (warp) kesme hasarları ve reçine zengin bölgelerde enine çatlaklar, d) enine ve boyuna elyaf demeti arasında ayrılma, e) tabakalar arası ayrılma ilerlemesi ve elyaf demetlerinin kopması [33].

2.4.1 Yorulma Testleri

Yorulma testleri, burulma ya da bileşik zorlamaları oluşturan eksenel (çekme-basma ve eğilme) test makinelerinde yapılmaktadır. Fakat uygulamada en fazla eksenel gerilme meydana getiren deney makineleri kullanılmaktadır [52]. Günümüzde çoğu servo-hidrolik olarak işlev gören bu makinelerde yükleme, test frekansı ve şekil değişim argümanları istenilen değere ayarlanabilmekte ve deneyler pozisyon, yük ve şekil değişim kontrollü olarak gerçekleştirilebilmektedir. Kompozit malzemeler, yorulma testleri esnasında meydana gelen mikroskobik hasarlardan ötürü çevrim sayısı ile değişen rijitlik ya da yumuşama kaybı göstermektedir.

Bu sebeple Şekil 2.8’de görüldüğü üzere çevrimsel yüklemenin etkisi ile yük kontrolü testlerde şekil değişimi artarken, şekil değişim kontrollü testlerde gerilme düşmektedir [33,41].



Şekil 2.8. Polimerik kompozitlerin (a) gerilme, (b) şekil değişim kontrollü çevrimsel yükleme altında davranış farklılıkları [41].

Yorulma testleri, çoğunlukla sinüzoidal yükleme ile gerçekleştirilmektedir. Böylece, yorulma yükünün durumu Şekil 2.9’da ifade edilen argümanlar ile tanımlanabilmektedir. Minimum ve maksimum gerilmenin saptanmasıyla, gerilme genliği (σ_a), gerilme aralığı (σ_{ar}), ortalama gerilme (σ_{ort}) ve gerilme oranı R parametreleri (1.1-4) ile hesaplanabilmektedir [42].

$$\sigma_{ar} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.1)$$

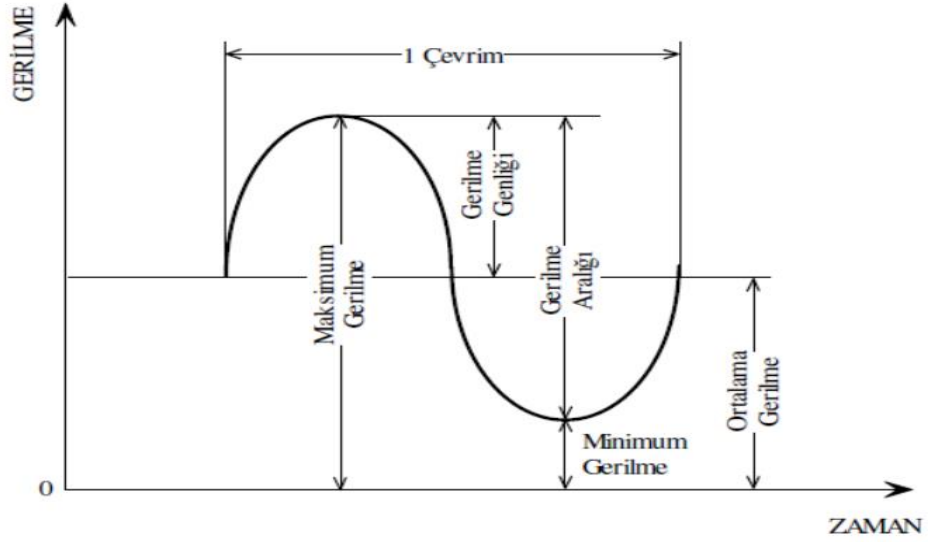
$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.3)$$

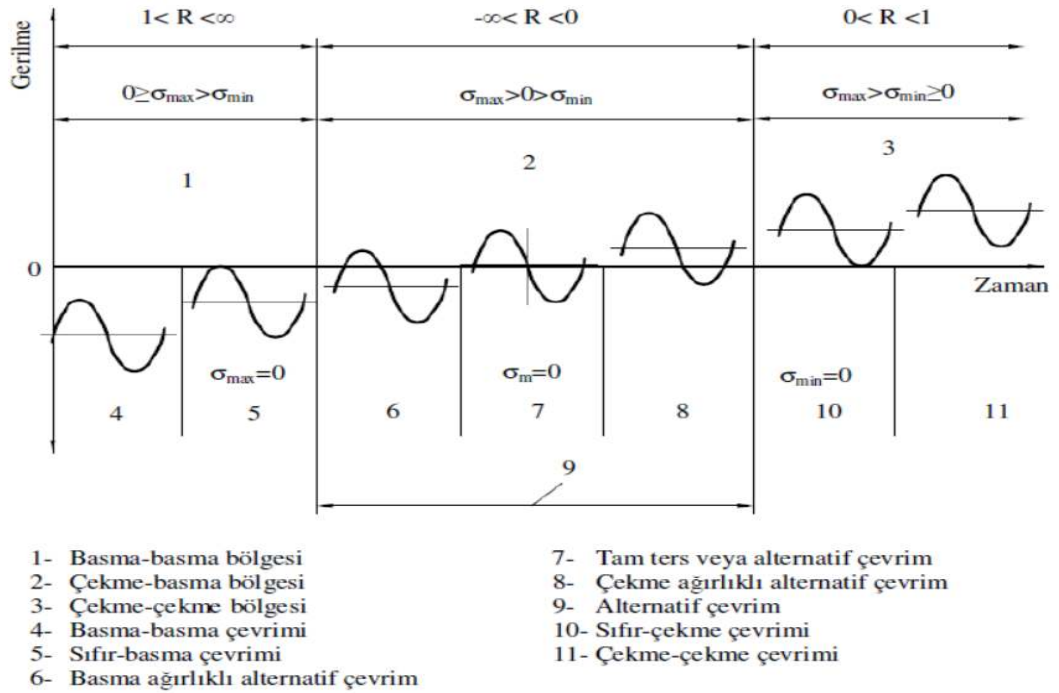
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.4)$$

R değeri, çevrimsel gerilmenin çeşidini gösteren değerdir. Şekil 2.10’ da yorulma testlerinde kullanılabilecek değişik R değerleri için yükleme çeşitleri gösterilmektedir.

Metal malzemelerle kıyaslandığında kompozit malzemelerin yorulma testlerinde numune tutucu kavrama bölgesi hasarı, basma yükü esnasında burkulma hasarı ve yüksek frekanslardaki çevrimsel yük uygulanmalarında numunede ısı artışı problemleriyle karşılaşmaktadır.



Şekil 2.9. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme tipi [43].



Şekil 2.10. Yorulma deneylerinde kullanılan çevrimsel yükleme tipleri [44,45].

Numunenin test esnasında kavrama bölgesinden hasara uğramaması için olabildiğince düşük kavrama basıncı uygulanmalı ve gerekiyorsa numune uçlarına destek parçaları yapıştırılmalıdır [44]. Çekme-çekme yorulma testlerine göre uygulanması sorunlu olan çekme-basma ya da basma-basma yorulma testlerinde numune burkulmasını engellemek için ölçü boyu kısa, stabil numune tercih edilmesi ya da burkulma engelleyici ilave araçların kullanılması önerilmektedir [46,47].

2.4.2 S-N Eğrileri

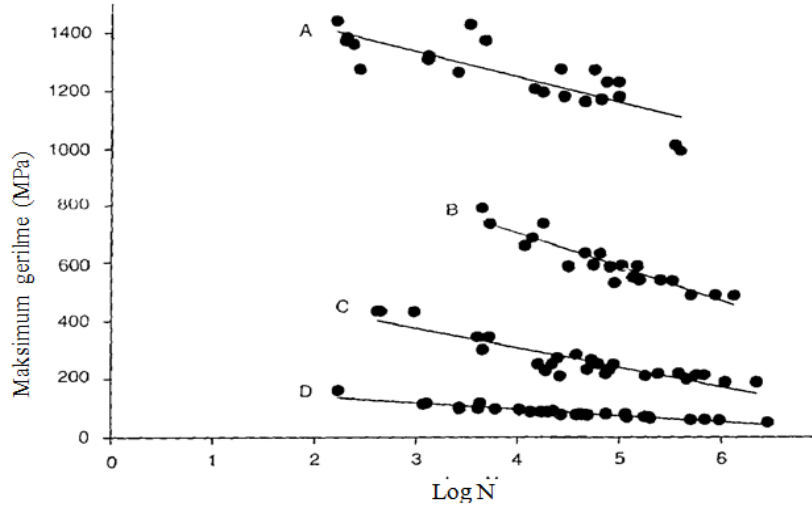
Kompozit malzeme yorulma testleri sonuçları genellikle S-N eğrisi olarak isimlendirilen maksimum yorulma gerilmesine istinaden 10 tabanına göre logaritmik ölçek üzerindeki hasar çevrimleri biçiminde gösterilmektedir [42,48]. Şekil 2.11’de çekme-basma çevrimsel yükleme testleri yapılan farklı elyaf uyumlarına sahip grafit/epoksi kompozit plakaların S-N eğrileri görülmektedir. Sürekli elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin S-logN eğrileri çoğunlukla doğrusal bir değişim oluşturmakta ve (1.5) veya (1.6) ile ifade edilmektedir [33,42,49,50];

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\phi}(m \log N + k) \quad (1.5)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\phi}} N^m = c \quad (1.6)$$

Bu denklemlerde;

- $\sigma_{\max}$: Maksimum gerilme değeri
- N : Hasar çevrim sayısı
- σ_{ϕ} : Ortalama statik mukavemet
- m, k ve c : Malzeme ve deney sabitleridir.



Şekil 2.11. Çekme-basma çevrimsel yükleme altında grafit/epoksi plakaların S-N eğrileri, a) [0], b) [0/90], c) [0/±45/90], d) [±45] elyaf oryantasyonları [36].

2.4.3 Yorulma Ömrü Tahmin Metotları

Kompozit malzeme üretiminin temel aşamaları olan tasarım ve analiz basamaklarında malzemenin ömrünü belirlemek amacıyla uygulamada en yaygın 3 model; gerilme-yorulma (Stress-Life) ömrü, şekil değiştirme-yorulma ömrü (strain-life) ve kırılma mekaniği (fracture mechanics) metotlarıdır. Adı geçen metotlar ömrün, çevrim sayısı türünden ifade edilmesine olanak tanımaktadır. Malzemeden hasar oluşumuna kadar gerçekleştirilen tekrarlı yükleme sayısı $1 \leq N \leq 10000$ ise yorulma düşük çevrimli (low-cycle); $N > 10000$ ise yorulma yüksek çevrimli yorulma olarak adlandırılmaktadır [33].

Gerilme-yorulma ömrü tespit yöntemi, gerilme düzeylerine bağlı olup az tekrarlı yorulma çalışmalarında kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntem, büyük ölçekli tasarım ve yüksek tekrarlı yorulma ömür uygulamalarında rahatlıkla kullanılan bir metottur. [51,35].

Yorulma yüklemesine maruz kalan malzemelerin mukavemetini tespit etmek amacıyla numuneler ya tekrarlanır ya da değeri değişen yüklerin tesiri ile olması gereken genlikte geçen tekrar sayısı hesaplanır. Malzemelerin yorulma mukavemetini hesaplamak için bir çok test etme gereksinimi, yorulmanın istatistiği yapısından ötürüdür. Kirişin hasar görmesi için hem dönüş sayısı belirlenip kaydedilir hem de kiriş testi için sabit eğilme yükü uygulanır. Test için ilk olarak malzemenin akma gerilmesinin altında bir değer

kullanılır daha sonra ikinci test olarak birinci testten daha düşük gerilme uygulanır. Bu işlem tekrar ettirilir ve S-N diyagramında sonuçlar çizilir [36].

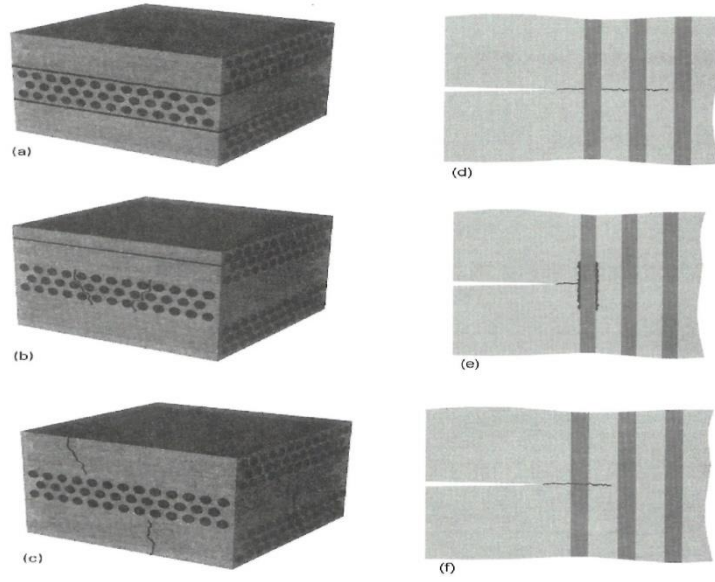
Yorulma ömrü şekil değiştirmeler göz önüne alınıp yerel bölgelerde plastik deformasyonunun detaylı analizi ile hesaplanır. Bu yöntem yorulmanın düşük tekrar sayılarını sınıflandıran ve çatlak başlangıcını ihtiva eden bir metottur. Yorulma hasarı çentik bölgelerinde oluşur. Yorulma çatlağı meydana gelmesi durumunda plastik şekil değişimi döngüsel oluşur [33].

Malzemelerin yorulma cihazıyla yorulma deneyleri yapılarak ömürleri tespit edilir. Yorulma deneyleri; eğilme, burulma, eksenel ya da bunların bir kaçından oluşan tekrarlı yük ya da gerilmeler sayesinde gerçekleştirilir. Dönel yapıdaki yorulma deneyleri sinüzoidal olarak tekrarlanan yüklere maruz bırakılarak yapılır [37].

2.4.4 Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışları

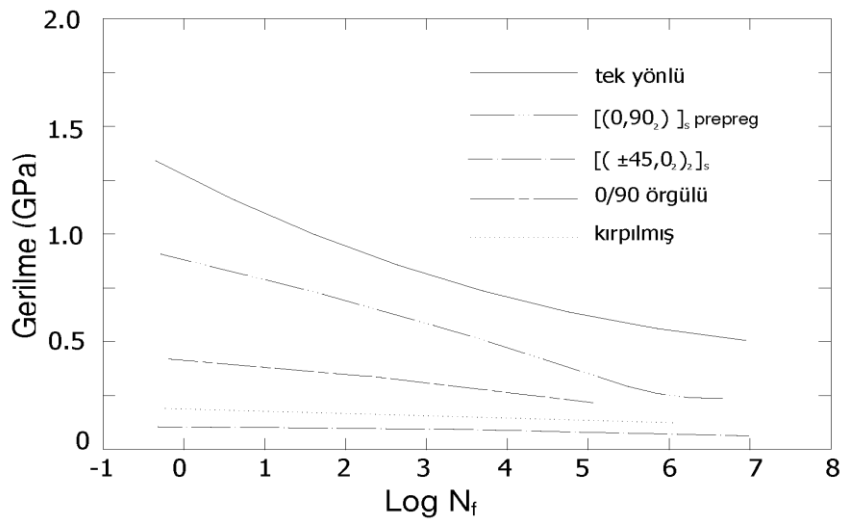
2.4.4.1 Fiber Takviyeli Kompozitlerin Yorulma Davranışları

Yüzyıla aşkın süre boyunca metallerin yorulması ile ilgili çalışmalar yapılmış olup çok sayıda tasarım bilgisi elde edilmiştir. Kompozit malzemelerin yorulma hasar mekanizmaları çok karmaşık yapıdadır. Takviye elemanı türüne, uygulana yüke ve tabaka yapısına bağlı olarak yorulma hasarında farklılıklar oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin kırılma modları Şekil 2.12’de gösterilmiştir [38].



Şekil 2.12. Tipik kırılma modları (a)interlaminar kırılma (b) intralaminar kırılma (c) translaminar kırılma (d)matriks çatlağı (e) fiber-matriks ayrılması (f) fiber kırılması [40].

Yorulma işlemi devam ederken matriks çatlağı ve fiber kırılması sebebi ile lokal şekil değiştirmeler belirli bir değeri aşar. Matriks çatlağının büyüme süresince uçtaki kayma gerilmesi, malzeme yüzeyinde hasara sebebiyet verir. Çatlak belirli bir büyüklüğe eriştiğinde final hasarı oluşur. Şekil 2.13'te örnek bir yorulma-ömür diyagramı gösterilmektedir [35].



Şekil 2.13. Çeşitli fiber takviyeli kompozitlerin yorulma diyagramı [41].

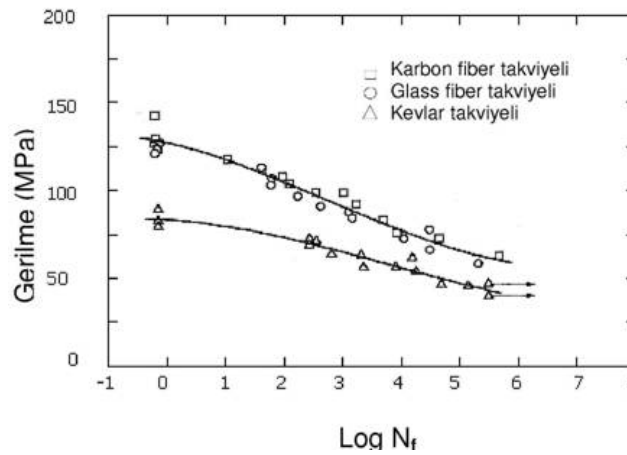
Çekme mukavemetleri şekil değişimine ve ısıya karşı hassas olması ve çevrim boyunca şekil değişimlerinde büyük ölçüde ısı artışı oluşması cam fiberlerin hem şekil değiştirme oranından hem de neme karşı hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozitler cam fiber takviyeli kompozitlere nazaran aktif durumlarda daha az bozulurlar ve ısı artışları ihmal edilecek düzeydedir [33].

2.4.5 Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler

2.4.5.1 Malzeme Çeşidi

Karbon, bor ve cam fiberler gibi gevrek fiberler yorulma zamanlarında metallerin zayıf durumlarını yansıtmamalıdır. Bunun yanı sıra takviye fazı, büyük elastik deformasyonlara sebebiyet verecek derecede esnek olmamalıdır. Reçine içerisinde gerilme yığılmalarına sebebiyet veren olaylar oluşur ve bu hasarlar kritik seviyeye ulaşıncaya kadar kırılma meydana gelir [33].

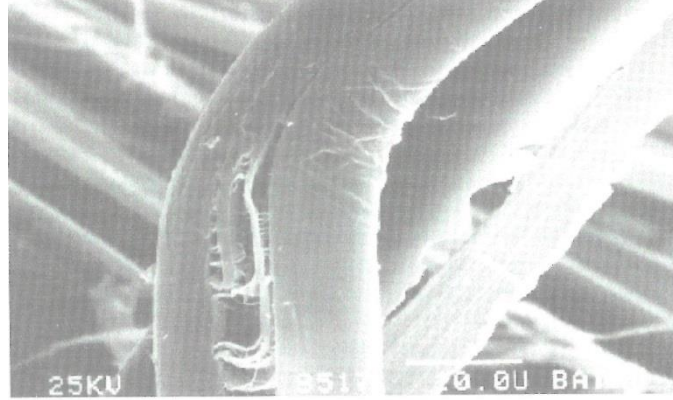
Kompozitin yorulma dayanımı, gerilme tek eksenli ya da fiber doğrultusunda olmazsa matriksin farklı yüklerin etkisinde kalmasıyla düşer. Kevlar fiber takviyeli kompozitlerde kayma ve basma gerilmeleri, karbon ve cam fiber takviyeli kompozitlere göre daha fazla hasara sebep olurlar. Şekil 2.14, Kevlar takviyeli kompozitlerin kayma düzlemindeki zayıflığını göstermektedir [33].



Şekil 2.14. Fiber doğrultusuna 45° açılı test edilmiş. R = 0,1 [42].

Şekil 2.15'te Kevlar takviyeli kompozitin mikroskopik görüntüsünde fiberlerin kıvrılması ve yırtılması açıkça görülmektedir.

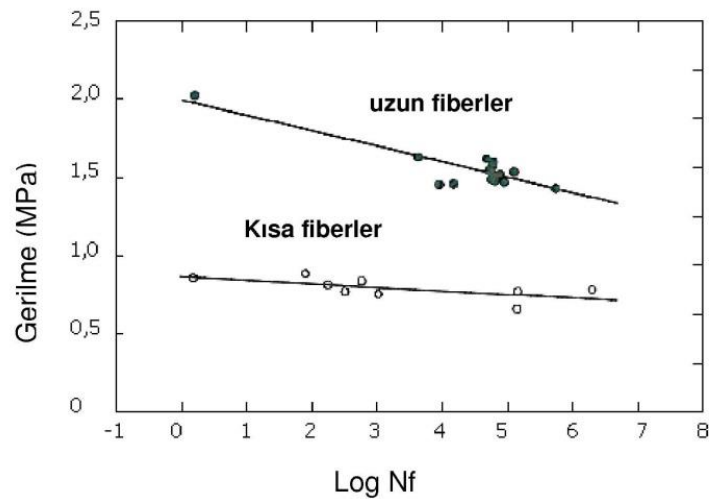
Kompozitlerin zayıf bölümleri (ara yüz ve reçine) burulma testine tabi tutulurken kesme kuvvetinin etkisinde kalırlar. Burulma rijitliği çevrim sayısı arttıkça düşer [44].



Şekil 2.15. Kevlar-49 fiberin yorulma sonucu kırılması ve yırtılması [38].

2.4.5.2 Fiber Uzunluğu

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin yorulma dayanımı, kısa fiber takviyeli kompozitlere nispeten daha yüksektir. Lokal hasarlar matrikste başlayıp kompozitin bütünlüğü en ufak fiberdeki hasar gerçekleşmese bile zarar görür. Kısa ve sürekli fiber takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin yorulma eğrisi Şekil 2.16'da verilmiştir [33].



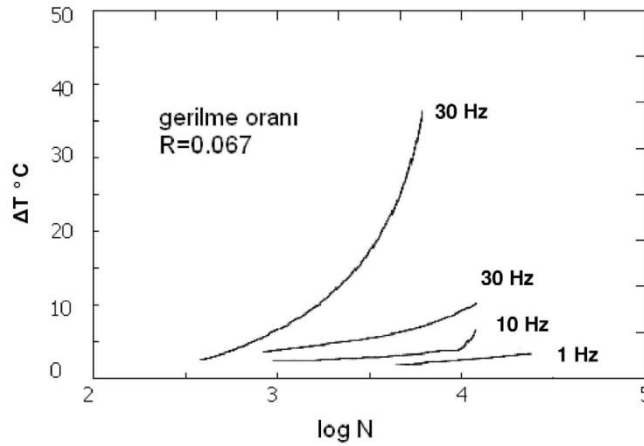
Şekil 2.16. Kısa ve sürekli fiber takviyeli karbon/epoksi kompozitin yorulma eğrisi [41].

2.4.5.3 Test Makinesi ve Numune Etkisi

Yorulma deneyleri için farklı test cihazları bulunmaktadır. Önemli husus, test esnasında histeritik ısınmanın sebep olacağı aşırı sıcaklığı engelleyecek test oranının saptanmasıdır. Polimer malzemelerde, düşük sıcaklık artışları bile mekanik özelliklerde ciddi değişikliklere sebebiyet verir. Test edilecek kompozitin yapısı numune biçimini önemli derece etkiler [33].

2.4.5.6 Frekans

Testler genel olarak numunede fazla ısınmaya sebep olmayacak şekilde olabildiğince yüksek frekansta gerçekleştirilir. Ancak karbon fiber takviyeli kompozitlerin ısı iletkenliği güçlü olmasına rağmen yorulma ömrünü değiştirebilecek sıcaklık artışı test boyunca gerçekleşebilir. Daha önceden var olan çatlaklar ya da delikler periyodik yüklemeler esnasında yüksek lokal sıcaklık artışlarına sebep olabilir. (Şekil 2.17)



Şekil 2.17. Karbon fiber takviyeli kompozitin farklı frekanslardaki çevrim sonucu oluşan numune ısınması [38].

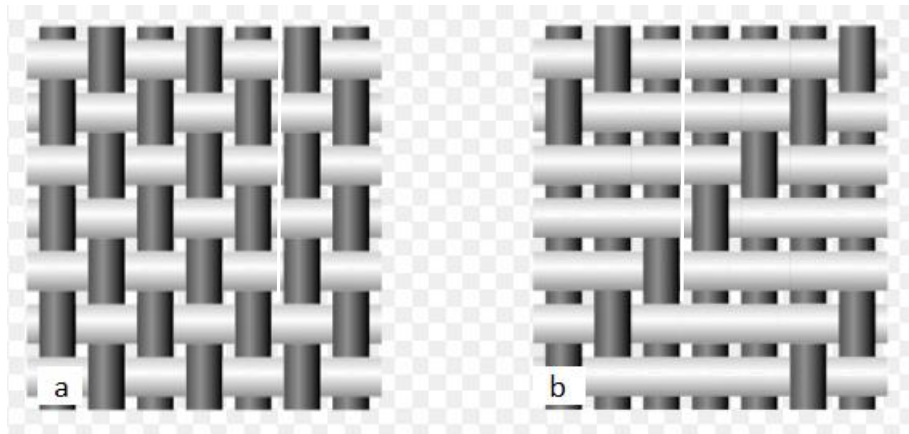
3. MATERYAL VE METOT

Tabakalı hibrit kompozit malzeme numuneleri oryantasyon açıları farklı karbon ve cam elyafları epoksi reçine yardımıyla birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Numunelerin tabakalı hibrit yapıları bir sıra karbon bir sıra cam olacak şekilde üretilmiştir. ASTM 3479 M standartlarına göre üretim ve deney aşamaları gerçekleştirilmiştir. Üretilen 8 farklı numunenin elyaf oryantasyon açıları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Numunelerde kullanılan elyafların oryantasyon açıları

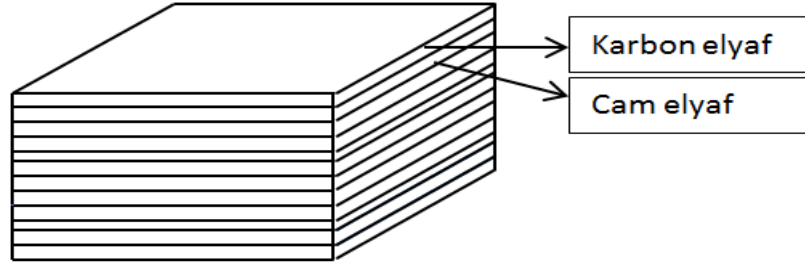
Numune No Malzeme	1	2	3	4	5	6	7	8
Karbon	0°	0°	Twill	45°	Plain	Plain	45°	Twill
Cam	0°	45°	0°	45°	Plain	Twill	Twill	Twill

Numunelerde kullanılan plain ve twill ve elyafların şematik gösterimi Şekil 3.1’dedir.



Şekil 3.1. a) plain elyaf, b) twill elyaf

Numunelerin üretim aşamasında öncelikli olarak kullanılacak olan elyaflar 200x250 mm boyutlarında kesilmiştir. Bütün numuneler 12 tabakalı olup hepsinde 6 tabaka karbon elyaf ve 6 tabaka cam elyaf kullanılmıştır. Numune dizilimleri şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Karbon ve cam elyafların dizilimlerinin şematik gösterimi

Karbon ve cam elyaflara sürülecek olan reçine miktarını belirlemek için elyaflar Şekil 3.3'te gösterilen maksimum 510 gr ölçebilen Radwag marka hassas terazide ölçülmüştür. Elyafların ağırlıklarının %20 si kadar reçine ve sertleştirici kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Elyaf ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazi

Üretime başlamadan önce numunelerin kalıptan daha iyi ve rahat çıkabilmesi için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı Wax- QV 5110 sürülüp yarım saat beklenmiştir. Karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitler MGS Laminasyon Epoksi Reçine L285 ve MGS Laminasyon Epoksi Sertleştirici H285 kullanarak elle yatırma yöntemiyle Şekil 3.4'teki gösterildiği gibi birleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Kullanılan kalıp ve reçine sürülmüş elyaflar

Birleştirme işlemi yapılan numuneler Şekil 3.5’te görüldüğü gibi; plakalar üzerinde elektrikli ısıtıcı ve pompa ünitesine sahip otomatik kontrollü hidrolik sıcak pres yardımıyla 30 bar basınçta üretilmiştir. Kürleme işlemi ise sıcaklığın 30, 50, 70 ve 100 C°’ ye kademeli olarak arttırılması ile yapılmıştır.



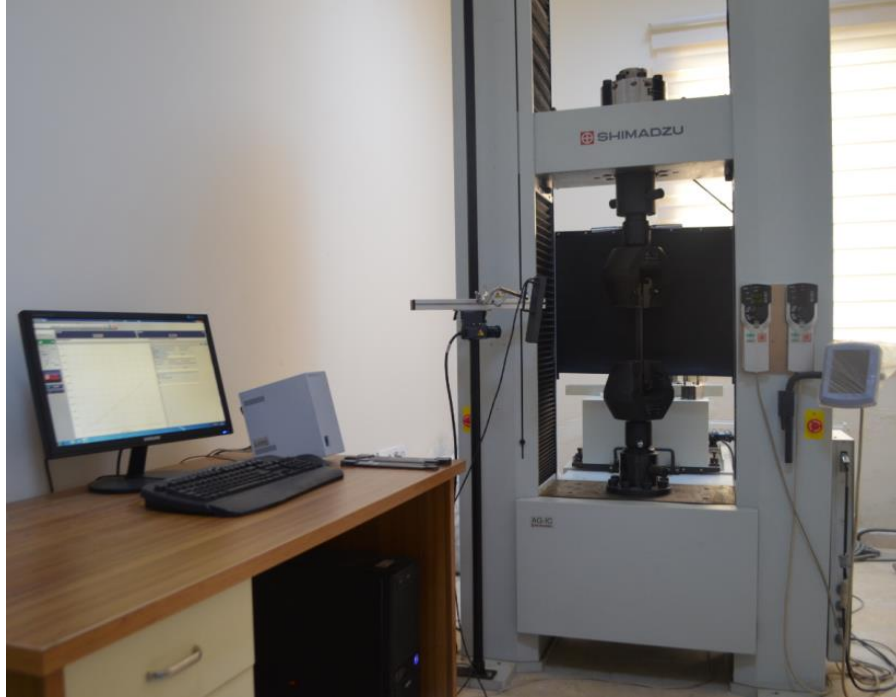
Şekil 3.5. Hidrolik pompa, hidrolik sıcak pres ve kontrol ünitesi

Sekiz numune için üretilen kompozit plakalar ASTM 3479 M standartlarına göre 25x250 mm boyutlarında kesilmiştir ve her numune için 15 adet olacak şekilde 120 numune elde edilmiştir. Çekme ve yorulma deneylerinin sağlıklı yapılabilmesi aynı zamanda numunelerin ezilmesini önlemek için papuç yapıştırılmış hali Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan numune örneği.

Çekme ve yorulma deneyleri Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Çekme deneylerinde kullanılan üniversal test cihazı 250 kN kapasiteye sahip ve çekme, eğilme, basma, burulma testlerinin yapılmasına imkân vermektedir. Şekil 3.7’de üniversal test cihazına bağlı bir numune görülmektedir.



Şekil 3.7. Çekme deneylerinde kullanılan üniversal test cihazı.

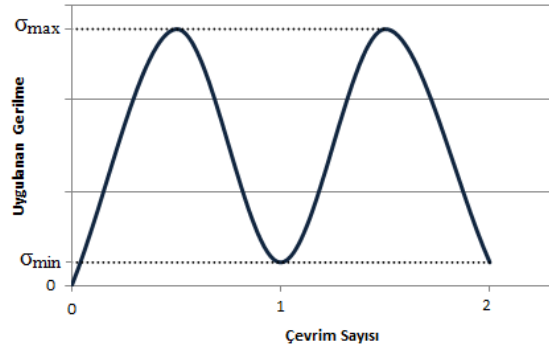
Maksimum çekme gerilmeleri tespit edilen numuneler yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma deney düzeneği Şekil 3.8'dedir. Yorulma testlerinde Scimadzu marka 100 kN kapasiteye sahip yorulma test cihazı kullanılmıştır. Yorulma deneylerinin standartlara uygun olması için American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından hazırlanan ASTM 3479 M standardında belirtilen deney prosedürleri takip edilmiştir. Aşağıda adım adım deney prosedürleri anlatılmıştır.

1. Numunenin üç farklı bölgesinden kesit alanı hesaplanır.
2. Beş kontrol numunesi statik teste tabi tutularak ortalama çekme mukavemeti hesaplanır.
3. Çekme mukavemetini geçmeyecek şekilde maksimum ve minimum gerilme veya gerinim seçilir.
4. Bütün numunelere uygulanacak frekans ve dalga formu belirlenir (sinüs, kare, trapez, üçgen).
5. Numune test cihazına bağlanır.
6. Belirlenen yükleme koşulu için çevrim sayısı kaydedilir.
7. Aynı gerilme değeri için üç numune test edilerek ortalamaları kaydedilir.
8. Numuneye uygulanan gerilme düşürülerek test tekrar edilir.
9. Uygulanan gerilmeye göre çevrim sayısı grafiksel olarak hazırlanır.



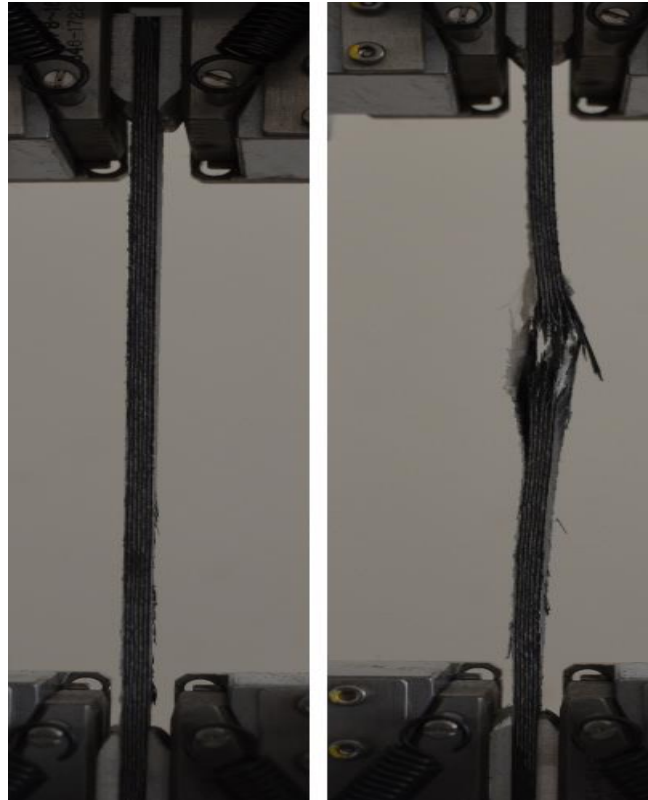
Şekil 3.8. Yorulma deney düzeneği

Yorulma deneylerinde numunelere uygulanan maksimum gerilme statik hasar yükünün %80, %75, %70 ve %65'ine denk gelecek şekilde seçilmiştir. Böylece numunelerin aynı oranda yüklenmesi sağlanmıştır. Testler sırasında $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.1$ ve frekans 10 Hz. seçilmiştir. Şekil 3.9'da yorulma deneyleri sırasında gerilmenin numunelere uygulanış şekli verilmiştir.



Şekil 3.9. Yorulma testleri sırasında kullanılan dalga formu

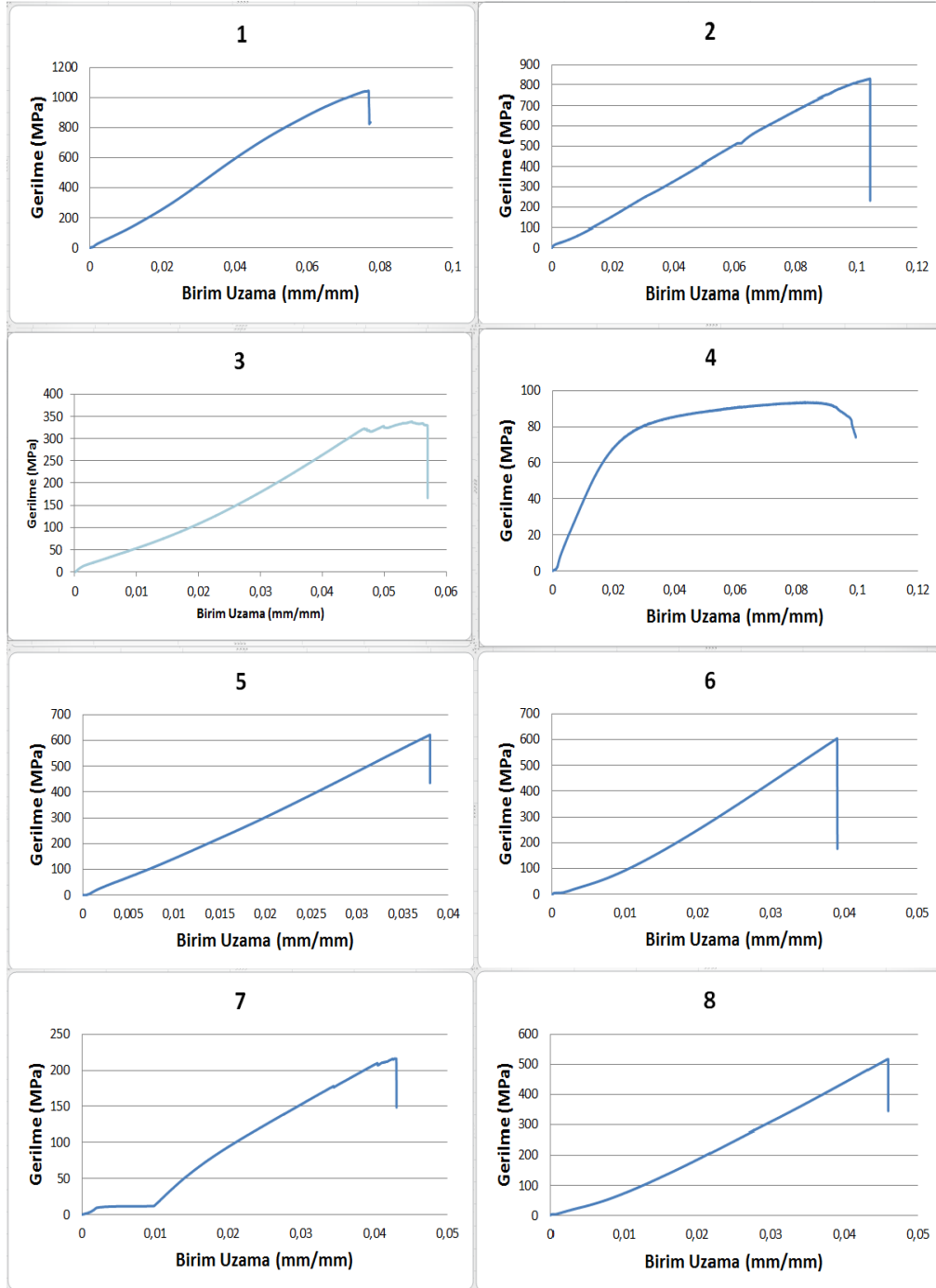
Şekil 3.10'da ise yorulma test cihazına bağlanmış numunenin deney öncesi ve deney sonrası hali verilmiştir.



Şekil 3.10. Yorulma cihazına bağlı numune görüntüsü

4. SONUÇLAR

Yorulma testleri yapılmadan önce bütün numuneler çekme testine tabi tutularak maksimum çekme dayanımları tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonrasında sekiz numune için elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.1’de bu deneylerden elde edilen maksimum gerilme değerleri ise Tablo 4.1 de verilmiştir.

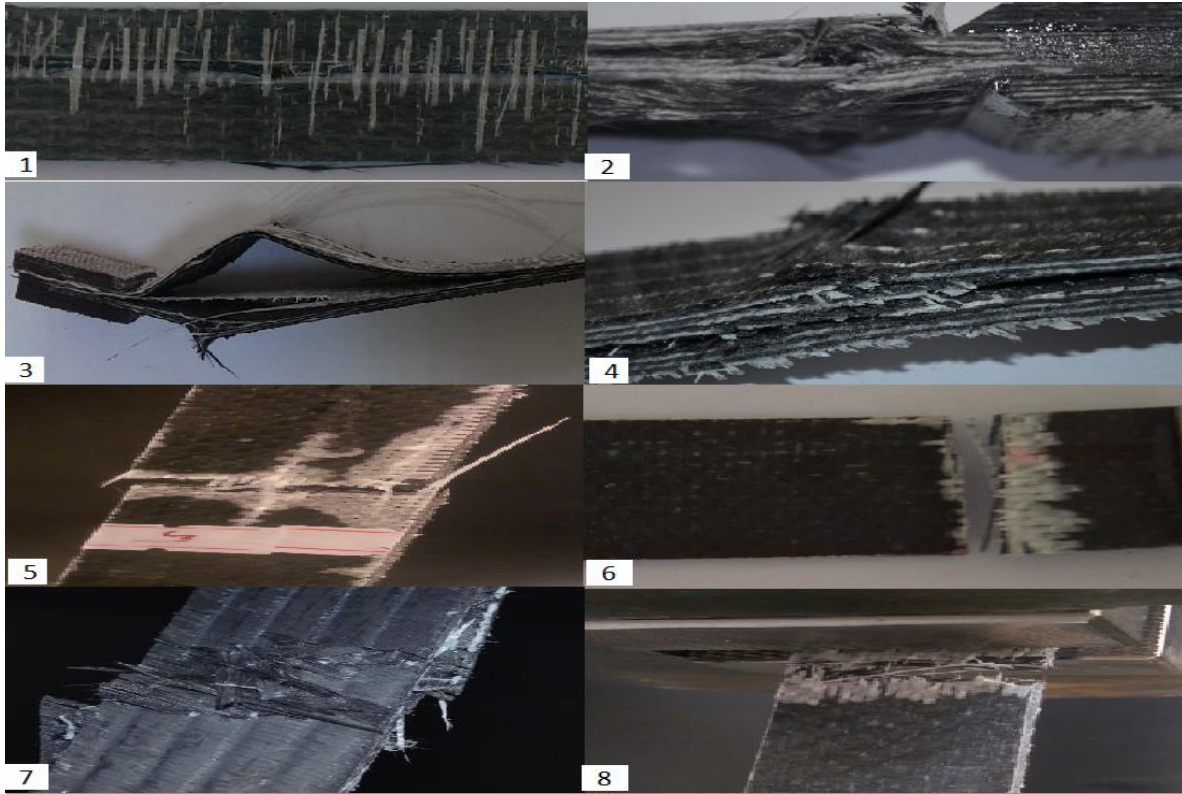


Şekil 4.1. Gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tablo 4.1. Numunelerin maksimum çekme dayanımları

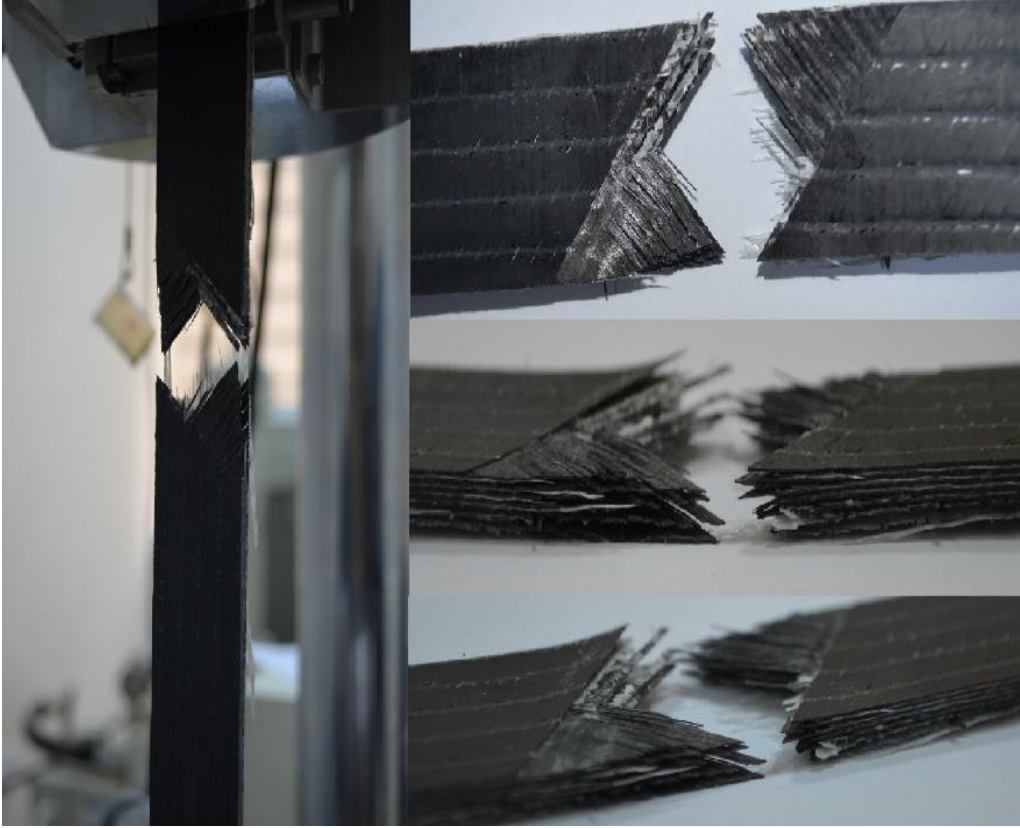
Numune Numarası	Tabaka Oryantasyonları	Maksimum Gerilme (MPa)
1	[Karbon tek yönlü (0°) ₆ / Cam tek yönlü (0°) ₆]	1045
2	[Karbon tek yönlü (0°) ₆ / Cam tek yönlü (45°) ₆]	828
3	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam tek yönlü (0°) ₆]	336
4	[Karbon tek yönlü (45°) ₆ / Cam tek yönlü (45°) ₆]	94
5	[Karbon plain (0°) ₆ / Cam plain (0°) ₆]	621
6	[Karbon plain (0°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	605
7	[Karbon tek yönlü (45°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	216
8	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	517

Numunelerde çekme sonrası oluşan hasarlar Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Numunelerin hasar bölgeleri incelendiğinde kopan yüzeylerdeki hasarların tabaka oryantasyon açısıyla ortantılı olduğu tespit edilmiştir.



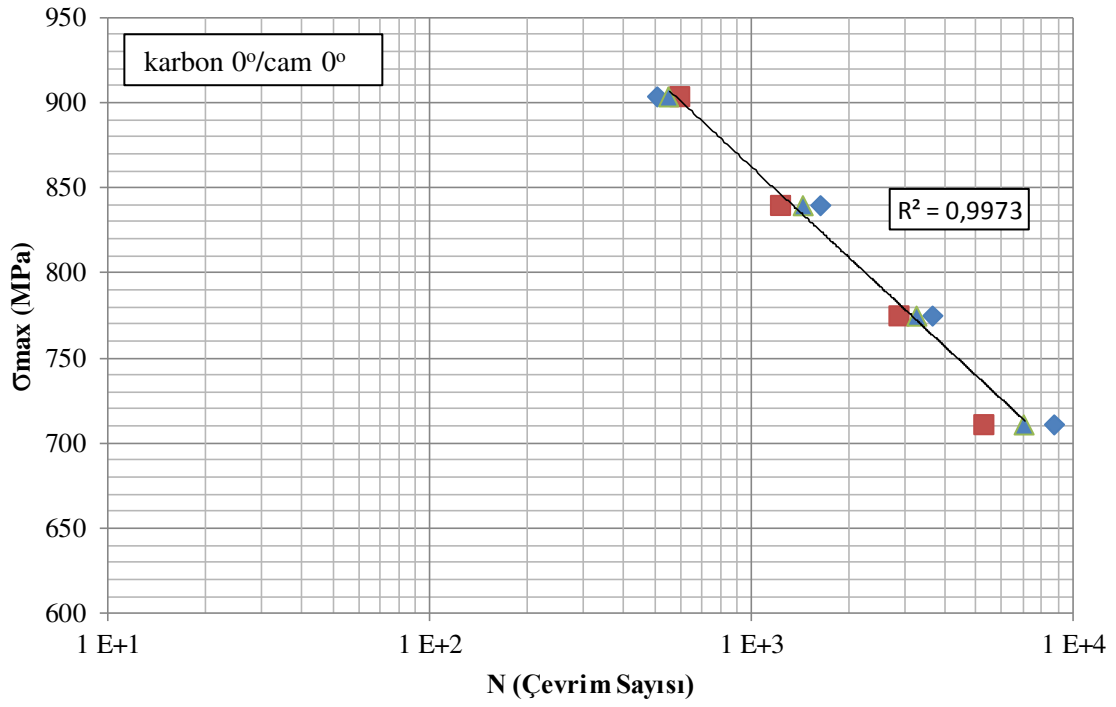
Şekil 4.2. Çekme deneyi sonrası numune görüntüleri.

Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin çekme deneyinin ardından yorulma deneyi yapılmıştır. Yorulma deneyi sonrası 7 nolu (Karbon 45°/ Cam Twill) numunede meydana gelen hasarlar Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Hasar bölgesi incelendiğinde 45° lik tabaka oryantasyon açısıyla orantılı kopmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.



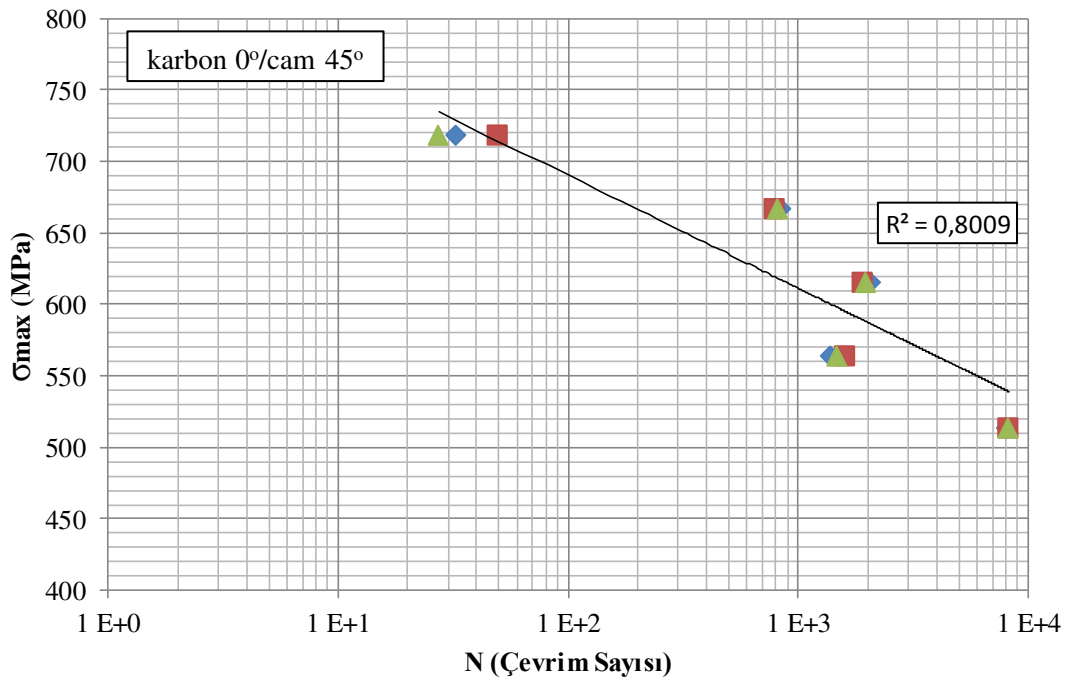
Şekil 4.3. 7 nolu numunede meydana gelen hasarlar

Yapılan testler sonucunda elde edilen gerilme-ömür grafikleri aşağıda verilmiştir.



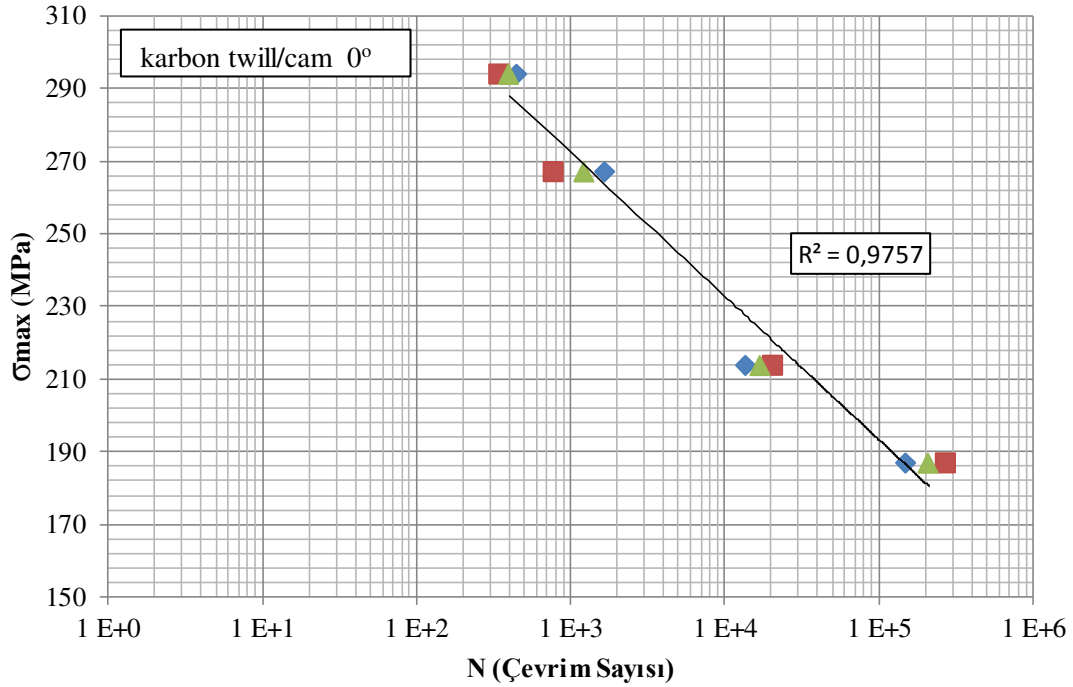
Şekil 4.4. 1 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

1 nolu numune için elde edilen grafik Şekil 4.4'te gösterilmiştir. 903 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 556, 838 MPa maksimum gerilme için 1451, 774 MPa maksimum gerilme için 2530, 710 MPa maksimum gerilme için 7075 olmuştur. Çevrim sayısı 10000 altında olduğu için düşük çevrimlidir [33].



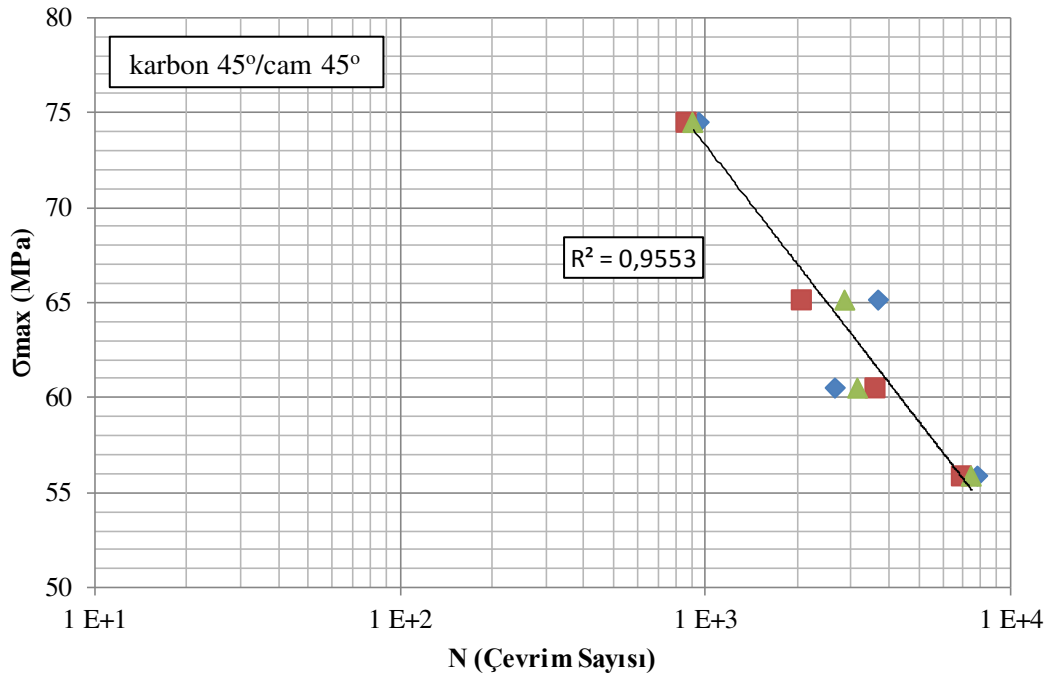
Şekil 4.5. 2 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

Şekil 4.5'te 2 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği gösterilmiştir. 718 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 28, 667 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 827, 615 MPa maksimum gerilme için 1996, 564 MPa maksimum gerilme için 1495, 513 MPa maksimum gerilme için 8201 olmuştur. 1 numaralı numuneye göre daha düşük gerilme elde edilmiş olup, düşük çevrimlidir [33].



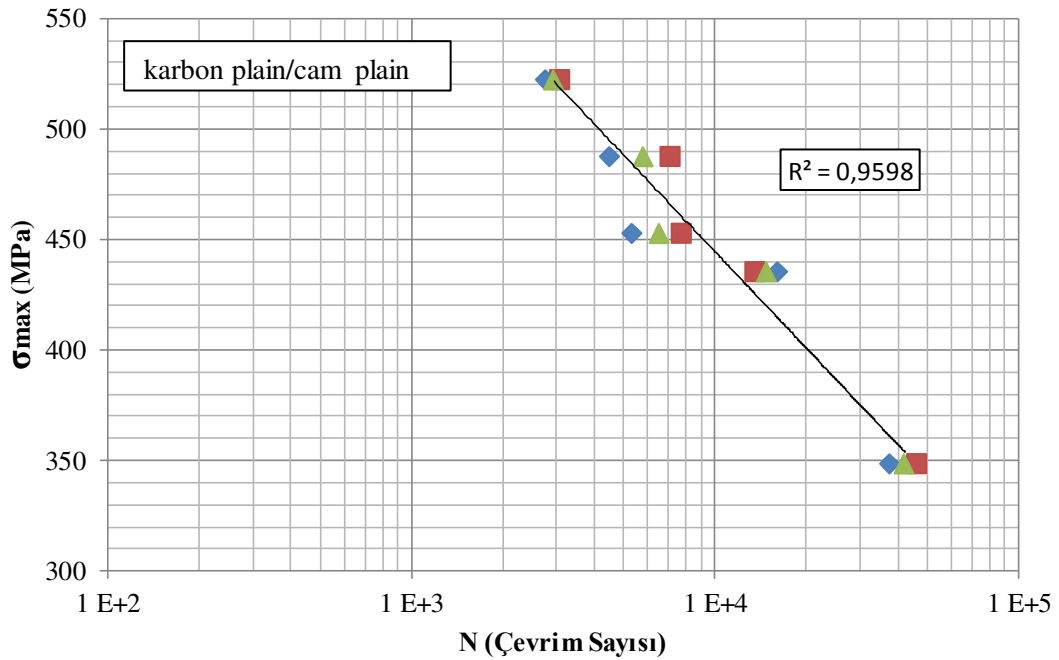
Şekil 4.6. 3 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

3 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği Şekil 4.6'dadır. 294 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 399, 267 MPa maksimum gerilme için 1233, 214 MPa maksimum gerilme için 17259, 187 MPa maksimum gerilme için 211395 olmuştur. Çevrim sayısı 10000 üzerinde olduğu için yüksek çevrimlidir [33].



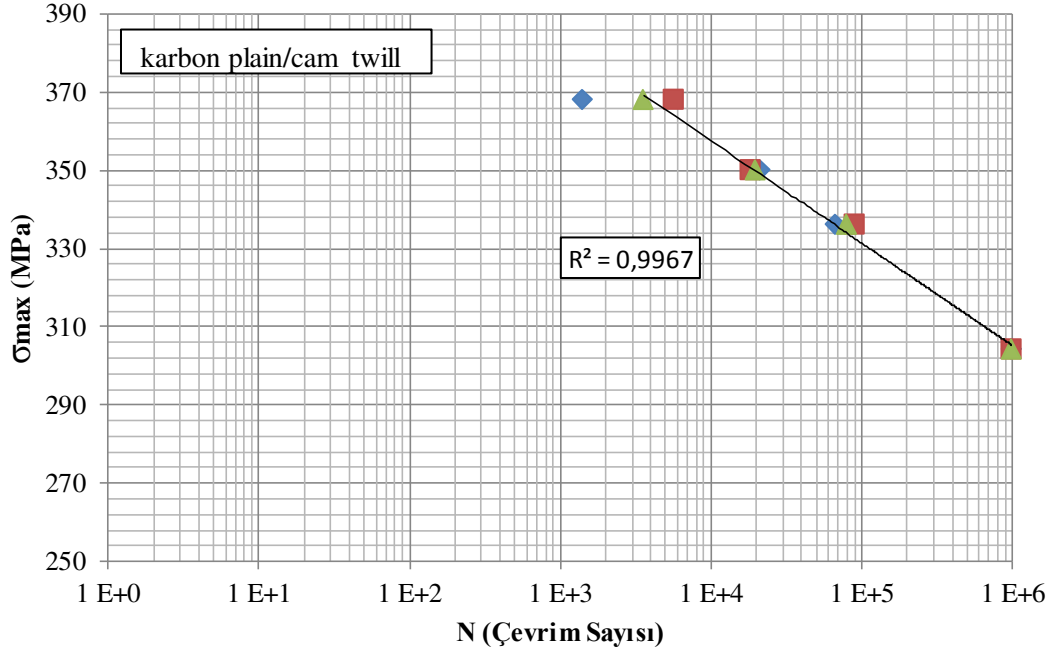
Şekil 4.7. 4 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

4 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. 75 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 918, 65 MPa maksimum gerilme için 2898, 60 MPa maksimum gerilme için 3166, 56 MPa maksimum gerilme için 7444 olmuştur. 4 nolu numune diğer numuneler içerisinde en düşük gerilmeye sahip olup düşük çevrimlidir [33].



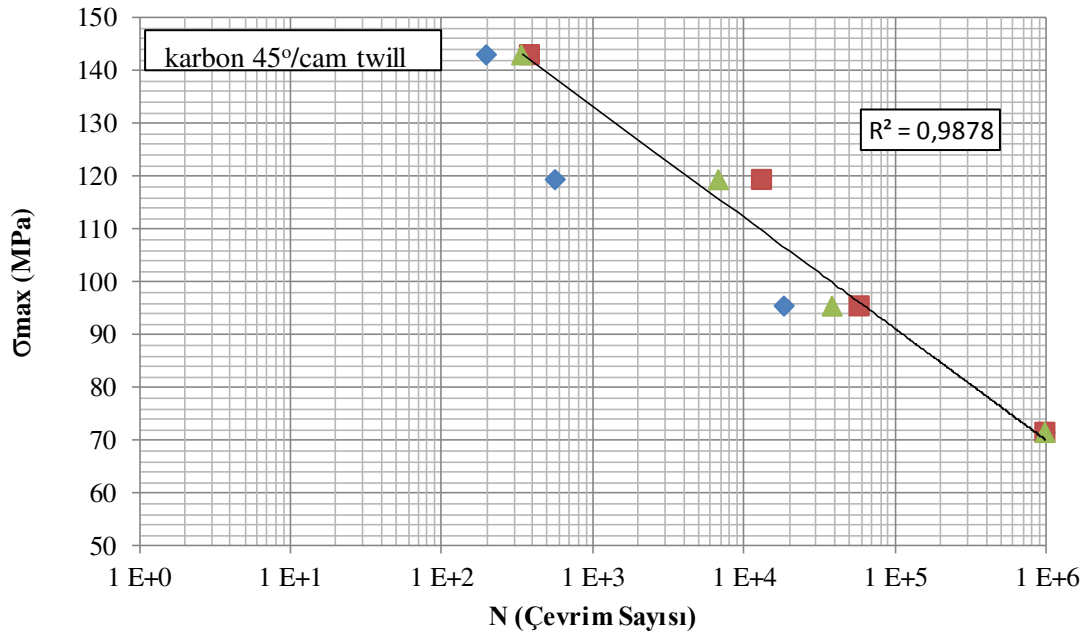
Şekil 4.8. 5 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

5 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir. 522 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 2936, 487 MPa maksimum gerilme için 5851, 452 MPa maksimum gerilme için 6608, 435 MPa maksimum gerilme için 14901, 382 MPa maksimum gerilme için 8186, 347 MPa maksimum gerilme için 42070 olmuştur. 10000 üzerinde oluşan çevrim sayılarından dolayı yüksek çevrimlidir [33].



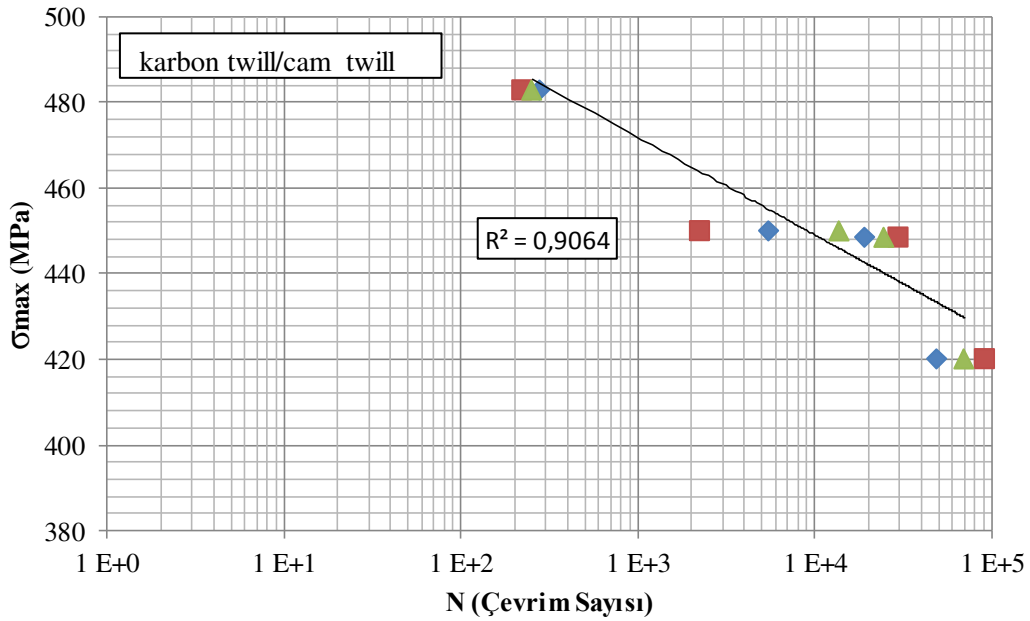
Şekil 4.9. 6 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

6 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir. 350 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 19921, 368 MPa maksimum gerilme için 3600, 336 MPa maksimum gerilme için 80134, 304 MPa maksimum gerilme için 1000000 olmuştur. 6 nolu numune yüksek çevrimli çıkmış olup diğer numunelerden farklı olarak çevrim sayısı sonsuz ömür olarak kabul edilen 1000000 değerine ulaşmıştır [33].



Şekil 4.10. 7 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

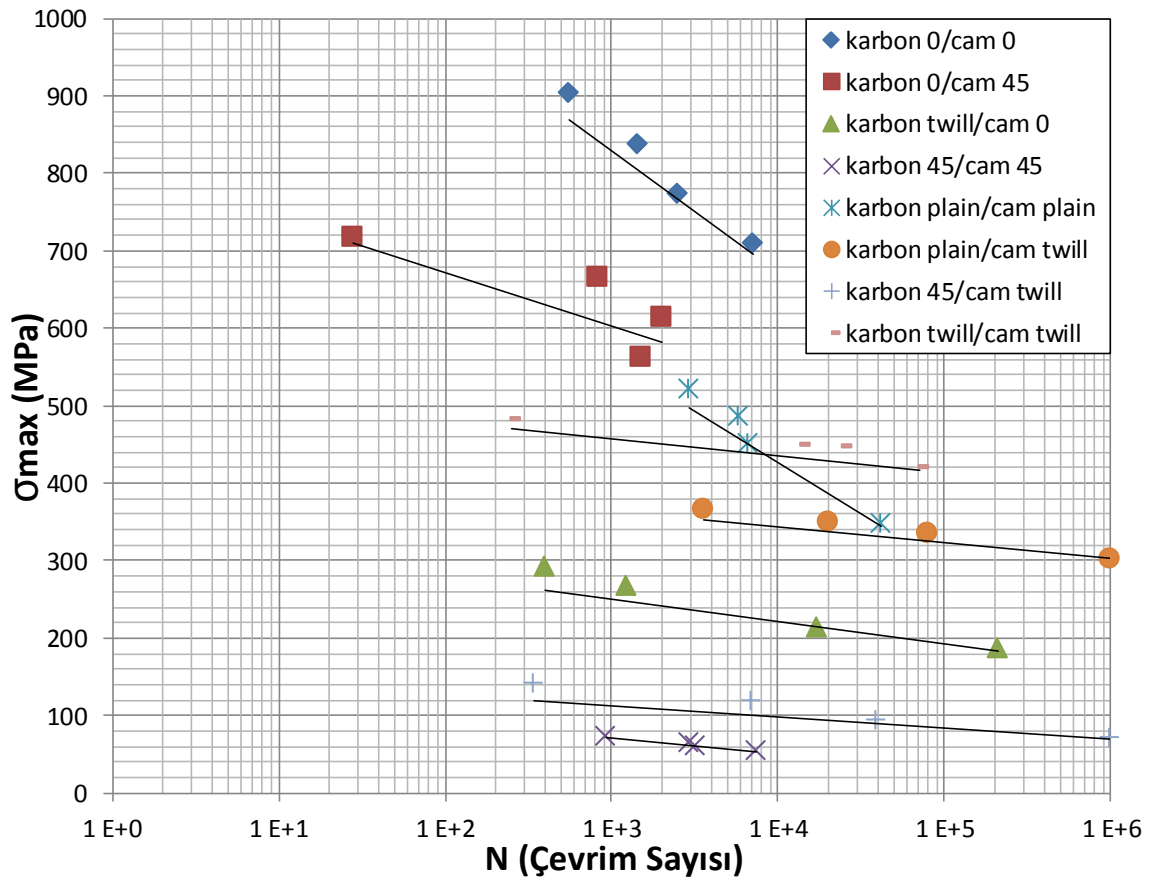
7 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. 143 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 341, 119 MPa maksimum gerilme için 6921, 95 MPa maksimum gerilme için 38838, 71 MPa maksimum gerilme için 1000000 olmuştur. 7 nolu numune, 6 nolu numuneden gerilme olarak daha düşük çıkmıştır fakat çevrim sayısı olarak 6 nolu numune gibi sonsuz ömür elde edilmiştir [33].



Şekil 4.11. 8 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

8 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. 483 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 252, 448 MPa maksimum gerilme için 24647, 420 MPa maksimum gerilme için 70800, 450 MPa maksimum gerilme için 13850 olmuştur. 8 nolu numunede, 3,5,6 ve 7 nolu numuneler gibi 10000 üzeri çevrim sayısı nedeniyle yüksek çevrimlidir [33].

Şekil 4.12’de bütün numunelerin gerilme-ömür grafiği tek bir grafikte gösterilmiştir.



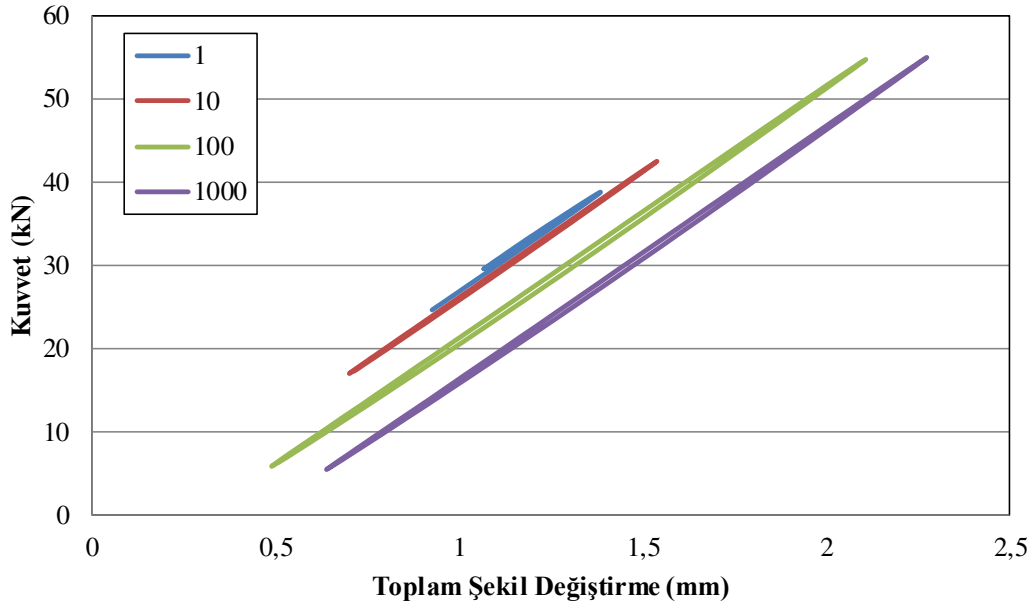
Şekil 4.12. Bütün numunelerin gerilme-ömür grafiğinin tek grafikte gösterilmiş hali

Tablo 4.2. Numunelerin oryantasyon açıları, maksimum yorulma gerilmesi ve maksimum çevrim sayıları

Numune Numarası	Tabaka Oryantasyonları	Maksimum Yorulma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çevrim Sayısı
1	[Karbon tek yönlü (0°) ₆ / Cam tek yönlü (0°) ₆]	903	7075
2	[Karbon tek yönlü (0°) ₆ / Cam tek yönlü (45°) ₆]	718	8201
3	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam tek yönlü (0°) ₆]	294	211395
4	[Karbon tek yönlü (45°) ₆ / Cam tek yönlü (45°) ₆]	75	7444
5	[Karbon plain (0°) ₆ / Cam plain (0°) ₆]	522	42070
6	[Karbon plain (0°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	368	1000000
7	[Karbon tek yönlü (45°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	143	1000000
8	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	483	13850

Tablo 4.2 incelendiğinde en yüksek gerilme 1 nolu numunede yaklaşık olarak 903 MPa olarak elde edilirken en iyi çevrim sayısı 6 ve 7 nolu numunelerde 10^6 olarak elde edilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere farklı dizilimdeki numuneler farklı gerilme- ömür değerleri sergilemiştir. Bu sonuç tabakalı hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin takviye malzemesinin yönü ve cinsine bağlı olması gibi yorulma davranışlarının da bu parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir.

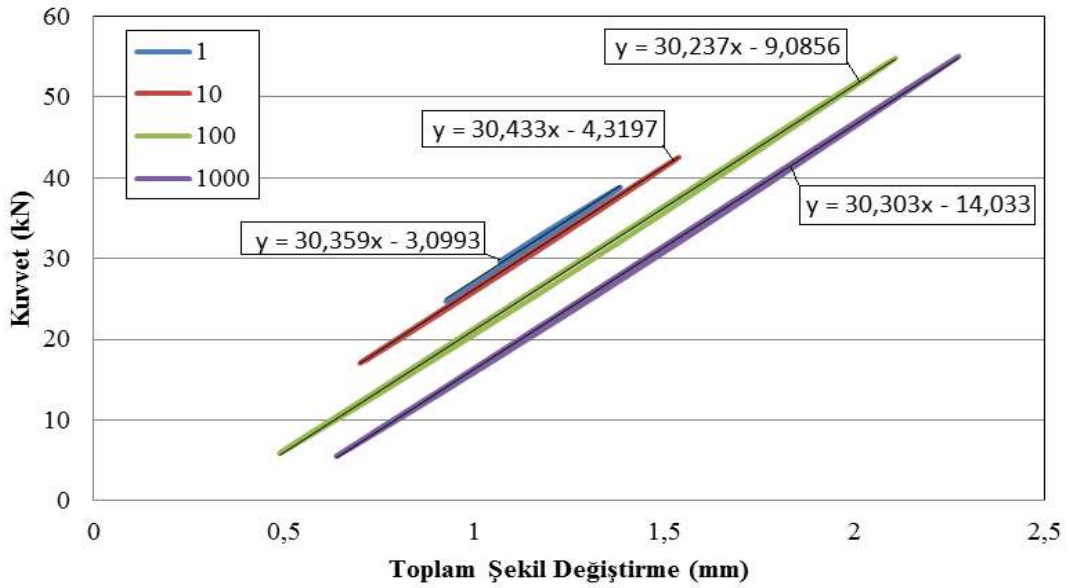
1 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu grafikte çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Grafikteki eğrilerin sıklık derecesi malzemenin rijitliğiyle orantılıdır [1].



Şekil 4.13. 1 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Çevrim sayısı arttıkça eğrilerin eğimlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu eğim azalmasının nedeni ise malzemenin modül özelliklerinde azalma ve fiber kopmaların gerçekleşmesidir [1].

Şekil 4.14'te 1 nolu numunenin eğri denklemleri gösterilmiştir. Eğri denklemlerinden hareketle çevrim sayısına karşılık gelen eğim açısı hesaplanmıştır.



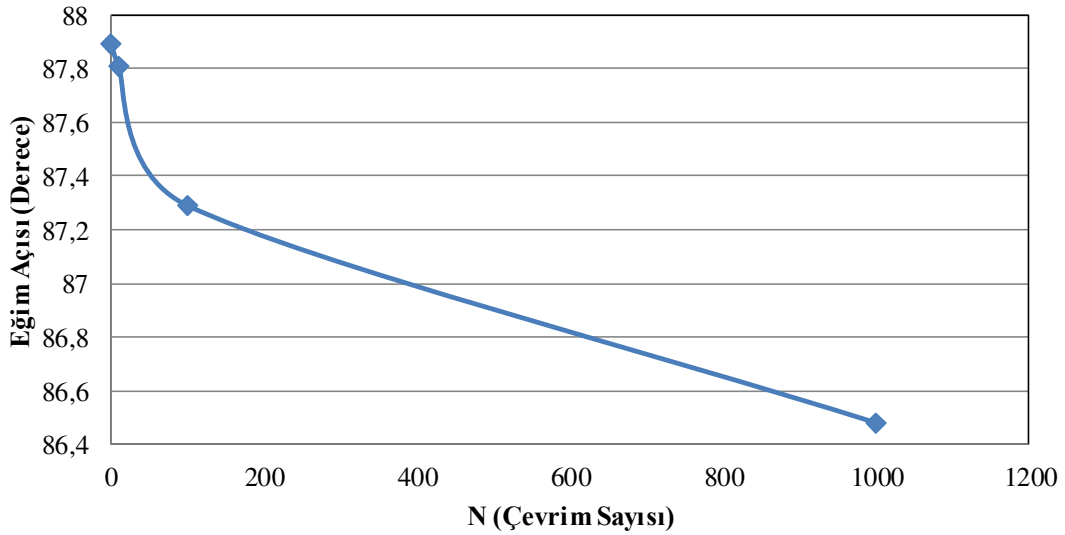
Şekil 4.14. 1 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğrilerinin denklemleri

Histerezis eğrilerine karşılık gelen eğim açıları Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi açılar çevrim sayısı arttıkça düşmüştür.

Tablo 4.3. 1 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

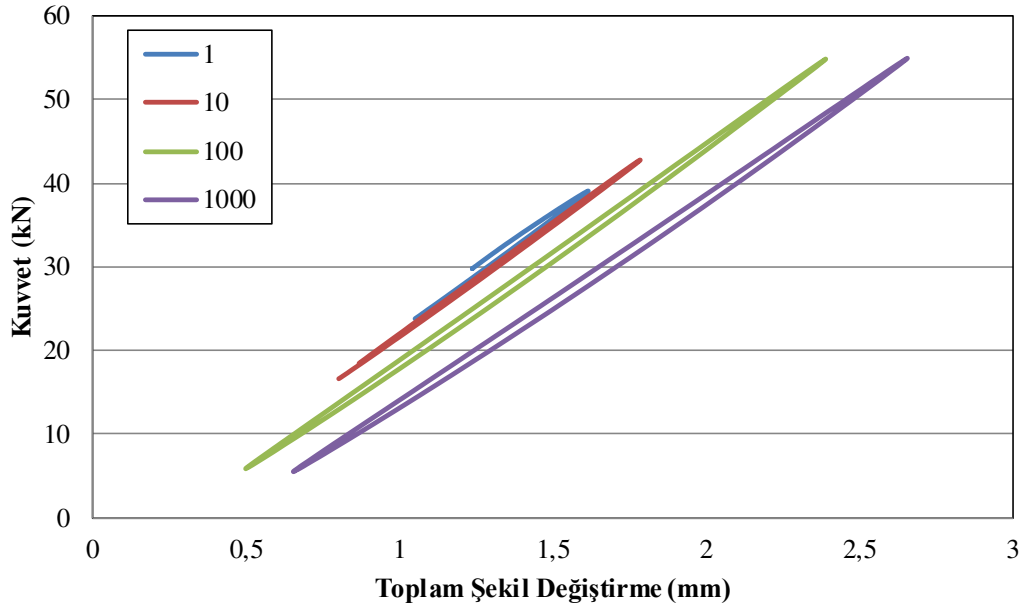
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 30,359x - 3,0993$	87.89°
10	$y = 30,433x - 4,3197$	87.81°
100	$y = 30,237x - 9,0856$	87.29°
1000	$y = 30,303x - 14,033$	86.48°

1 nolu numune için çevrim sayılarına karşılık gelen eğim açıları Şekil 4.15'te grafikte verilmiştir.



Şekil 4.15. 1 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

2 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değiştirme eğrisinin arasında kalan alanın da azaldığı görülmektedir. 1 nolu numuneye göre daha düşük bir rijit yapı sergilemektedir.



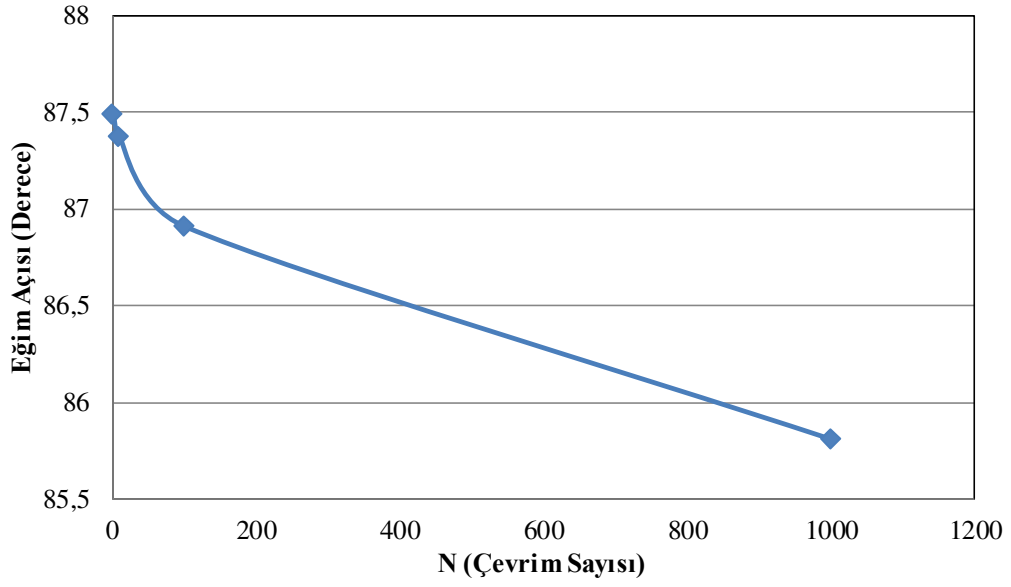
Şekil 4.16. 2 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Tablo 4.4'te görüldüğü gibi çevrim sayısı artışına bağlı olarak eğim açılarında azalma meydana gelmiştir.

Tablo 4.4. 2 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

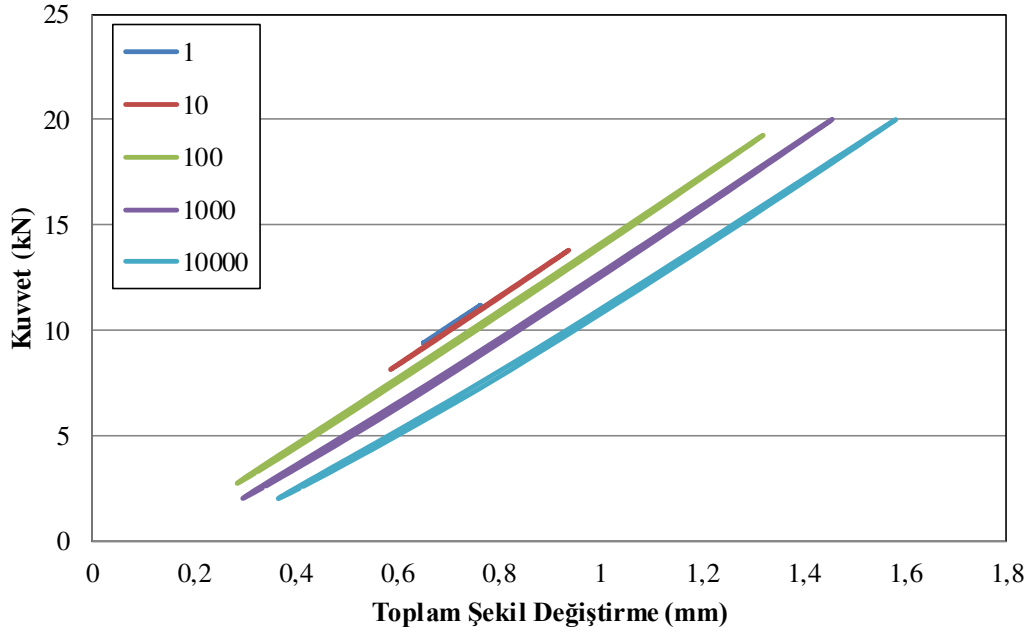
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 26,561x - 3,6868$	87.49°
10	$y = 26,553x - 4,7103$	87.37°
100	$y = 25,891x - 7,3613$	86.91°
1000	$y = 24,661x - 11,002$	85.81°

2 nolu numune için çevrim sayısına karşılık gelen eğim açıları Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 2 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

3 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alan ve eğri eğimleri azalmıştır.



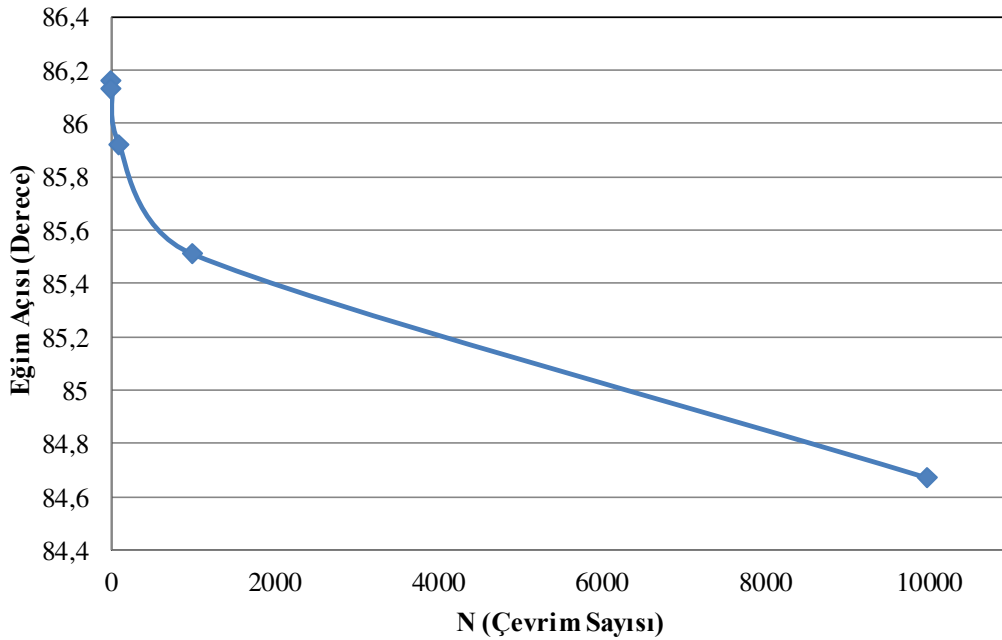
Şekil 4.18. 3 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.18’de gösterilen histerezis eğrilerinin denklem ve eğim açıları Tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.5. 3 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

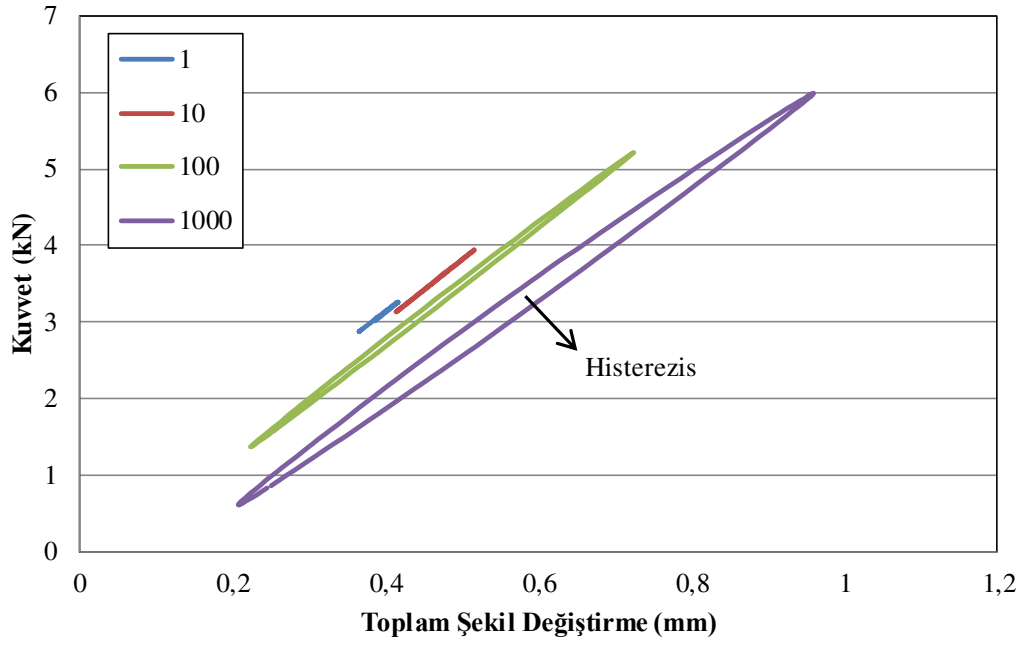
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 15,854x - 0,9459$	86.16°
10	$y = 16,138x - 1,3553$	86.13°
100	$y = 15,958x - 1,9081$	85.92°
1000	$y = 15,531x - 2,7823$	85.51°
10000	$y = 14,839x - 3,7172$	84.67°

Şekil 4.19’da 3 nolu numunenin çevrim sayısına karşılık gelen eğim açıları grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi çevrim sayısı artışına bağlı olarak eğim açılarında azalma olmuştur.



Şekil 4.19. 3 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

4 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.20’de verilmiştir. Diğer numunelerden farklı olarak bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın da arttığı görülmektedir. 4 nolu numune diğer numuneler içerisinde histerezis açıklığının en fazla olduğu numunedir. Buna bağlı olarak karbon 45°/cam 45° dizilime sahip olan 4 nolu numune sünek yapıdadır.



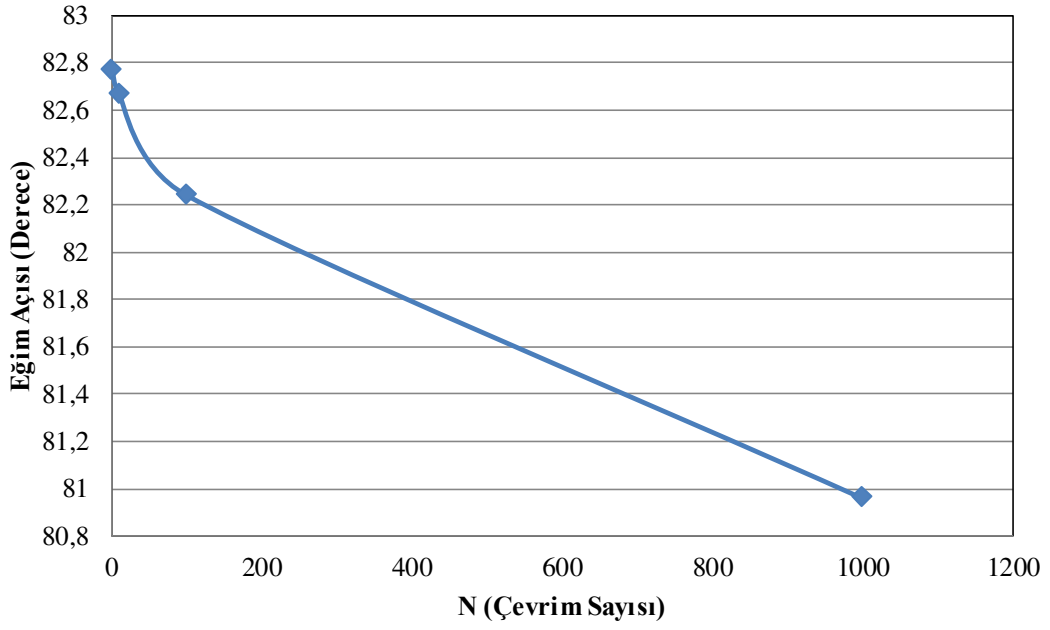
Şekil 4.20. 4 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Eğri denklemlerinden yola çıkarak 4 nolu numunenin eğri eğimleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. 4 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

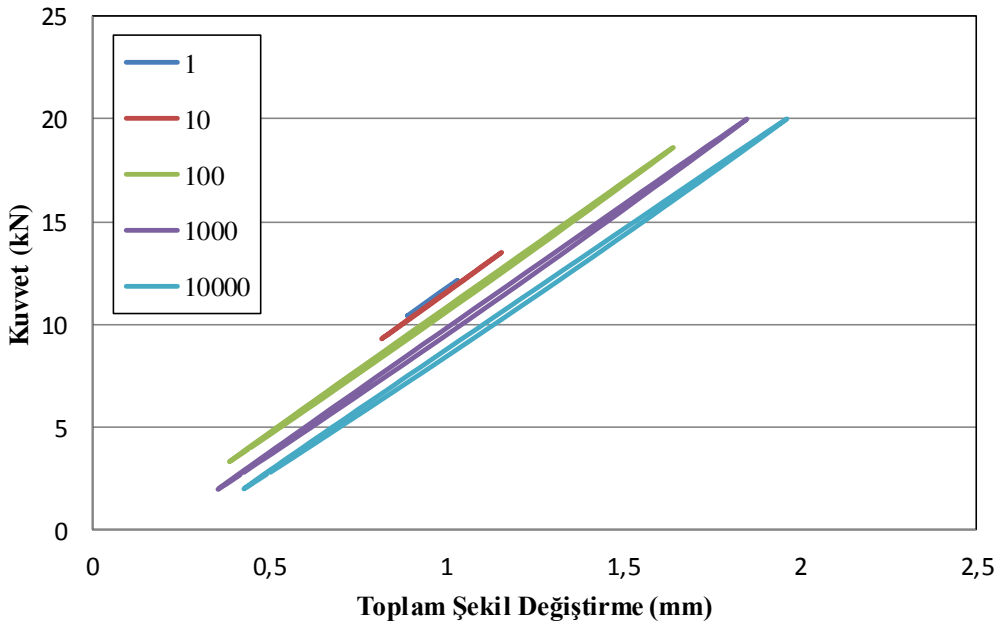
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 7,5659x + 0,1089$	82.77°
10	$y = 7,9316x - 0,1508$	82.67°
100	$y = 7,6832x - 0,343$	82.24°
1000	$y = 7,1439x - 0,8581$	80.96°

Tablo 4.6’da belirtilen eğim açılarına karşılık gelen çevrim sayısı Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde çevrim sayısı arttıkça eğim açısı azalmıştır.



Şekil 4.21. 4 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

5 nolu numuneye ait kuvvet- şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir.



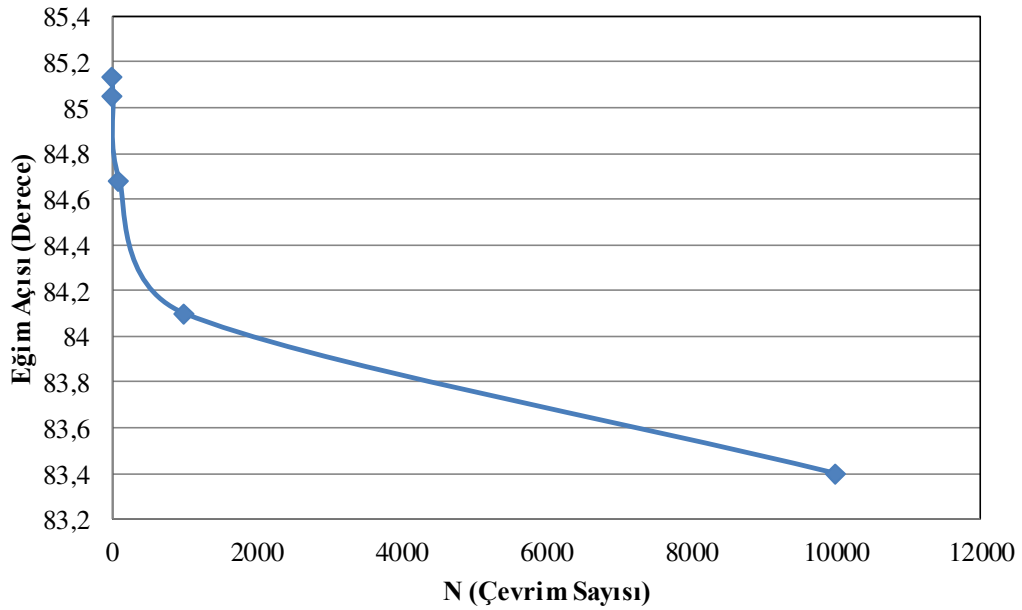
Şekil 4.22. 5 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Tablo 4.7’de 5 nolu numunenin eğri denklemleri ve eğimleri verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi çevrim sayısı arttıkça eğrinin eğiminde azalma olmuştur.

Tablo 4.7. 5 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

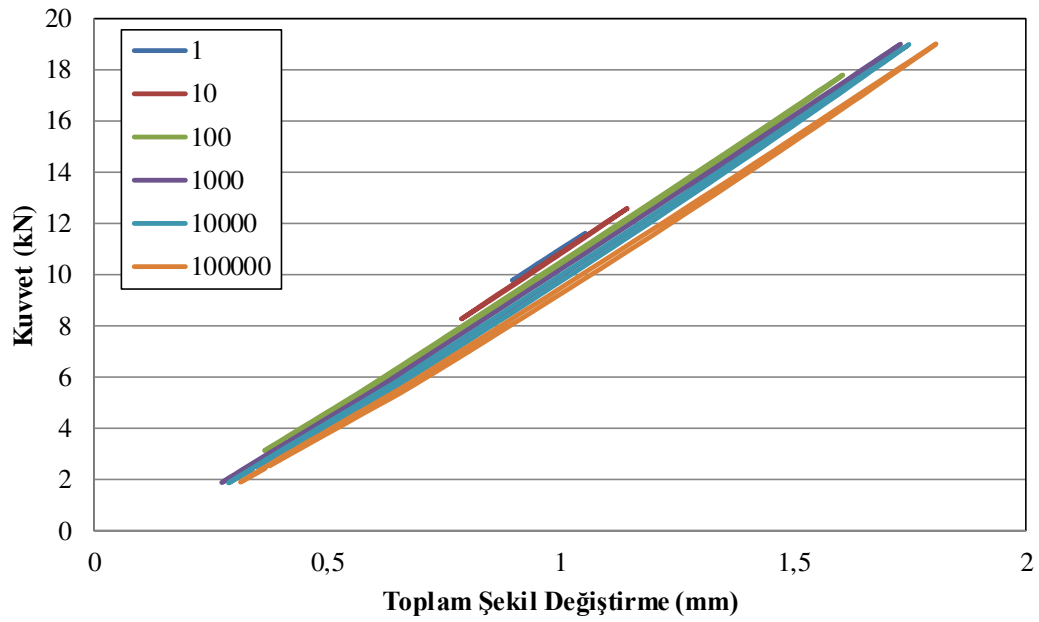
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 12,228x - 0,4895$	85.15°
10	$y = 12,385x - 0,8372$	85.05°
100	$y = 12,158x - 1,415$	84.68°
1000	$y = 12,019x - 2,326$	84.10°
10000	$y = 11,7x - 3,0523$	83.40°

Tablo 4.7’de belirtilen çevrim sayılarına karşılık gelen eğim açıları Şekil 4.23’te grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.23. 5 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

6 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.24’te verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Çevrim sayıları arasındaki fark daha az belirgin ve sık olarak görülmektedir. 6 nolu numune daha rijit bir durum sergilemiştir bunun sonucu olarak ömür değeri sonsuz olarak tanımlanmaktadır.



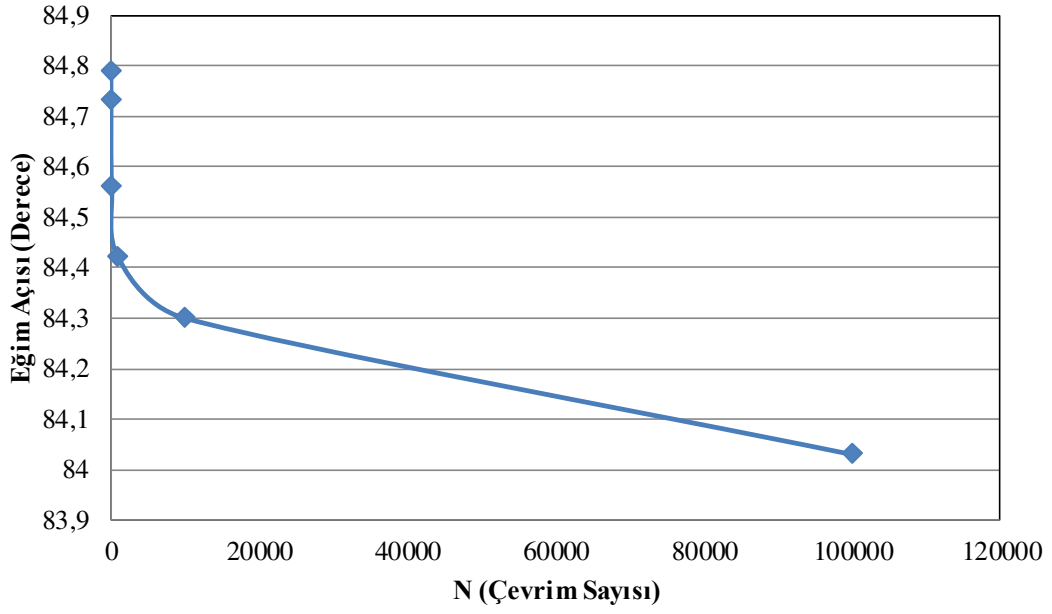
Şekil 4.24. 6 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.24'te gösterilen histerezis eğrilerinin eğim açıları Tablo 4.8'de verilmiştir. Çevrim sayısı artışıyla eğim açılarında azalma olmuştur.

Tablo 4.8. 6 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

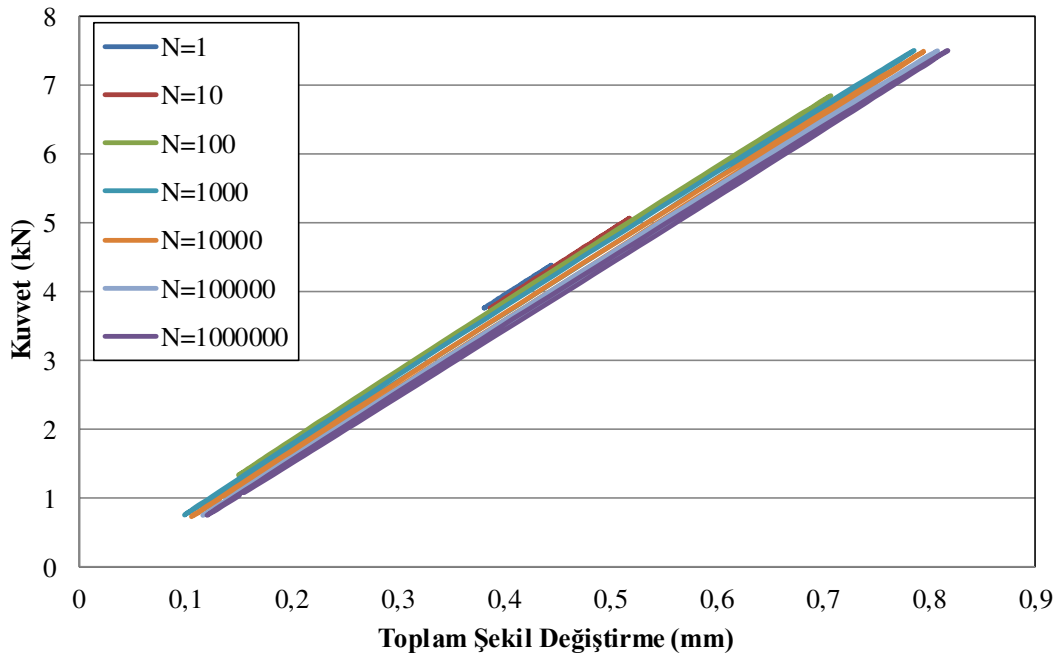
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 11,792x - 0,8164$	84.79°
10	$y = 12,117x - 1,2693$	84.73°
100	$y = 11,838x - 1,3349$	84.56°
1000	$y = 11,763x - 1,5178$	84.42°
10000	$y = 11,734x - 1,6981$	84.30°
100000	$y = 11,467x - 1,9006$	84.03°

6 nolu numunenin çevrim sayısına bağlı olarak eğri eğim açılarındaki değişim Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25. 6 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

7 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.26’da verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Çevrim sayıları arasındaki fark daha az belirgin ve sık olarak görülmektedir. 7 nolu numunede 6 nolu numune gibi rijit bir yapı sergilemiştir.



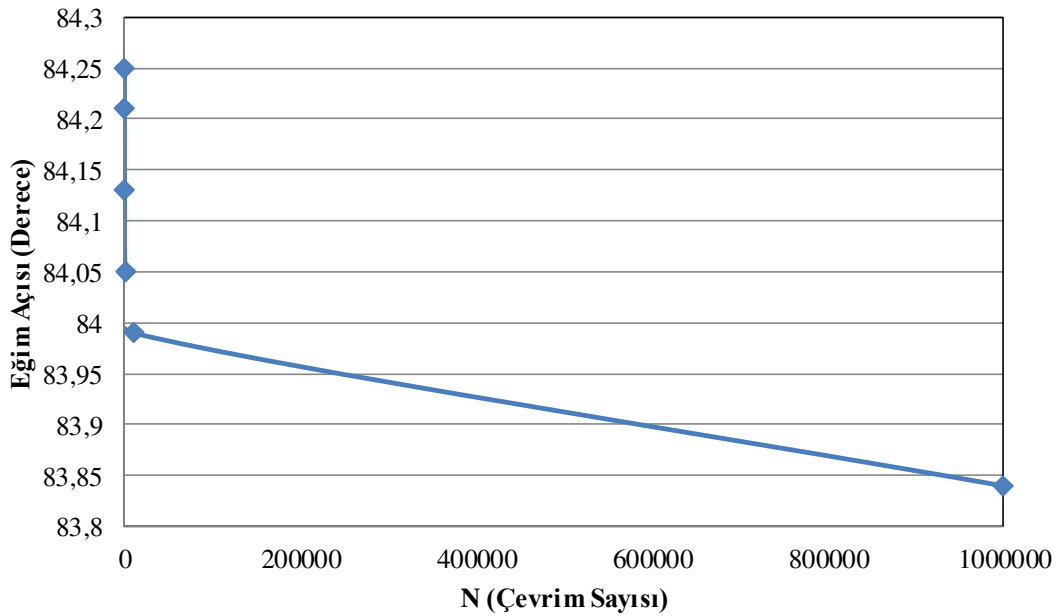
Şekil 4.26. 7 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Sonsuz çevrime ulaşan numunede histerezis eğrilerinin eğim açıları Tablo 4.9’da gösterilmiştir. Tablodaki değerlerde görüldüğü gibi eğim açılarında azalma olmuştur.

Tablo 4.9. 7 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

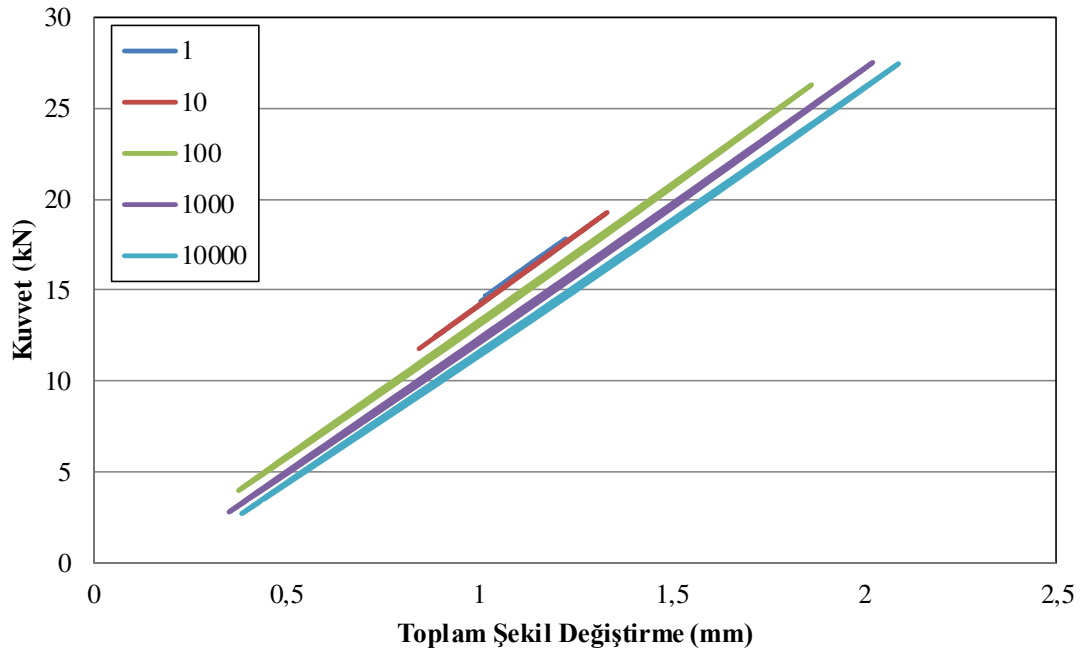
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 9,8079x + 0,0194$	84.25°
10	$y = 9,9814x - 0,1062$	84.21°
100	$y = 9,8823x - 0,144$	84.13°
1000	$y = 9,8181x - 0,2102$	84.05°
10000	$y = 9,8009x - 0,2992$	83.99°
1000000	$y = 9,6732x - 0,4038$	83.84°

Çevrim sayısının artışıyla eğimde meydana gelen azalma Şekil 4.27’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.27. 7 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

8 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Çevrim sayıları arasındaki fark belirgin olarak görülmektedir.



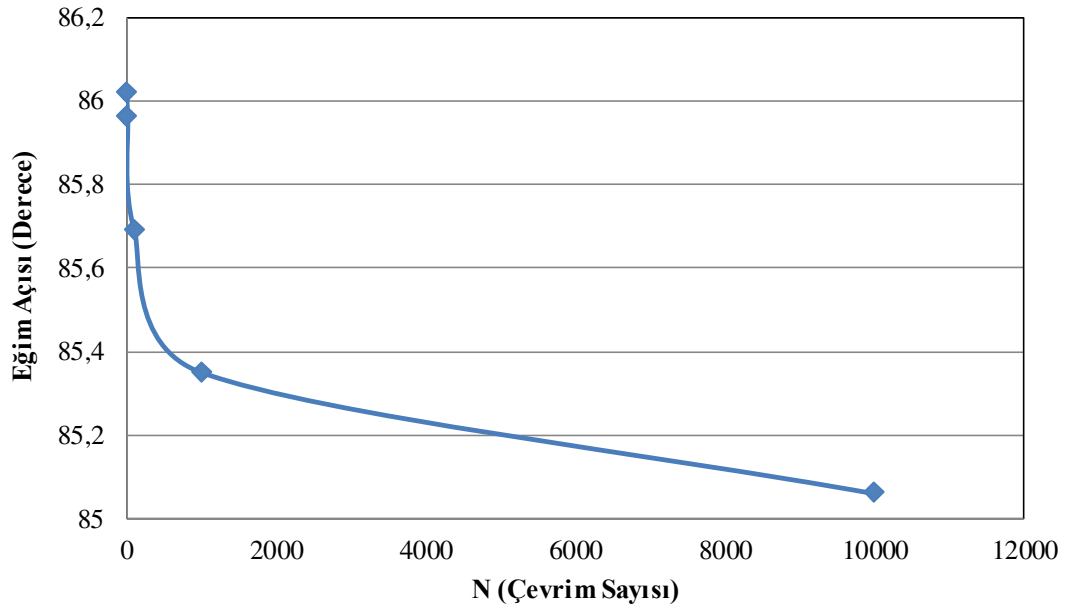
Şekil 4.28. 8 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.28’de gösterilen histerezis eğrilerin, denklemleri ve eğimleri Tablo 4.10’da birlikte verilmiştir.

Tablo 4.10. 8 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

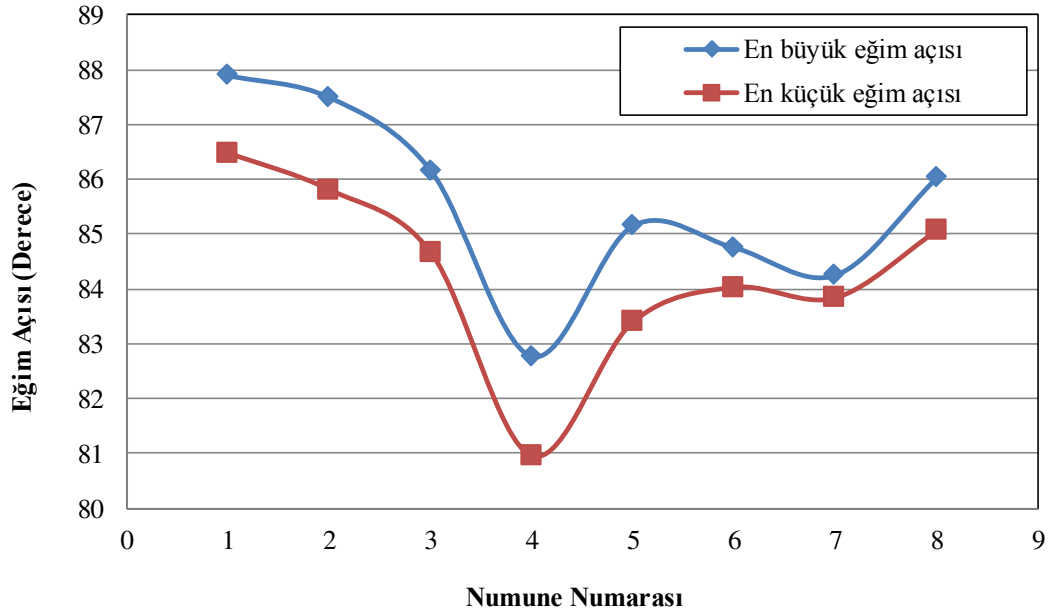
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 15,174x - 0,7768$	86.02°
10	$y = 15,313x - 1,1341$	85.96°
100	$y = 14,982x - 1,7073$	85.69°
1000	$y = 14,772x - 2,4581$	85.35°
10000	$y = 14,479x - 2,9064$	85.06°

8 nolu numunede de diğer numunelerdeki gibi çevrim sayısı arttıkça eğim açısında azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.29).



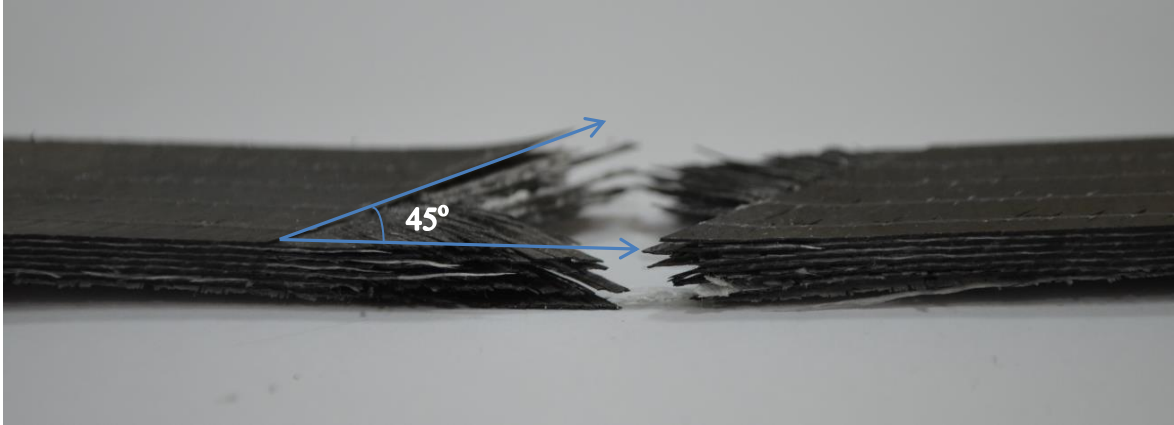
Şekil 4.29. 8 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

Şekil 4.30’da sekiz numunenin histerezis eğrilerinden elde edilen eğim açılarının en yüksek ve en düşük değerleri tek grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi en yüksek ve en düşük eğim açıları paralel doğrultuda olmuştur. En büyük eğim açısı 1 nolu numunede 87.89° , en düşük eğim açısı 4 nolu numunede 80.96° dir.



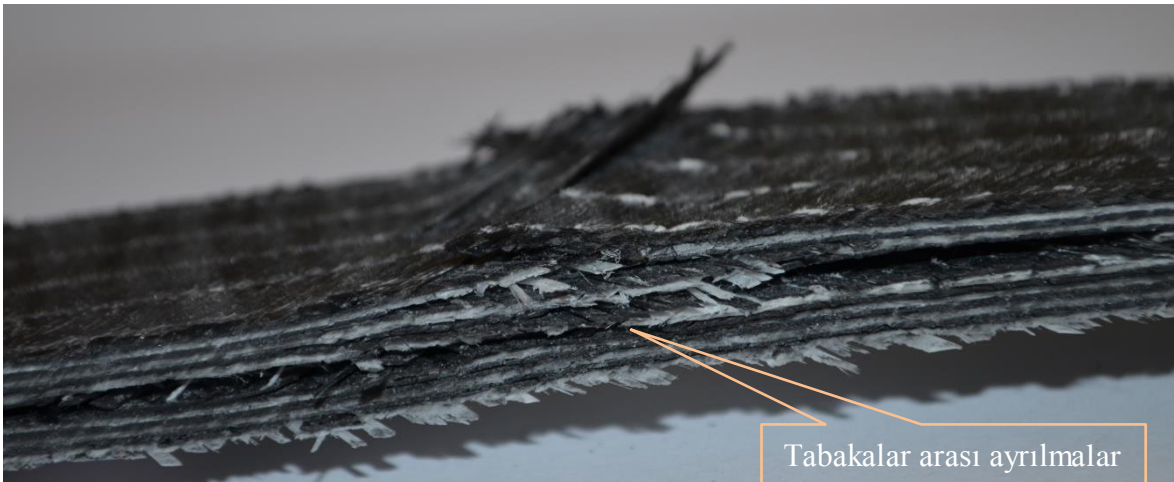
Şekil 4.30. Numune eğim açılarının tek grafikte gösterimi

Histerezis eğrileri arasındaki alan azaldıkça malzemenin rijitliği artmaktadır [1]. Bu ifadeden yararlanıldığında tüm numuneler içerisinde en rijit yapı Şekil 4.31’de hasar durumu gösterilen 7 nolu numune olarak değerlendirilmiştir. Malzemenin rijitliği ile orantılı olarak tabakalar birlikte çalışmış ve tabakalar arasında oluşan deleminasyon miktarı diğer numunelere oranla daha düşük olmuştur. Yorulma testleri neticesinde karbon 45°/cam twill dizilimine sahip bu numunenin ömrü sonsuza gitmiştir. Hasar oryantasyon açısıyla ilişkili 45° fiber açısında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.31. 7 nolu numunenin yorulma deneyi sonrası görüntüsü

Histerezis grafiklerinde eğriler arasındaki alanın en fazla olduğu numune karbon 45°/cam 45° dizilimine sahip olan 4 nolu numunedir. Dolayısıyla 4 nolu numune yorulma testleri gerçekleştirilen tüm numuneler içerisindeki en sünek malzemedir. Şekil 4.12’deki gerilme-ömür grafiğinden de görüleceği üzere yaklaşık 75 MPa’lık gerilme değeri ile en düşük maksimum gerilme değerine sahip ve tabakalar arasındaki deleminasyon oranı en yüksek olan numunedir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. 4 nolu numunenin yorulma deneyi sonrası görüntüsü

Yorulma sonucu kırılan bazı numunelerin SEM görüntüleri Bingöl Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.33'te gösterilen JEOL JSM-6510 elektron mikroskobu kullanılarak alınmıştır.



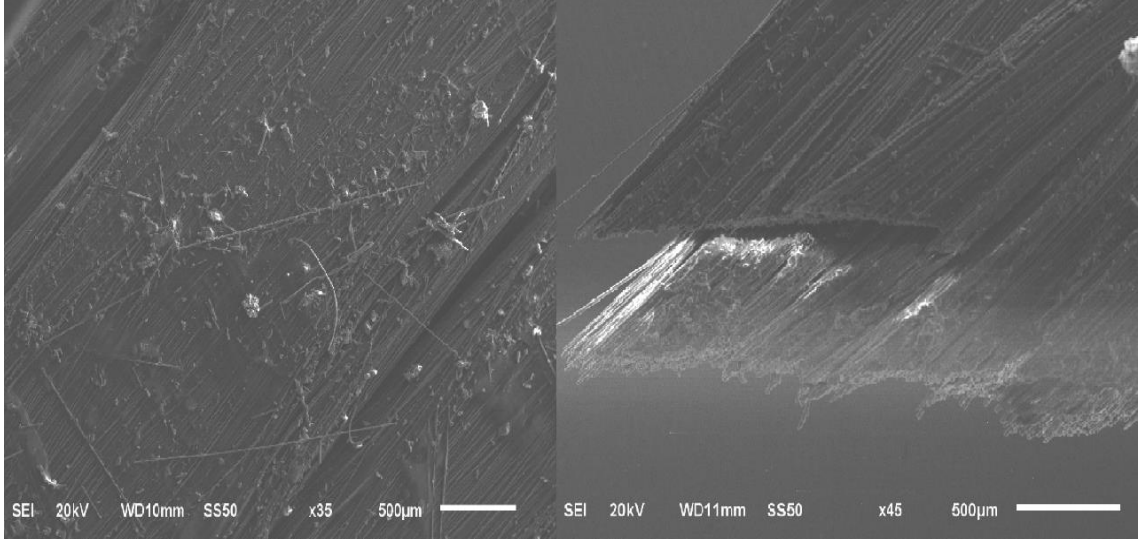
Şekil 4.33. SEM analizlerinde kullanılan elektron mikroskobu

İletken olmayan kompozit numunelere Şekil 4.34'te gösterilen EMITECH marka karbon kaplama cihazı ile karbon kaplama yapılmıştır.



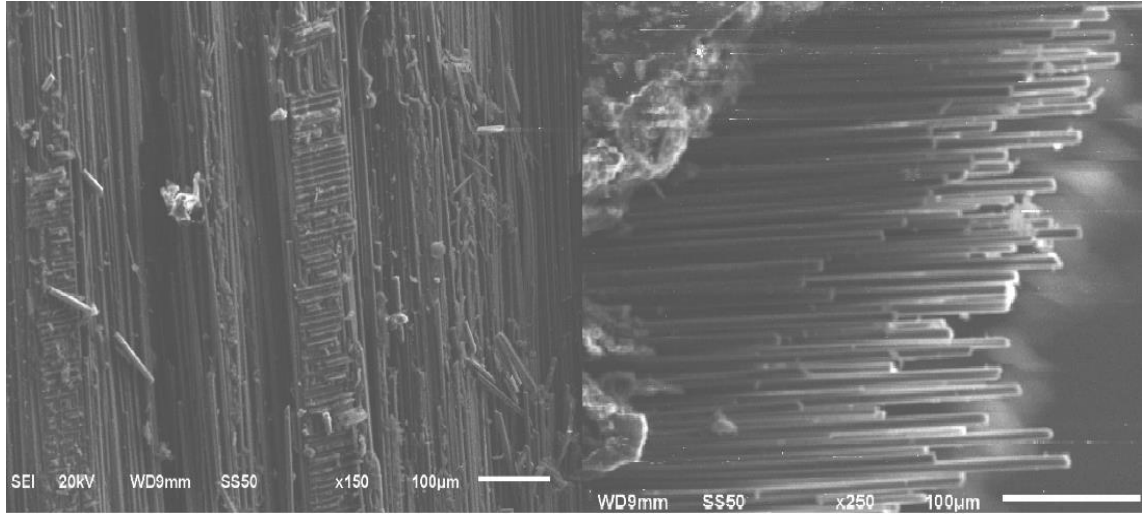
Şekil 4.34. Karbon kaplama yöntemi

Şekil 4.35'te analizler neticesinde numunelerin hasar bölgelerinden alınan bazı görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.35. 4 nolu numunenin hasar bölgesinden alınan SEM fotoğrafları.

Fotoğraflardan görüleceği üzere kopan elyaf demeti ve elyaflar üzerinde reçine parçaları görülmektedir. Karbon 45°/ cam 45° dizilimli bu numune en düşük gerilmeye sahiptir.



Şekil 4.36. 7 nolu numunenin kırılan yüzeyindeki fiber demeti.

Şekil 4.36'daki karbon 45°/ cam twill dizilimli 7 nolu numune en rijit malzemedir. Tabakaların birlikte hareket etmesi rijitliğini arttıran sebeplerdendir. Fotoğraflar incelendiğinde kopan yüzeyde bulunan fiberler kopma sonrasında yine bir arada ayrılmadan görüntülenmiştir.

5. DEĞERLENDİRME

Gerçekleştirilen çalışmada farklı malzeme, fiber dokuma ve oryantasyon açılarında üretilmiş olan tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Yorulma deneyleri gerçekleştirilen numunelerin kopan yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yapılan çekme deneyleri neticesinde en yüksek gerilme karbon 0°/ cam 0° dizilimli numunede 1045 MPa, en düşük gerilme ise karbon 45°/ cam 45° dizilimli numunede 94 MPa olarak elde edilmiştir.
- En yüksek yorulma gerilmesi karbon 0°/ cam 0° dizilimli numuneye 903 MPa, en düşük yorulma gerilmesi karbon 45°/ cam 45° dizilimli numuneye 56 MPa olarak uygulanmıştır. Bu durum fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin fiber yönüne bağlı olarak değişkenlik göstermesindendir.
- Elyaf-matriks arasında oluşan bağın iyi olmaması, elyaf mekanik özelliklerinin uniform olmaması, elyafın matriks içerisinde uniform dağılmaması gibi nedenlerden dolayı aynı oryantasyon ve aynı dizilime sahip numunelerin mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlemlenmiştir [53].
- Karbon 0°/ cam 0° dizilimli, karbon 0°/ cam 45° dizilimli ve karbon 45°/ cam 45° dizilimli numunelerin çevrim sayıları 10000' in altında çıktığı için düşük çevrimlilerdir.
- Karbon twill/ cam 0° dizilimli, karbon plain/ cam plain dizilimli, karbon plain/ cam twill dizilimli, karbon 45°/ cam twill dizilimli ve karbon twill/ cam twill dizilimli numunelerin çevrim sayıları 10000 üzerinde çıktığı için yüksek çevrimlidir.
- Karbon plain/ cam twill dizilimli ve karbon 45°/ cam twill dizilimli numunelerde çevrim sayısı 1000000 tespit edilmiştir. Bu durum iki numunenin de sonsuz ömürlü olduğunu göstermektedir.
- Histerezis eğrileri incelendiğinde karbon plain/ cam twill dizilimli ve karbon 45°/ cam twill dizilimli numuneler daha rijit bir yapı sergilerken karbon 45°/ cam 45° dizilimli numune sünek yapı sergilemektedir. Bunun sonucu olarak da karbon plain/ cam twill dizilimli ve karbon 45°/ cam twill dizilimli numuneler sonsuz

ömür sergilerken karbon 45°/ cam 45° dizilimli numune en düşük gerilmeye sahip olmuştur.

- Histerezis eğrilerinde çevrim sayısı arttıkça eğimlerinde azalış meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise modül özelliklerinde azalmanın meydana gelmesi ve kopmaların gerçekleşmesindendir [1].
- Yapılan deneyler neticesinde bazı numunelerde gözle görülür tabakalar arası ayrışma tespit edilmiştir. Bu durumun, numune imalatı sırasında elyaflar arasına reçinenin nüfuziyetinin tam etki edememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Genel olarak test sonuçları; dokuma fiberlerin alansal yoğunluğundan, fiber yönünden, elle yatırma yöntemi parametrelerinden, fiberlerin reçine geçirgenliğinden, fiberlerin tam ıslanıp ıslanamamasından etkilenmiştir [52].

6. ÖNERİLER

Gelişen teknolojiye bağlı olarak kompozit malzemeler her alanda yer almaya başlamıştır. Kompozit malzemeler kullanıldıkları yere bağlı olarak tekrarlı yüklere de maruz kalabilmektedirler. Bu yüzden yorulma parametreleri önemlidir. Mevcut çalışmaya ilave olarak tabakalı hibrit kompozit üretiminde farklı reçineler, farklı kürleme sıcaklıkları ve farklı üretim yöntemleri denenerek etkileri karşılaştırılabilir. Ayrıca farklı frekans ve gerilme oranlarında yorulma deneyleri yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. Karahan, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, I. Verpoest, *3-Boyutlu Karbon-Epoksi Kompozit Malzemelerde Yorulma Davranışı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 19, Sayı 7, doi: 10.5505/pajes.2013.87587
- [2] Jen M.H.R., Lee C. H., Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads, Part I Experimental, Journal of Fatigue, 20, 605-615, (1998).
- [3] L.P. Borrego, J.D.M. Costa, J.A.M. Ferreira, H. Silva, Fatigue Behaviour of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites Enhanced With Nanoparticles, Composites; Part B (2014),65-72
- [4] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, H. Hoshi, *Effect of Stitch Density on Fatigue Characteristics and Damage Mechanisms of Stitched Carbon/Epoxy Composites*, Composites:Part A 60 (2014),52-65
- [5] Colombo C., Vergani L., Multi-axial fatigue life estimation of unidirectional GFRP composite, International Journal of Fatigue, 33, 1032-1039, (2011).
- [6] Kawai M., Suda H., Effects of Non-Negative Mean Stress on the Off-Axis Fatigue Behavior of Unidirectional Carbon/Epoxy Composites at Room Temperature, Journal of Composite Materials, 38, 833-854, (2004).
- [7] S. Doğanay, Y. Ulcay, *Farklı Oranlarda Takviye Edilmiş Cam Lifi Polyester Kompozitlerin Deniz Suyu Etkisi Altında Yorulma Davranışının İncelenmesi*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 2, 2007
- [8] Tomita Y., Morioka K., Iwasa M., Bending fatigue of long fiber reinforced epoxy composites, Materials Science and Engineering, A319-321, 679-682, (2001).
- [9] E.G. Koricho, G. Belingardi, A.T. Beyene, *Bending Fatigue Behavior of Twill Fabric E-Glass/Epoxy Composite*, Composite Structures, 111(2014),169-178
- [10] Kujawski D., Width effects on the tensile strength and fatigue behavior of angle-ply laminates, International Journal of Fatigue, 20, 575-580, (1998).
- [11] D.S. de Vasconcellos, F. Tauchard, L. Choconski-Arnault, *Tension-Tension Fatigue Behaviour of Woven Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composite: A Multi-Instrumented Damage Analysis*, International Journal of Fatigue,59(2014) 159-169
- [12] El-Kadi H., Ellyin F., Effects of stress ratio on the fatigue of unidirectional glass Fibre/Epoxy composite laminate, Composites, 25, 917-924, (1994).

- [13] J. Cheng, He-jun Li, Shou-yang Zhang, Li-zhen Xue, Wen-fei Luo, *Internal Friction Behavior of Unidirectional Carbon/Carbon Composites After Different Fatigue Cycles*, Materials Science & Engineering, A 600, 129-134
- [14] Cardrick A. W., Smith M. A., An approach to the development of meaningful design rules for fatigue-loaded CFRP components, *Composites*, 5, 96-100, (1974).
- [15] Yi-Meng J., Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints, *International Journal of Fatigue*, 36, 30-39, (2012).
- [16] A. Siriruk, D. Penumadu, *Degradation in Fatigue Behavior of Carbon Fiber-Vinyl Ester Based Composites Due to Sea Environment*, *Composites: Part B* 61 (2014), 94-98
- [17] P. Cornado, A. Argüelles, J. Vina, I. Vina, Influence of low Temperatures on the Phenomenon of Delamination of Mode I Fracture in Carbon-Fibre/Epoxy Composites Under Fatigue Loading, *Composite Structures*, 112(2014), 188-193
- [18] Kim K. S., Kim W. T., Lee D. G., Jun E. J., Optimal tubular adhesive bonded lap joint of the carbon fibre epoxy composite shaft, *Composite Structures*, 21, 163-176, (1992).
- [19] Belingardi G., Cavatorta M. P., Frasca C., Bending fatigue behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites, *Composites Science and Technology*, 66, 222-232, (2006).
- [20] Smith M. A., Hardy R., Fatigue research on bonded carbon fibre composite/metal joints, *Composites*, 8, 255-261, (1977)
- [21] Paepegem W. V., Degrieck J., Experimental set-up for and numerical modeling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites, *Composite Structures*, 51, 1-8 (2001).
- [22] Sakin R., Ay İ., Yaman R., An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials, *Materials and Design*, 29, 212-217, (2008).
- [23] Matthews, F.L. ve Rawlings, R.D., *Composite materials: engineering and science*, Chapman & Hall, UK, 1994.
- [24] Ersoy, H.Y., *Kompozit malzeme*, Literatür yayıncılık, Türkiye, 2001.
- [25] Jones, R.M., "Mechanics of composite materials", McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, (1975).
- [26] Rajendran, I., Vijayarangan, S., Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms, Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore.

- [27] Eren, Y., “Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi”, Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Mayıs 2007
- [28] Eskizeybek, V., “Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi”, Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 2006
- [29] Autio, M., 1999. Studies on Tailoring of Thermomechanical Properties of Composites, Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, Finland.
- [30] Arıcasoy, O., “Kompozit Sektör Raporu“, İstanbul Ticaret Odası, Aralık 2006
- [31] Belingardi G., Cavatorta M. P., Frasca C., Bending fatigue behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites, Composites Science and Technology, 66, 222-232, (2006).
- [32] Campbell, F. C., *Manufacturing processes for advanced composites*, Elsevier, New York, 2004.
- [33] A. Karcı, Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran,2009
- [34] Sahin, Y., Kompozit malzemelere giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [35] Budynas R. G., Nisbett J. K., 2011. Shigley’s mechanical engineering design, Ninth edition, Mcgraw Hill.
- [36] Bishop N. W. M., Sherratt F., 2000. Finite element based fatigue calculations, NAFEMS.
- [37] Aydın M., 1995. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [38] Kılıç, E., “Kompozit malzemeden yapılan yaprak yayların analizi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Mart 2006
- [39] Naik, N.K., “Woven-fibre thermoset composites,” Fatigue in Composites- Science and Technology of The Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics, (Ed: Harris, B.), CRC press, 296-313, 2003.
- [40] Gdoutos, E.E., Pilakoutas, K., & Rodopoulos, C.,A., (2000). “Failure analysis of industrial composite materials”, New York :McGraw-Hill.

- [41] Harris, B., (1999). "Engineering composite materials" (2nd ed.). London: IOM Communications.
- [42] Jones, R.M., "Mechanics of composite materials" (2th ed.). US: Taylor & Francis Inc. (1999).
- [43] Karcı, A., 2024-T3 Al alaşımasının tek aşırı yük altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir, 2002.
- [44] Morris, C. J., "Composite integrated rear suspension", Ford Motor Company, Dearborn, Michigan, USA.
- [45] Fibre-reinforced plastics - Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions, ISO 13003, International Organization for Standardization, Yeni Zelanda, 2003.
- [46] Himmel, N. ve Bach, C., Cyclic fatigue behavior of carbon fiber reinforced vinylester resin composites manufactured by RTM and VARI, International Journal of Fatigue, 28, 1263–1269, 2006.
- [47] Reifsnider, K. ve Case, S., "Micromechanical models," Fatigue in composites- Science and technology of the fatigue response of fibre- reinforced plastics, (Ed: Harris B.), CRC press, 2004.
- [48] Pinter, G., Ladstätter E., Billinger W. ve Lang R.W., Characterisation of the tensile fatigue behaviour of RTM-laminates by isocyclic stress–strain diagrams, International Journal of Fatigue, 28, 1277-1283, 2006.
- [49] Degrieck, J. ve Paepegem, W.V., Fatigue damage modelling of fibre- reinforced composite materials: Review, Applied Mechanics Reviews, 54, 279-300, 2001.
- [50] Pantelakis, S.P.G., Kyriakakis E.M. ve Papanikos, P., Non-destructive fatigue damage characterization of laminated thermosetting fibrous composites, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 24, 651-662, 2001.
- [51] Topkaya H., 2013. Dental implant uygulamalarında yorulmanın sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [52] Sakin, R., Bilgisayar destekli çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2004.

- [53] Karacaer Y., 2009. Cam kumaş takviyeli delikli SMC kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Anıl İMAK, 1988 yılında Elazığ ilinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2013 yılı Nisan ayında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve 2014 yılı Aralık ayından beridir Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.