

Hibrit kompozit boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi.

Lokman GEMİ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir MYO, Konya/TÜRKİYE, lgemi@konya.edu.tr

Özet

Hibrit boruların yorulma davranışlarının belirlenmesi amacıyla ASTM-D 2992-06 standardına uygun olarak ($R=0.05$ gerilme oranı ve $f=0.42$ Hz frekansta) yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla patlama mukavemetinin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55 max. teğetsel gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. Yorulma deneyleri sırasında gelişen hasarlar detaylı bir biçimde incelenmiş ve üç önemli hasar aşaması belirlenmiştir. Bu hasarlar; terleme veya damlacık şeklinde ilk sızıntı, yoğun sızıntının (su jeti) başlaması, tabaka ayrılması ve patlama şeklinde sonuç hasarıdır. Sonuç hasarının oluştuğu çevrim sayıları kayıt edilerek S-N eğrisi elde edilmiştir. Yorulma sonrası numunede oluşan hasar bölgeleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yorulma, Elyaf takviyeli plastik, Filaman sarım, Hasar davranışı, Hibrit kompozit, İç basınç

Abstract

In order to obtain the fatigue behavior the hybrid pipes were subjected to fatigue testing according to ASTM D 2992-06 which stipulates stress ratio of $R=0.05$ and loading frequency of $f=0.42$ Hz. For this aim, the pipes subjected different operating pressures have now subjected to fatigue loading at stress levels 30%, 35%, 40%, 45%, 50% and 55% of burst pressure of intact pipes. The damage formation during fatigue loading was examined in detail and three different damage types were observed which are; leakage initiation as sweating or oil droplet formation, intense leakage, delamination and explosion final failure. The final failure cycles were recorded and used for obtaining S-N curves. After the fatigue testing, the damage zones within material were examined.

Key words: Fatigue, Fiber reinforced plastic, Filament wound, Damage behavior, Hybrid composite, Internal pressure

1. Giriş

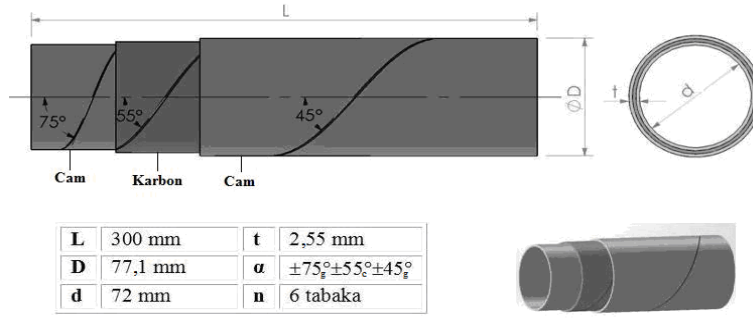
Kompozit boruların yorulma davranışları ile ilgili de birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde hibrit kompozitler hakkında yapılmış birçok çalışmada vardır. Bu çalışmalar genel olarak hibritasyonun yorulmaya etkisini incelemişlerdir. Özellikle hibrit kompozitlerde tabaka sıralamasının ve takviye malzemelerinin oranının önemi vurgulanmıştır. Ellyin ve Martens, filaman sarım metoduyla üretilmiş olan CTP boruları iki eksenli yorulma deneyine tabi tutmuşlardır. Deneylerde farklı teğetsel/eksenel yükleme durumları için malzemenin yorulma davranışları incelenmiş, sızıntı ve hasar dayanımları belirlenirken, yine iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [1]. $(\pm 55^\circ)_2$ sarım açılımlarına sahip cam-epoksi kompozit borular ekstenel yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yükleme değerleri malzemenin çekme dayanımının %60, %70, %80 aralıklarında seçilerek S-N diyagramı elde edilmiştir [2]. Rebiere ve ark.'nın yaptıkları çalışmada

yapıdaki radyal ve boyuna çatlakların gerilme bölgesine etkisi, rijitlikteki düşüş ve Poisson oranındaki düşüşü incelemişlerdir. Deneyler statik ve alternatif yükler altında yapılmıştır [3]. Filaman sarım kompozit borular birçok araştırmacı tarafından tek eksende yorulmaya tabi tutulmuştur [4-5]. Ferry ve ark.'na göre, bir kompozit malzemenin yorulma direnci, matrisin hasara karşı direnci ile ilgilidir [6]. Hwang ve Han'a göre, kompozit malzemelerde sekant modülündeki düşüş, hasarın bölgesel olarak birleşimi ile belirlenir [7]. Martens (1999), yaptığı çalışmada iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkinin belirlenmesini incelemiştir [8]. Hashin ve Rotem, değişik modlarda elyaf takviyeli malzemeler için yorulma mukavemet kriteri ortaya koymuşlardır [9]. Çok yönlü tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır [10]. Perreux ve ark. yaptıkları çalışmada ($\pm 55^\circ$)₃ açılı tabakalı kompozit filaman sarım borular kullanmıştır. Frekansın ömür ve hasar etkisi incelemişlerdir ($0.02 \leq$ frekans ≤ 5 Hz). Frekans arttıkça ömrün arttığını fakat belli bir noktadan sonra frekans arttıkça ömrün değişmediğini göstermişlerdir [11]. Reisfinder, yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlakların sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra doyuma ulaşmış ve daha fazla ilerlemediğini göstermişlerdir [12]. Ayrıca, Vanpaepegem ve ark. yorulma sonucu tabaka ayrılması olayını incelemiş ve bu olayı sonlu elemanlar analizi ile doğrulamıştır [13]. Sarı ve ark. darbe enerjisinin kompozit boruların statik patlama basıncına ve yorulma ömrüne etkisini araştırmışlardır. Numuneler 100 mm iç çapında ve 400 mm uzunluğunda üretilmiştir. Numunelere statik iç basınç uygulanmış hasar basınçları tespit edilmiştir. Bu basınç referans alınarak kompozit borular sırasıyla yorulmaya maruz bırakılmış ve dinamik hasar ve yorulma ömürleri elde edilmiştir. Statik testte darbeden sonra sızıntı ve patlama basıncında azalma, terleme, sızıntı ve patlama çevrimlerinde düşüş gözlenmiştir [14]. Rousseau, sarım motifinin ince kompozit tüplerdeki hasara etkisini incelemiştir. Farklı $\pm 55^\circ$ sarım motifine sahip tüplerin iç basınç yorulma testleri, hasar gelişimi ile sarım deseni arasında bir ilişkinin olmadığını işaret etmiştir [15]. Deniz ve ark. $\pm 55^\circ$ cam elyaf takviyeli flaman sarım borularda çevrimsel iç basınç altındaki cam-epoksi kompozit boruların yorulma ömrüne deniz suyunun ve darbe yükünün etkisini araştırmışlardır. Kompozit boruları 3, 6 ve 9 aylık zaman aralıklarında deniz suyuna daldırılıp bekletilmiştir [16].

2. Materyal ve Metod

2.1. Hibrit kompozit boru üretimi

Bu çalışmada kullanılan hibrit borular; filaman sarım yöntemi ile cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g^\circ/\pm 55_c^\circ/\pm 45_g^\circ$ sarım açılarında üretilmiştir. Cam-karbon elyaf/epoksi boruların hazırlanmasında; elyaf malzemesi olarak 1200 teks (17 μ m çapında) E camı ve 12K A-42 800 teks karbon elyaf, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphenol A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. Reçine banyosunda reçine karışımının sıcaklığı 60 °C de kontrol altında tutulmuştur. Mandrellerin üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür. Kür işlemi ise 2 saat 135 °C ve 2 saat 150 °C de yapılmıştır. Hibrit boruların geometrik ölçüleri Şekil 1.'de verilmiştir. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



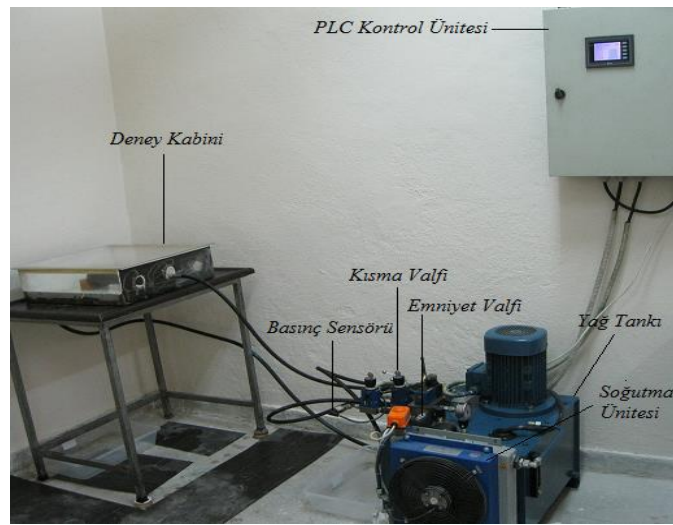
Şekil 1. Numune geometrisi

Tablo 1. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri

	E (GPa)	$\sigma_{çek}$ (MPa)	ρ (g/cm ³)	ϵ_{kop} (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2,6	1,5-2
Elyaf: Karbon-12K A-42	230	3500	1,75	1,5
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	4-6

2.2. İç Basınç Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri için Şekil 2’de gösterilen PLC kontrollü iç basınç yorulma deney cihazı kullanılmıştır. Bu iş için; $P=250$ bar basınç ve $Q=8$ l/dak’lık debi kapasiteli dişli pompası bulunan, tank hacmi $V=60$ litre olan bir hidrolik güç ünitesi hazırlanmıştır. Pompa çıkışına alt ve üst basınçları mekanik olarak set edebileceğimiz birer adet basınç emniyet valfi konulmuştur. Bunun üzerine PLC ünitesinden uyarı alan, selenoid kumandalı 2x2’lik bir yön kontrol valfi konulmuştur. Valf çıkışına devredeki yağ basıncını algılayan SIEMENS marka analog bir basınç transmitteri takılmıştır. Hidrolik sistem aynı anda üç adet deney numunesi ile birlikte çalışmaya müsaade edecek kapasitede tasarlanmıştır.



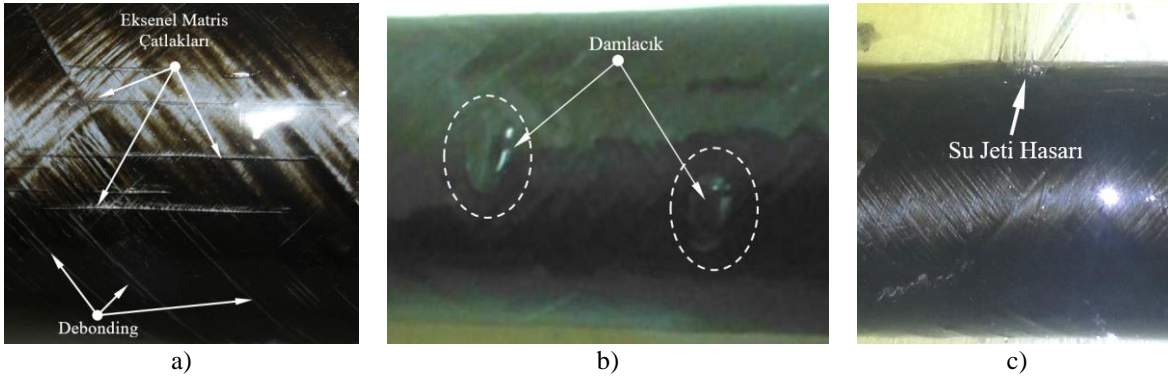
Şekil 2. PLC kontrollü iç basınç yorulma deney cihazı

Yorulma deneylerinde teğetsel ön gerilme uygulamak için serbest uçlu iç basınç test aparatı hazırlanmıştır [17]. Hazırlanan düzenek hibrit kompozit borunun içine, boru iki ucu sızdırmazlık keçeleri üzerine gelecek şekilde monte edilmiştir. Böylece boruya iç basınç uygulandığında boru çapı artarken boru boyu kısalabilmektedir. Hibrit borular patlama mukavemetinin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55 max. teğetsel gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hibrit boruların yorulma hasar analizi

Karbon, E-cami/epoksi kompozit borular hasarsız olarak Bölüm 2.2 de belirtilen gerilme oranlarında yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Hibrit boruların yorulma deneyinde, iç basıncın etkisiyle bütün tabakalardaki elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmıştır. Bunun neticesi olarak deney numunesinin boyunda kısalma olurken çapında artma meydana gelmiştir. Elyafların teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucu \pm elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisiyle tabakalar arası ayrılmalar ve elyaf matris ayrılmaları gerçekleşmiştir. Beyazlama şeklinde gerçekleşen bu hasarlar elyaf doğrultusunda büyümüş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Matris çatlamasının oluşmasıyla numunede ilk sızıntı terleme şeklinde oluşurken sonraki çevrimlerde damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boruda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması veya infilak şeklinde sonuç hasarları oluşmuştur. Hibrit kompozit boruların yorulma deneylerinde özellikle düşük gerilme değerlerinde oluşan ilk hasar; elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılması, numunenin dışında bulunan $\pm 45^\circ$ cam tabakasında görülmüştür. Serbest uçlu iç basınç deneyine tabi tutulan numuneler incelendiğinde, tüm boru boyunca elyafa paralel beyaz ince çizgiler (debonding) oluşmaktadır [18]. Debonding; 135,9 MPa en düşük gerilme değerinde 103.080 çevrimde elyaf-matris ara yüzeyinde, elyaf sarım açısı doğrultusunda süreksiz mikro çatlaklar şeklinde oluşmaya başlamıştır. İlerleyen çevrimlerde bu süreksiz mikro çatlaklar elyaf sarım açısı doğrultusunda birleşmiştir. Şekil 3.a'da görüldüğü gibi $\pm 45^\circ$ cam tabakasında bu çatlakların mikro boyutta oluştuğu ve ilerleyen çevrimlerde numuneyi sarım açısı doğrultusunda dolaştığı gözlemlendi. Gemi'nin de tespit ettiği gibi düşük gerilmelere tabi tutulan numunelerde, yorulmanın etkisi ile ilerleyen çevrimlerde elyaf doğrultusunda yeni mikro çatlaklar oluşmuştur. 181.260 çevrimde yine Şekil 3.a'da görüldüğü gibi matris yüzeyinde Ellyin ve Martens'in gözlemlendiği gibi, numune eksenine paralel 8-10 adet 1-3 cm boyunda matris yüzey çatlakların oluştuğu gözlemlendi [1]. Yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlak uzunluklarının sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra daha fazla ilerlemediğini Reisfinder'de rapor etmiştir [12]. Elyaf doğrultusunda ve eksenel yönde oluşan çatlakların kesişim bölgelerinde numunenin iç yüzeyinden dışa doğru noktasal iğne deliği şeklinde beyaz lekelerin oluşumu gözlemlendi. İlerleyen çevrimlerde bu beyaz lekeler, numune üzerinde diğer kesişim bölgelerine de yayıldı. Bu lekelerin her çevrimde, basınçlı akışkanın etkisi ile açılıp kapandığı gözlemlendi [17-18].



Şekil 3. Hibrit boru numunelerinde %30 $\sigma_{HS}=135,9$ MPa gerilme değerlerinde a) $N=181.260$ çevrimde yorulma esnasında oluşan elyafa paralel debonding ve eksenel doğrultuda matris çatlakları b) $N=360.000$ çevrimde yorulma esnasında oluşan sızıntının damlacık şeklinde görünüşü c) $N=444.200$ çevrimde yorulma esnasında oluşan yoğun sızıntının sonuç hasarı görünüşü

135,9 MPa endüyük gerilme değeriinde 264.930 çevrimde eksenel matris çatlağı ve elyaf bandı içinde debonding'in yoğun olduğu bölgede yorulmanın etkisi ile terleme şeklinde sızıntının gerçekleştiğı görüldü. Terlemenin etkisi ile boru yüzeyinin ıslandığı gözlendi. Wang ve ark. boruların sızıntı hasar başlangıcının yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir [19]. Şekil 3.b'de görüldüğü gibi 360.000 çevrimde terlemenin oluştuğı bölgelerde sızıntının arttığı ve sızıntı hasarının damlacık şeklinde oluştuğı gözlendi. Damlacık şeklinde oluşan sızıntı ilerleyen çevrimlerde yorulmanın da etkisi ile su jeti oluşumuna kadar artış göstermekte ve her yüklemde rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. 441.521 çevrimde yoğunlaşan damlacık şeklindeki sızıntı hasarı su jeti şeklini almıştır. Su jeti hasarı tekli olarak başlamış ve ilerleyen çevrimlerde çoklu yoğun su jetine dönüşmüştür. Çok kısa çevrim sonrasında yoğun sızıntının da etkisiyle bölgesel tabaka ayrılması oluşmuş ve basınçlı sıvı çevrime girememiştir. Şekil 3.c'de görüldüğü gibi yoğun sızıntı ve tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur. Rotem'e göre, tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır [10]. 135,9 MPa düşük gerilme değeriinde gözlemlenen hasar aşamaları 226,5 MPa yüksek gerilme değeriinde çok kısa çevrim aralığında gerçekleşmiştir. Elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılması (debonding), 226,5 MPa yüksek gerilme değeriinde çok az süresiz mikro matris çatlağı şeklinde görülmüştür. Numune eksenine paralel 2-4 adet 0,5-1 cm boyunda az sayıda matris yüzey çatlakların oluştuğı gözlendi. Terleme ve damlacık şeklinde sızıntı hasarı gözlenmeksizin su jeti hasarı oluşmuştur. Su jeti kısa bir çevrim sonra numunenin farklı bölgelerinde de gerçekleşmiştir. Su jeti oluşumundan çok kısa süre sonra yüksek iç basıncın etkisi ile numunede yoğun tabaka ayrılması ve yoğun su jeti şeklinde sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Şekil 4'te hibrit boruların yorulma deneyi sonrası dış ve iç yüzeylerinde oluşan sonuç hasarlarına ait fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; uygulanan düşük gerilme değeriinden yüksek gerilmelere doğru bakıldığında numunelerde oluşan hasarların arttığı görülmektedir. 249,2 MPa en yüksek gerilme değeriinde numunede şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur. Diğer gerilme değeriinde Gemi'nin de rapor ettiği gibi, yoğun su jeti sonrasında numunede patlama olmaksızın oluşan hasar bölgesel tabaka ayrılması ve yarıma şeklinde görüldü. Numunelerin boyunda ve çapında belirgin bir deformasyon görülmemektedir.



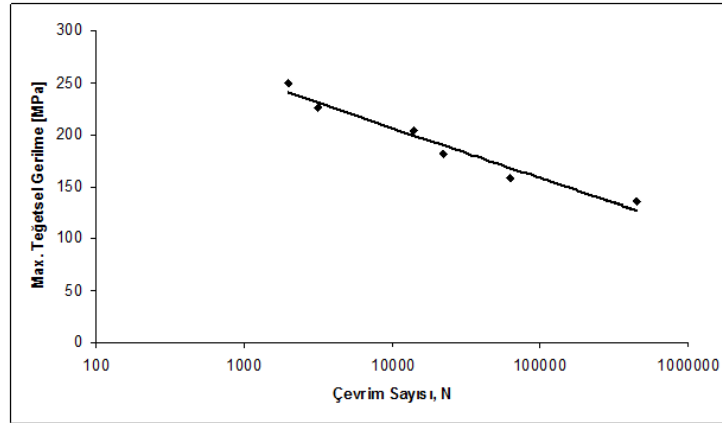
Şekil 4. Hibrit kompozit boru numunelerinin farklı gerilme değerlerinde yorulma sonrası hasarın a) dış yüzey ve b) iç yüzey genel görünüşü

Tablo 2’de darbe hasarsız numunelerle yapılan deneylere ait ortalama yorulma deneyi sonuç hasar çevrimleri verilmiştir. Tablo 2’de yorulma çevrim sayıları incelendiğinde; 225,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numunelerde 203,9 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numune ile kıyaslandığında yorulma ömründe ani bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Bu gerilme değerlerine ait hasar fotoğraflara bakıldığında 225,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde hasarın elyaf kopması şeklinde tahribatlı olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Hibrit kompozit boruların ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı

Test no	% gerilme $\sigma_{HS}=453$ (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135,9	6,8	444200
2	35	158,5	7,9	62327
3	40	181,2	9	21883
4	45	203,9	10,2	13878
5	50	226,5	11,3	3184
6	55	249,2	12,5	1971

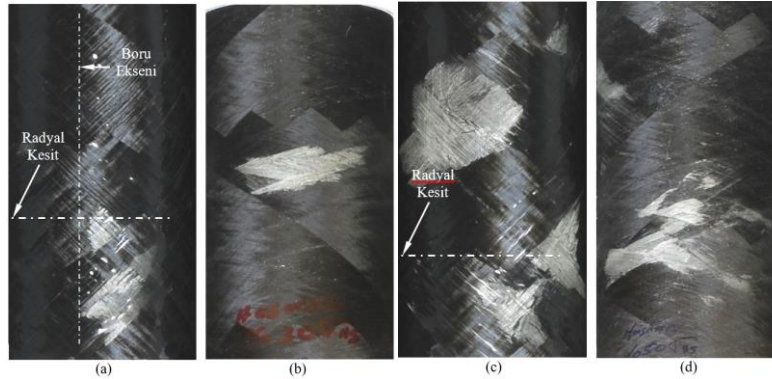
Şekil 5’de hibrit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi gerilme değeri düşükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmektedir.



Şekil 5. Hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

3.2. Makro/mikro hasar analizi

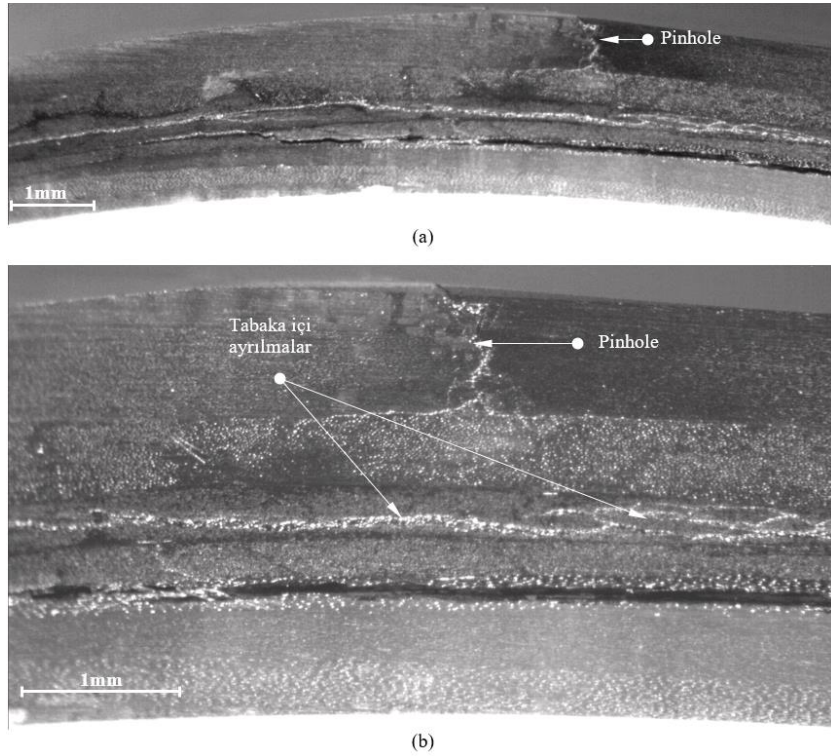
Hibrit kompozit boru numunelerinde yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro ve mikro yapılarında incelemesi yapılmıştır. Mikro hasar incelemeleri, $30\sigma_{HS}$ ve $50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde yorulma hasarına uğrayan deney numuneleri esas alınarak yapılmıştır. Numunelerin makro hasar fotoğrafları Şekil 6' da görüldüğü gibi birebir aynı ölçekte aynı bölgeden alınmıştır. Mikro yapılarını inceleyebilmek için daha önce belirtilen makro hasar numuneleri kullanılmıştır. Numuneler hasarın yoğun olduğu bölgeden radyal yönde kesilmiştir. Numuneler makro ve mikro hasar incelemeleri için hazırlanırken hasar bölgesinde ilave hasar oluşturulmamıştır.



Şekil 6. Hibrit kompozit boru numunelerinin (a-b) $30\sigma_{HS}$ ve (c-d) $50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde yorulma sonrası dış ve iç görünüşü

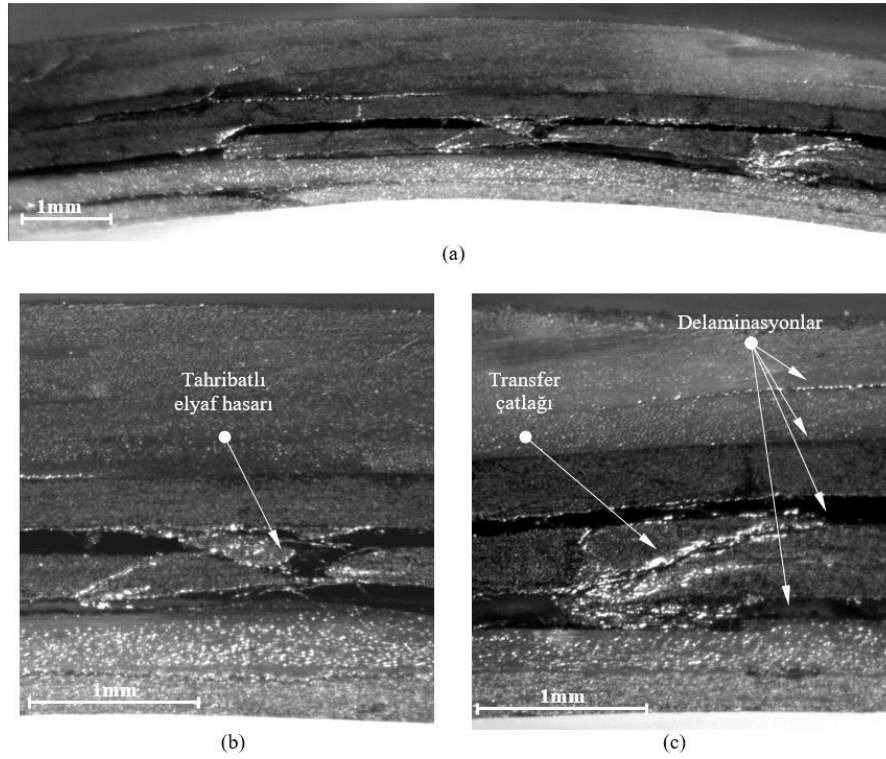
$30\sigma_{HS}$ gerilme değerinde; Şekil 7'de 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde yorulma sonrası oluşan tabaka ayrılmaları, tabakalar içinde oluşan radyal matris çatlakları ve yüzey matris çatlakları çok rahat gözlemlenebilmektedir. Makro hasar incelemelerinde yorulma esnasında elyaf doğrultusunda ve eksenel yönde oluşan çatlakların kesişim bölgelerinde numunenin iç yüzeyinden dışa doğru noktasal iğne deliği (pinhole) şeklinde beyaz lekelerin oluşumu tesbit edilmiştir. Şekil 7.a.b'de görüldüğü gibi pinhole yüzeye ulaşmış ve sızıntı hasarına yol açmıştır. Jones ve Hull tarafından yapılan mikroskobik analizde elyafa paralel

çatlakların katlar arasında elyaf kesişme noktalarında birkaç μm çapında bir sızıntı yoluyla oluşturduklarını açıklamışlardır [20].



Şekil 7. Hibrit kompozit boru numunesinin $30\sigma_{HS}$, 135,9 MPa gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

$50\sigma_{HS}$ gerilme değerinde; Şekil 8'de 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde 3184 gibi düşük çevrimde oluşan radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde yorulma sonrası tabaka ayrılmaları, tabakalar içinde oluşan radyal matris çatlakları ve yüksek gerilme değerinden dolayı karbon tabakasında oluşan elyaf hasarları rahat görülebilmektedir. Bu gerilme değerinde sonuç hasarını karbon tabakası belirlemiştir. Cam tabakalarında tabaka ayrılması şeklinde hasar görünürken, karbon tabakası gerilme yükünün büyük bir kısmını taşıdığından birçok yerden ani elyaf kopması şeklinde sonuç hasarına uğramıştır. Karbon tabakası hasar görmesine rağmen $\pm 45^\circ$ cam tabakasının sarım açısından ve kullanılan elyafın düşük modüllü olmasından dolayı numune bütünlüğünü korumuştur. Mikro yapı resimlerinden Şekil 8.a'dan da anlaşıldığı gibi $+55^\circ$ karbon tabakasında yorulma sonuç hasarı daha fazla oluşmuştur.



Şekil 8. Hibrit kompozit boru numunesinin $50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

4. Sonuçlar

Hibrit kompozit boruların yorulma deneylerinde özellikle düşük gerilme değerlerinde oluşan ilk hasar; elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılmasıdır. Beyazlama şeklinde gerçekleşen bu hasarlar elyaf doğrultusunda büyümüş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Matris çatlamasının oluşmasıyla numunede ilk sızıntı terleme şeklinde oluşurken sonraki çevrimlerde damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boruda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması veya infilak şeklinde sonuç hasarları oluşmuştur.

References

- [1] Ellyin F, Martens M. Biaxial fatigue behaviour of multidirectional filament wound glass-fiber epoxy pipe. *Composites Science and Technology*, 2001; 61: 491-502.
- [2] Kaynak C, Mat O. Uniaxial fatigue behaviour of filament wound glass-fiber epoxy composite tubes. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 1833-1840.
- [3] Rebiere, J.L., Maatallah, M.N., Gamby, D., 2001, Initiation and growth of longitudinal and transverse cracks in composite cross ply laminates, *Composite Structures*, 53:173-187.
- [4] Bredemo, R., 1992, Damage development during uniaxial fatigue of filament wound tubes,

SICOMP Report 92-001. Pitea (Sweden), Swedish Institute of Composites.

- [5] Conder, R.L., Newhouse, N.L., 1980, Cyclic pressure test of a filament wound vessel containing liquid nitrogen, *Cryogenics*, December, 697-701.
- [6] Ferry, L., Perreux, D., Rousseau, J., Richard, F., 1998, Interaction between plasticity and damage in the behaviour of $[+\Phi, -\Phi]_n$ fibre reinforced composite pipes in biaxial loading (internal pressure and tension), *Composites Part B*, 29B:715-723.
- [7] Hwang, W., Han, K.S., 1986, Fatigue of composite material- damage model and life prediction, Composite material Fatigue and fracture, 2nd. Volume ASTM STP 1012, Paul A.Lagace (Vol.Ed.) *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 87-102.
- [8] Martens, M.G., 1999, Biaxial monotonic and fatigue behaviour of a multidirectional glass fibre reinforced epoxy pipe, Ph. D. *Thesis University of Alberta*, 279p
- [9] Hashin, Z., Rotem, A., 1973, A fatigue criterion for fiber reinforced materials, *Journal of Composite Materials*, 7: 448-464.
- [10] Rotem, A., 1979, A fatigue failure of multidirectional laminate, *AIAA J.*, 7(3):271-7.
- [11] Perreux, D., Joseph, D., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial fatigue experimental results and damage model, *Composites Science and Technology*, 57:353-364.
- [12] Reisfinder, K.L., 1977, Some fundamental aspects of the fatigue and fracture response of composite materials, In: Proceeding of 30th annual society of engineering meeting, 14-6, *Lehigh University Bethlehem PA*.
- [13] Vanpaepegem, W., Degrieck, J., 2001, Fatigue degradation modelling of plane woven glass/epoxy composites, *Composites Part A*, 32:1433-1441.
- [14] Sarı, M., Karakuzu, R., Deniz, M.E., Icten, B.M., 2012, Residual failure pressures and fatigue life of filament-wound composite pipes subjected to lateral impact, *Journal of Composite Materials*, 46 (15): 1787-1794
- [15] Rousseau, J., Perreux, D., Verdiere, N., 1997, Motifs d'enroulements et endommagement dans les tubes composites verre/époxy, *Mécanique Indus Matér* 50(3).
- [16] Deniz, M.E., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R., Icten, B.M., 2013, Environmental effect on fatigue life of glass-epoxy composite pipes subjected to impact loading, *Composites Part B*, 44: 304-312.
- [17] Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Sahin, O.S., 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy ($\pm 75^\circ$)₂ filament-wound pipes under pure internal pressure, *Materials and Design*, 30: 4293-4298.
- [18] Gemi, L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 88s.
- [19] Wang, S.S., Srinivasan, S., Cole, B., 1997, Long term leakage failure and life prediction fiber composite laminate tubing under combined internal pressure and axial loading, *Theory and Experiments 2.nd International Conference on Comp. Materials for Offshore Operations CMOO-2*, University of Houston, Houston TX
- [20] Jones, M.L.C., Hull, D., 1979, Microscopy of failure mechanisms in filament wound pipe, *J. Material Science*, 14:165-174.