

CAM ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN EĞİLME YORULMA DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Ümran ESENDEMİR¹, Remzi VAROL¹

ÖZET

Kompozit malzemelerde yorulma izotrop malzemelerden farklıdır. Fiber-matris ara yüzey bağ kuvvetleri, yük doğrultusu ile fiber doğrultusunun farklı olması kompozitlerde yorulma davranışını etkileyen faktörlerdir. Metalik malzemelerden farklı olarak bu tür malzemelerde liflerde oluşan kısmi hasarlar, kırılmalar, belirgin renk değişimi hasar olarak kabul edilmektedir. Halbuki metalik malzemelerde yorulma ise çatlak oluşumu ve çatlağın ilerlemesi aşaması sonrası ani gevrek kırılma ile sonuçlanmaktadır.

Bu deneysel çalışmada, dikdörtgen kesitli cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eğilme yorulma davranışı incelenmiştir. Kompozit malzeme örgü şeklinde 7 tabakalı 4 mm kalınlığında imal ettirilmiştir. İmal ettirilen kompozit malzemenin numuneler oluşturulmuştur. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Özel olarak levha şekilli numunelerin yorulma deneyleri için tasarlanmış eğilme yorulma deney cihazında deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kompozit malzemenin çekme dayanımı değerleri esas alınarak yorulma deneylerinde uygulanan gerilmeler belirlenmiştir. Deney sonuçlarından yararlanarak kompozit malzemenin S-N eğrisi çıkarılmıştır. Yorulma deneyi öncesinde cam elyafların matris malzeme içinde dağılımı, düzeni ve homojenliğini belirlemek amacıyla ve yorulma deney sonrasında liflerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla optik mikroskopla geçirimsiz ışık yardımıyla görüntüler alınmıştır. Böylece yorulmaya neden olan hasar tipi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Kompozit malzeme, yorulma davranışı, S-N eğrisi,

DETERMINATION OF BENDING FATIGUE BEHAVIOR OF GLASS FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES

ABSTRACT

Fatigue of composite materials differs from isotropic materials such as metals. The main reason for this are different type of damage that can occur as fibre cracking, matrix cracking, matrix crazing, fibre buckling, fiber-matrix interface failure, delamination. These important differences make fatigue phenomenon of composites very complex. In metallic materials,

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi Müh. Fak. Mak. Müh. Böl., Isparta/TÜRKİYE

fatigue states as formation of crack, propagation of crack and finally brittle fracture occurs as result of fatigue failure.

In this experimental study, specimens were prepared with rectangular cross-section area produced fiberglass reinforced epoxy composite. The main purpose of the study is fatigue phenomenon of fiberglass reinforced epoxy composite. Composite samples have been manufactured in woven form as seven layers with four milimeters thickness. Specimens used experiments were cut off from these materials. First of all, mechanical properties of produced strip type composite materials. For fatigue tests, fatigue test machine used for strip type specimens was used. Tensile tests were applied to fiberglass reinforced composite materials and Ultimate Tensile Strength (UTS) datas were used to determined alternating stresses during fatigue tests. After fatigue tests the Stress-Number of Cycle (S-N) curves were plotted. Before and after fatigue tests, specimens were observed using optical microscope. Before fatigue tests, the homogeneity and dispersal of fibers in matrix and after fatigue tests failure and differences of fibers and matrix were examined. As a results of these examinations failure type of specimens were determined.

Keywords: Composite material, fatigue behavior, S-N curve

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve sanayileşmeden kaynaklanan yeni malzeme ihtiyacı, kompozit malzemelerin kullanım alanlarının gün geçtikçe artmasına neden olmuştur. Uzay , otomotiv, havacılık sanayinde uygulamalarının yanısıra; borular, müzik, spor aletleri gibi bir çok yerde kullanılan kompozit malzemeler değişken gerilmelerden dolayı yorulma etkisine maruz kalabilmektedirler.

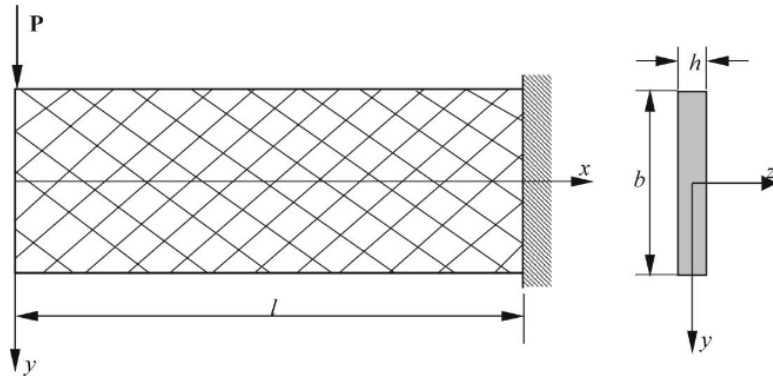
Endüstride birçok malzeme çekme mukavemetinin çok altında tekrarlı gerilme veya şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Tekrar eden veya çevrimli yüklere maruz kalan parçalar tek bir statik gerilme uygulanması halinde dayanabilecekleri gerilmenin çok altındaki bir gerilmeye hasara uğramaktadırlar. Bunlara yorulma hasarı adı verilir. Malzemenin kullanılabilirliğine yorulma özellikleri incelenerek daha iyi karar verilebilir. Malzemenin yorulma özelliklerini belirlemek için genelde S-N (Wöhler) eğrileri kullanılır [1]. S-N eğrisinde ordinat eksenini genellikle bir devirdeki gerilme veya gerinim olmakta, apsis eksenini ise logaritmik olup çevrim sayısını göstermektedir. S-N eğrisi metaller, polimerler ve kompozit malzemeler için gerilme değeri düştükçe hasarın görüldüğü çevrim sayısında bir düşüş meydana geldiği için negatif bir eğime sahiptir. Kompozit malzemelerde eğrinin şekli matris malzemesinin cinsine, oryantasyon açısına, hacimsel orana, arabirim özelliklerine, yükleme tipine, ortalama gerilmeye, ortalama frekansa ve çevre şartlarına göre değişir [2]. Yorulma üzerine etki eden faktörlerin çok sayıda ve karmaşık olmasından dolayı standartlaşmış yorulma deneyi oluşturmak güçtür. Kompozit malzemeler metaller gibi izotropik ve homojen olmadıkları için, hasar her zaman makro çatlakların ilerlemesi şeklinde meydana gelmez [3]. Kompozit malzemelerde yorulma hasarı matris çatlakları delaminasyon, liflerin kırılması, fiber matris arayüzey ayrılması şeklinde olarak genellenebilir. Kompozitlerin yorulma performansını ise fiberin tipi, matrisin tipi, istifleme sırası, ortam şartları, yükleme durumu etkilemektedir [4].

Literatürde fiber takviyeli kompozit malzemelerin eğilme yorulma davranışı üzerine çok fazla bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu konuda; Sakin ve arkadaşları [5] 800 g/m^2 , 500 g/m^2 , 300 g/m^2 ve 200 g/m^2 örgü ve 225 g/m^2 , 450 g/m^2 ve 600 g/m^2 düzensiz dağıtılmış cam fiber takviyeli polyeester kompozit malzemelerin eğilme yorulma davranışını incelemiştir. $0/90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ olmak üzere iki farklı oryantasyon açısı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 800 g/m^2 örgü cam fiber takviyeli polyeester kompozit malzemenin yorulma ömrünün daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Cam-epoksi kompozit malzemenin yapılmış numunelerin deniz suyu ve darbe yüklerinin etkisi altındaki yorulma davranışı incelendiğinde ise deniz suyunun yorulma ömrünü azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [6]. Doğanay ve Ulçay [2] çalışmalarında farklı oranlarda takviye edilmiş (takviyesiz, %1, %3 ve %6) cam lifli polyeester kompozitlerin deniz suyu etkisi altındaki yorulma davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda takviye oranının yorulmaya önemli etkisi olmadığı, deniz suyu bekletme süresi arttığında yorulma dayanımında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tomita ve arkadaşları [7] çalışmalarında ortalama 3.5, 4.5, 5 ve 5.5 GPa çekme gerilmesine sahip uzun karbon fiberlerden oluşan plastik kompozitlerin eğilme yorulma davranışı ve kırılma mekanizmasını incelemiştir. Paeppegem ve Degrieck [8] çalışmalarında örgülü cam epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışını belirleyip, yorulma altındaki davranışının nümerik modellemesini yapmışlardır. Yuanjian ve Isaac [9] cam elyaf takviyeli polyeester reçine kompozitlerin düşük hız darbe ve gerilme-gerinme yorulma davranışlarını incelemiştir. Rozumek ve Marciniak [10] çelik malzemenin yapılmış levha numunenin yorulma dayanımını incelemiştir. Gerilme oranı $R=1$ için yüksek devir yorulma rejiminde deney yapmışlardır.

Başta uçak, uzay ve otomobil sanayinde olmak üzere çok farklı kullanım alanları olan kompozit malzemelerin farklı şiddet ve değişken zorlamalara karşı dayanımı büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla bu çalışmada, ürettiğimiz örgü dikdörtgen kesitli cam-elyaf takviyeli kompozit numunelerin eğme yorulma özellikleri incelenerek S-N eğrisi çizilmiştir.

2. GENEL TEORİ

Şekil 1’de serbest ucundan tekil kuvvete maruz kompozit ankastre kiriş gösterilmektedir.



Şekil 1. Serbest ucundan P tekil yüküne maruz kompozit ankastre kiriş

Serbest ucundan P tekil yüküne maruz kompozit ankastre kirişin gerilme denklemleri aşağıdaki gibidir [11].

$$\sigma_x = -\frac{P}{I}xy + \frac{P}{I} \frac{a_{16}}{a_{11}} \left(\frac{b^2}{12} - y^2 \right) \quad (1)$$

$$\sigma_y = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{P}{2I} \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right) \quad (3)$$

Bu kiriş için eğilmeden dolayı oluşan genel sehim denklemi şu şekildedir [11].

$$\delta = \frac{P}{I} \left[\frac{2a_{12} a_{66} - 3a_{11} a_{26}}{24 a_{11}} y - \frac{a_{12}}{2} xy^2 + \frac{-2 a_{12} a_{16} + a_{11} a_{26}}{6 a_{11}} y^3 + \frac{a_{16}}{6} (x^3 - 3l^2x + 2l^3) \right] \quad (4)$$

$x = 0, y = 0$ noktasında sehim maksimum olacağından; (4) denkleminde maksimum sehim

$$\delta_{\max} = \frac{P a_{11} l^3}{3 I} \quad (5)$$

olarak elde edilir. I atalet moment olup, dikdörtgen kesit için $I = \frac{h b^3}{12}$ olarak alınmıştır.

Burada ,

$$\begin{aligned} a_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\ a_{12} &= S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ a_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\ a_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ a_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ a_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

şeklindedir.

3. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli malzemeler için eğilme yorulması test cihazında cam-elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin yorulma davranışı belirlenmiştir.

Yorulma cihazı yüksek frekanslı ve genlik ayarlı olup, malzemeyi çift yönde eğme yapmak suretiyle maksimum olarak yormaktadır. Testlerde kullanılan gerilme seviyeleri statik çekme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre yapılmıştır. Deneyler sabit gerilme aralığında,

gerilme oranı (R), çift yönde yükleme yapıldığı için tam değişken yüklemeli $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$ kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Cihazın frekansı sabit olmayıp ayarlanabilmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

7 tabakalı örgü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzeme Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Kompozit Üretim Laboratuvarında üretilmiştir. Fiber malzeme olarak E-cam 800 g/m² örgü kumaş kullanılmıştır. Kullanılan fiber malzeme Metyx markadır. Reçine olarak Huntsman Araldite LY 1564 epoxy sertleştirici olarak ise Huntsman Aradur BD UN2735 kullanılmıştır. Kürleme işlemi 24 saat 25⁰C- 15 saat 80⁰C’ de yapılmıştır.

Malzemeye ait mekanik özellikler standartlara uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri statik yük altında, çekme, basma ve kayma deneyleri yapılarak bulunmuştur. Çekme deneyi sonucunda E₁, E₂, ν_{12} X_t, ve Y_t değerleri, basma deneyi sonucunda X_c ve Y_c ve kayma deneyi sonucunda ise G₁₂ ve S değerleri bulunmuştur. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin belirlenen mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

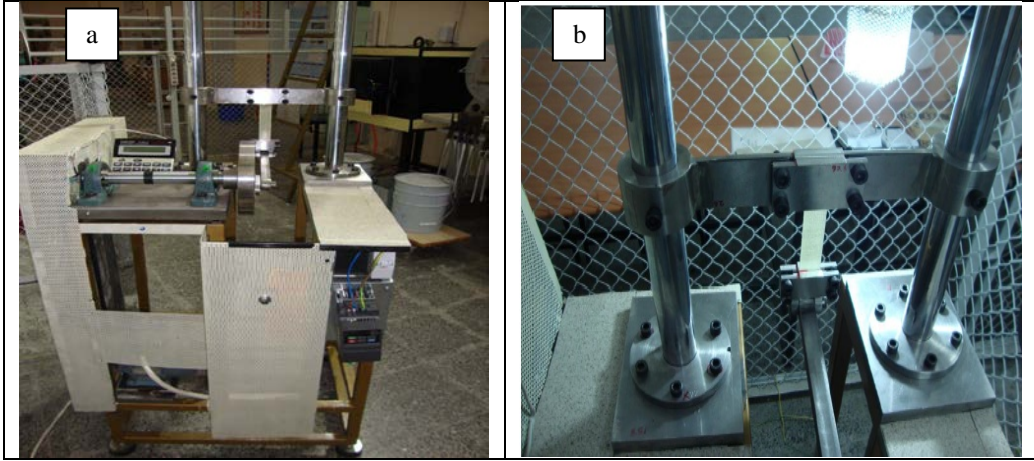
Tablo 1. Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri

Özellikler	Semboller	Değer
Lif doğrultusundaki elastisite modülü	E ₁ (MPa)	22000
Lif doğrultusuna dik doğrultudaki elastisite modülü	E ₂ (MPa)	22000
Kayma modülü	G ₁₂ (MPa)	3600
Poisson oranı	ν_{12}	0.20
Lif doğrultusundaki çekme dayanımı	X _t (MPa)	480
Lif doğrultusundaki basma dayanımı	X _c (MPa)	380

Lif doğrultusuna dik doğrultudaki çekme dayanımı	Yt (MPa)	480
Lif doğrultusuna dik doğrultudaki basma dayanımı	Yc (MPa)	380
Kayma dayanımı	S (MPa)	65

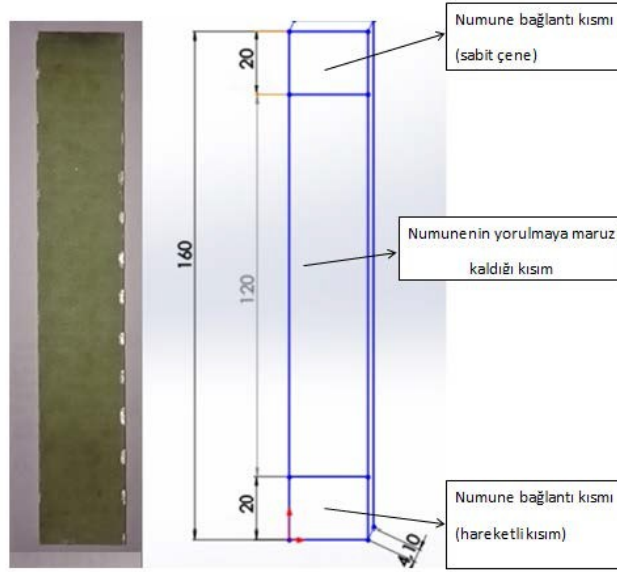
4. 2. Kompozit Malzemenin Eğilme Yorulma Davranışının Belirlenmesi

Deneyler, özel olarak levha şekilli numunelerin yorulma deneyleri için tasarlanmış eğilme yorulma deney cihazında yapılmıştır. Deney cihazının genel görünüşü ve deney numunesinin cihaza bağlanması Şekil 2’de verilmiştir.



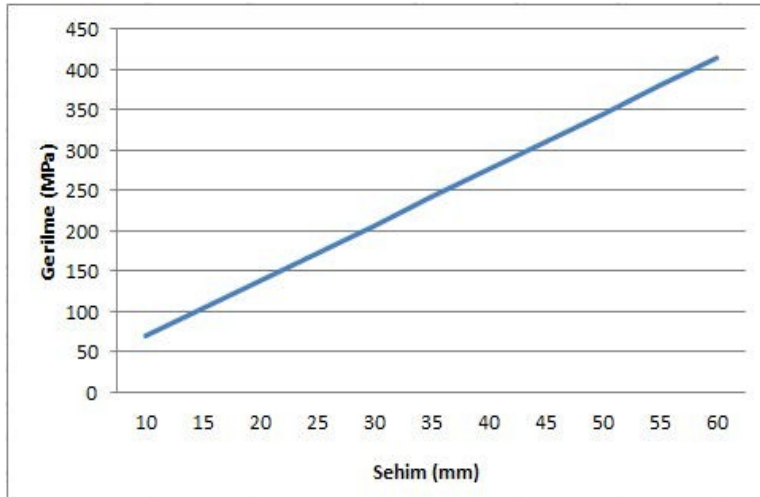
Şekil 2. Yorulma cihazının genel görünümü (a), Deney numunesinin cihaza bağlanması (b)

Farklı gerilme değerlerinin uygulanabilmesi için deney cihazının çevrim sayısı ile numunenin maksimum sehim miktarları ayarı yapılabilmektedir. Cihaz için sehim miktarı 0-60 mm aralığında yapılabilmektedir. Şekil 3’te yorulma deneyinde kullanılacak numunenin boyutları ve şekli verilmiştir.



Şekil 3. Dikdörtgen kesitli numune şekli ve boyutları

Dikdörtgen kesitli numunelerin eğme gerilmesi değerleri (1) nolu denklem, sehim değerleri ise (5) nolu denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Cam-elyaf kompozit malzemeye ait gerilme-sehim diyagramı Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Cam-elyaf malzeme için gerilme-genlik değişimi

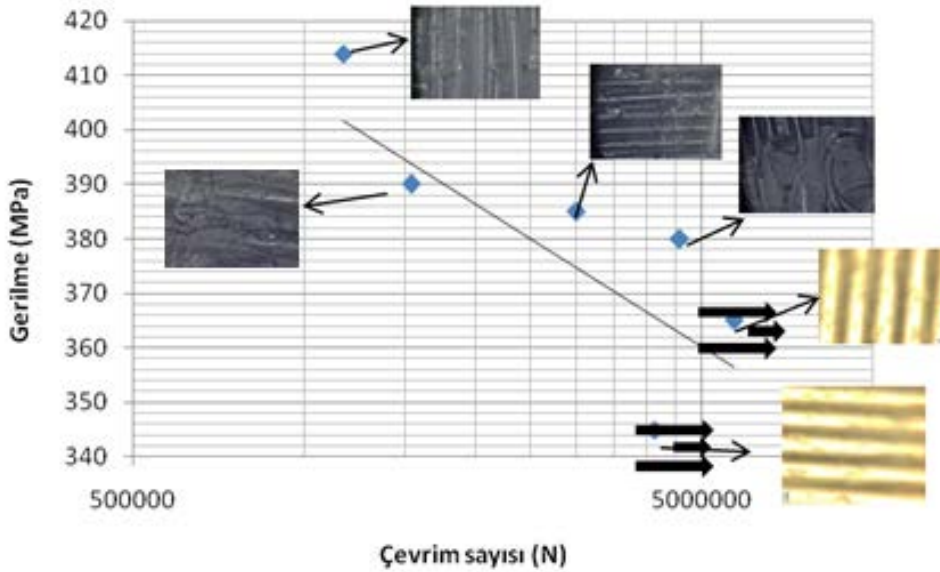
5. TARTIŞMA

Yorulma deneyinden uygulanan tam değişken eğme gerilmesi değerleri ve çevrim sayıları (S-N değerleri) Tablo 2’de verilmektedir. Yorulma deneyi esnasında farklı tam değişken eğme gerilmeleri uygulanmış ve uygulanan gerilme değerleri aralığı 414 MPa – 345 MPa olarak seçilmiştir. Bu değerler seçilirken kullanılan kompozit malzemenin deneylerle belirlenen çekme dayanım değeri (480 MPa) kullanılmıştır. Mühendislik malzemelerinin eğme dayanımı ile çekme dayanımı arasında bir ilişki mevcuttur ($\sigma_{eg} \geq R_m$). Uygulanan gerilme değerleri çekme dayanımı değerlerinin 0,72-0,86 katları aralığında belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yüksek gerilme seviyeleri malzemenin hasara uğrayıncaya kadar kaç devir yüklemeye dayandığını tespit etmek için kullanılmıştır. Yorulma deneylerinde yüksek gerilme değerleri uygulanması durumunda numuneler aşırı zorlanmıştır. Gerilme seviyeleri azaltılarak deneyler devam etmiştir. Deneyler 12 Hz frekansta yapılmıştır. Kullandığımız kompozit malzeme şeffaf görünümlü olduğundan hasar bölgesi ışık mikroskobu yardımıyla görüntülenmiştir.

Tablo 2.Yorulma deneyinde uygulanan gerilme değerleri ve buna karşılık belirlenen çevrim sayısı değerleri

Uygulanan Eğme Gerilmesi (MPa)	Çevrim Sayısı (N)
414	1.172.500
390	1.543.627
385	3.008.321
380	4.557.331
365	5.698.431
345	4.142.123

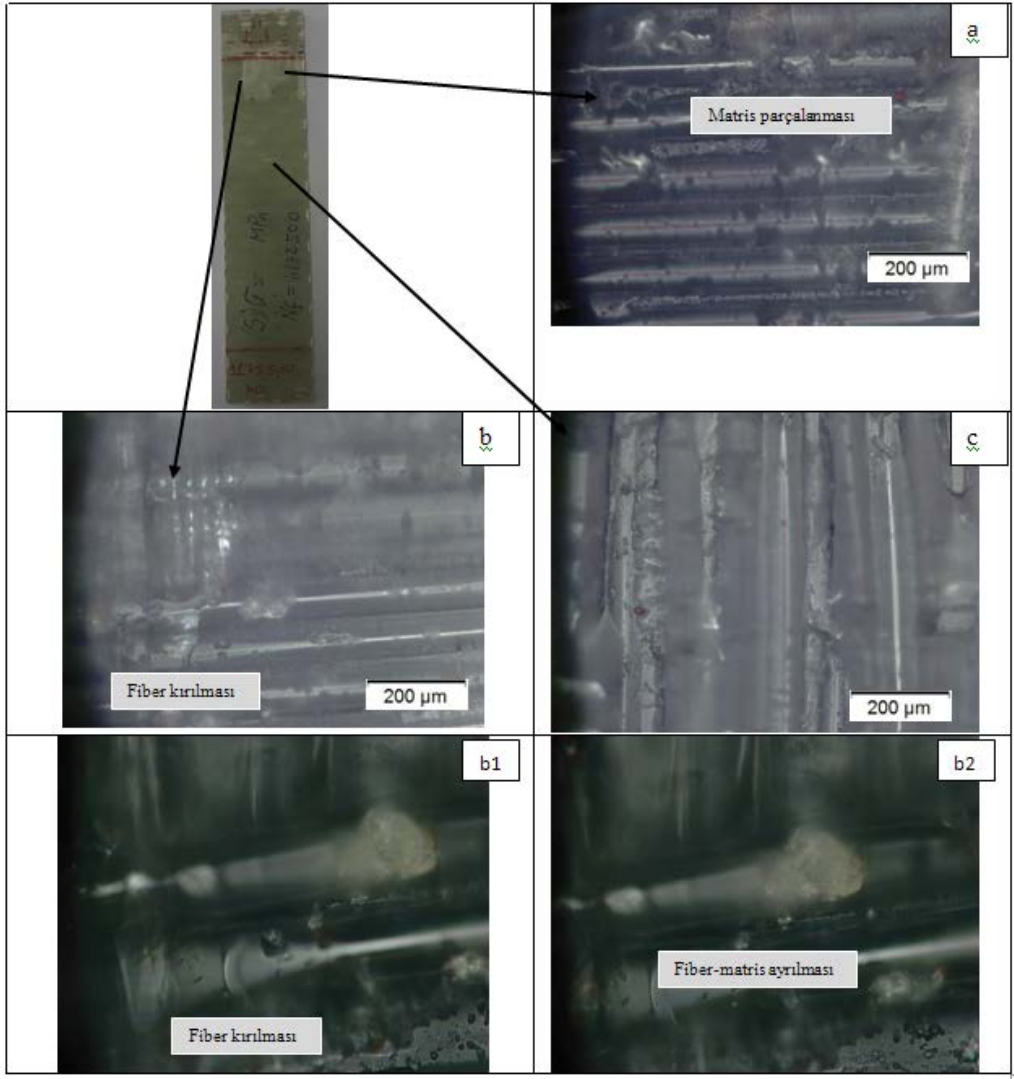
Tablo 2’de verilen değerlere göre çizilen S-N eğrisi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Cam elyaf kompozit malzemeye ait S-N eğrisi

Kompozit malzemelerde yorulma davranışı çok kompleksdir. Kompozit malzemelerde matris ve ilave fiber malzeme hacimsel oranı, yükleme şartları, çevre şartları, kalınlık ve fiber boyutları, dağılımı gibi pek çok faktör yorulma davranışını etkilemektedir [12]. Bundan dolayı kompozitler için S-N eğrisi çizilmesinde küçük farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Buna rağmen genel anlamda Wöhler eğrilerinin karakteristiği kaybedilmeden S-N eğrileri çizilmektedir [13]. Kompozit malzemelerde yorulma malzemedeki dayanım özelliklerindeki değişim olarak veya matris-fiber sınırlarında ortaya çıkan süreksizlikler dikkate alınmaktadır. Malzemede gelişen mikro çatlak oluşumu malzemenin rijitliğini ve mekanik dayanımını düşürmektedir [12].

Deneylerde belli çevrim sayılarından sonra numuneler alınarak ışık mikroskopunda incelenmişlerdir. Şekil 6.'da 60 mm sehim verilerek yorulma deneyine tabi tutulan numunenin optik mikroskopla geçirimli ışık yardımıyla görüntüleri alınmıştır.

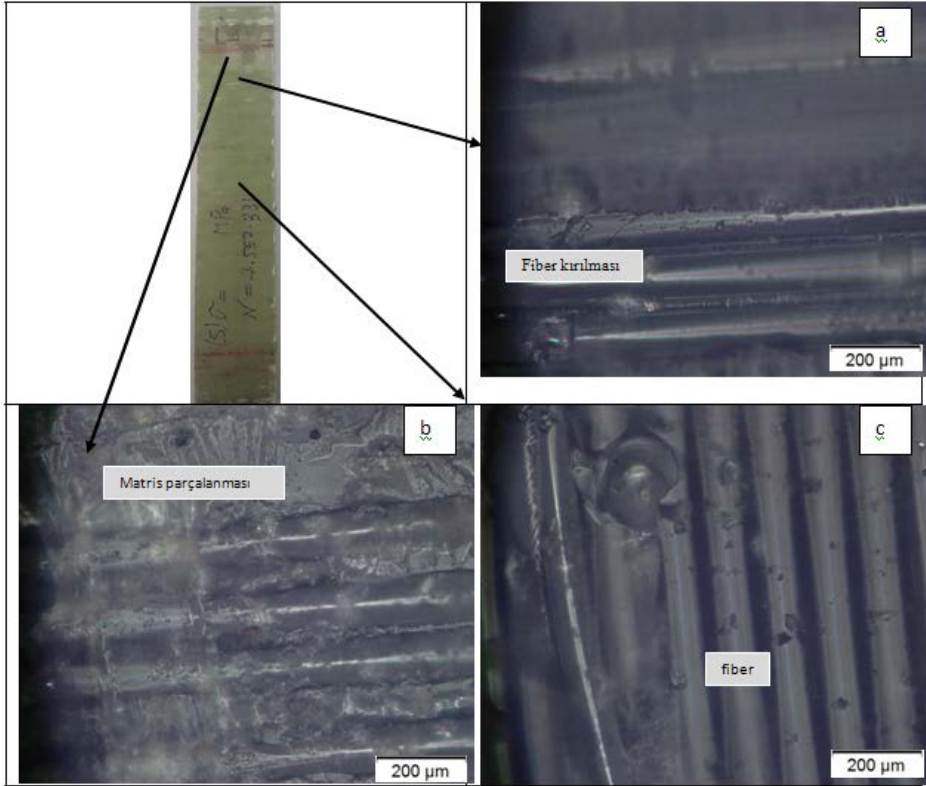


Şekil 6. Yorulma deneyi sonrası ışık mikroskobu görüntüleri ($\sigma = 414$ MPa)

Şekil 6 (a) da yorulma sonucu oluşan matris parçalanmaları Şekil (b) de fiberlerin kırılması görülmektedir. Daha detaylı görüntülerde (Şekil b1-b2) ise fiberlerin kırıldığı ve dar bir şerit halinde matrisden ayrıldığı görülmektedir. Şekil 6 (c) de ise hasarın olmadığı görülmektedir.

Şekil 7.'de 55 mm sehim verilerek yorulma deneyine tabi tutulan numunenin optik mikroskopla geçirimli ışık yardımıyla görüntüleri alınmıştır Şekil 7'den yorulma sonucu oluşan matris parçalanmaları, fiber kırılması görülmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyum

içindedir. Yorulma yükü altında fiber takviyeli kompozitlerin hasarı anizotropik yapısından dolayı metallere göre daha kompleksdir. Fiber takviyeli kompozitlerin heterojen ve anizotropik özelliği, malzeme içinde farklı gerilme seviyelerinin oluşumuna neden olur. Böylece kırılma işlemi, matris çatlağı, fiber kırılması, delaminasyon, ayrılma ve katman hasarı gibi çeşitli hasar modlarının kombinasyonlarını içerir [14]. Lif kırılması, liflerin matris yapı içindeki matris-lif ara yüzeyindeki tutunmanın ortadan kalkması gibi nedenler kompozitlerde yorulma hasarını oluşturan sebeplerdir [15].



Şekil 7. Yorulma deneyi sonrası ışık mikroskobu görüntüleri ($\sigma = 380$ MPa)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeden hazırlanmış levha şekilli numunelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilerek, gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi çizilerek malzemenin normal kuru atmosferi ve 20-25°C sıcaklık aralığında eğilme yorulması davranışı belirlenmiştir. Deneyler, değişken gerilme uygulanması esnasında; kompozit numunenin ısınması ve bundan kaynaklanan sıcaklık yükselmesi numunenin özelliklerinde değişime, özellikle mekanik özellik değerlerinin kötüleşmesine sebep olacağından düşük frekansta yapılmıştır. Sıcaklık artışı engelleyen bir diğer faktör ise levha şeklindeki

numunelerin iki yönlü eğme yapılması nedeniyle kendisinden daha soğuk hava ile rüzgar etkisi oluşturarak kendi kendini soğutmanın gerçekleşmesidir. Deney esnasında ve deneyin sona erdiği, hasarın oluşup deneye son verildiği esnada yorulmaya zorlanan deney numunelerinde herhangi bir sıcaklık artışı belirlenmemiştir. S-N eğrisinden elde ettiğimiz veriler sonucunda sehim artıkça daha az çevrim sayısında (N) numuneler daha çabuk deforme olup matrislerde ve liflerde hasar oluşumunun daha kolay olduğu görülmüştür. Hasar tipi olarak; fiber kırılması, matris malzemede ana yapısının parçalanması, fiber-matris arayüzeyinde kalıcı ayrılmalar şeklinde belirlenmiştir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Er, M., 2006. Yüksek frekanslı, genlik ayarlı eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve 1100-H14 alüminyum levhasının eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, Balıkesir.
- [2] Doğanay, S., Ulcay, Y., 2007. Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 12(1): 85-95.
- [3] Özkavak, H., Esendemir, Ü., 2015. Dikdörtgen kesitli numuneler için eğilme yorulması test cihazının imalatı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12, 1-11.
- [4] Degrieck, J., Van Paeppegem, W., 2001. Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: review, American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Reviews, 54(4):279-300.
- [5] Sakin, R., Ay, İ., Yaman, R., 2008. An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials, Materials and Design, 29, 212-217.
- [6] Deniz, M.E., Özen, M., Özdemir, O., Karakuzu, R., İçten, B.M., 2013. Environmental effect on fatigue life of glass-epoxy composite pipes subjected to impact loading. Composites, Part B (44), 304-312.
- [7] Tomita, Y., Morioka, K., Iwasa, M., 2001. Bending fatigue of long carbon fiber reinforced epoxy composites. Materials Science and Engineering, A319-321, 679-682.
- [8] Paeppegem, W.V., Degrieck, J., 2001. Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites. Composite Structures, 51, 1-8.
- [9] Yuanjian, T., Isaac, D.H., 2008. Combined impact and fatigue of glass fiber reinforced composite. Composites, B, 39 (3), 505-512.
- [10] Rozumek, D., Marciniak, Z., 2012. The investigation of crack growth in specimens with rectangular cross-sections under out-of-phase bending and torsional loading. International

Journal of Fatigue, 39, 81-87.

[11] Kılıç, O., Aktaş, A., Dirikolu, M.H. 2001. An investigating of the effects of shear on the deflection of an orthotropic cantilever beam by use of anisotropic elasticity theory. Composites Science and Technology, 61, 2055-2061.

[12] Mini, M., K., 2012, Effect of fibre volume fraction on fatigue behaviour of glass fibre reinforced composite, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 35, (12), 1160-1166.

[13] Barchan, A., 2001, The analysis of fatigue damage to glass-fiber reinforced composites, Materials Science, 37, (6), 918-927.

[14] Belingardi, G., Cavatorta, M.P., Frasca, C. 2006. Bending fatigue behavior of glass-carbon/epoxy hybrid composites, Composites Science and Technology, 66 (2), 222-232.

[15] Harris, B., 2003. Fatigue in Composites. Science and Technology of the Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics. Woodhead Publishing Limited, 764p, England.