

3-BOYUTLU DOKUMA KARBON-EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA DAVRANIŞI

FATIGUE BEHAVIOR OF CARBON/EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH 3-DIMENSIONAL WOVEN FABRIC

Mehmet KARAHAN^{1*}, Stepan V. LOMOV², Alexander E. BOGDANOVICH³, Ignaas VERPOEST²

¹Teknik Bilimler M.Y.O., Uludağ Üniversitesi, 16059, Bursa
mkarahan@uludag.edu.tr

²Department of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium
stepan.lomov@mtm.kuleuven.be

³North Carolina State University Textile Engineering, Chemistry, and Science, USA
aebogdanovich@ncsu.edu

Geliş Tarihi/Received: 19.02.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 27.02.2013

doi: 10.5505/pajes.2013.87587

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Özet

Bu çalışmada üç boyutlu kıvrımsız dokuma karbon-epoksi kompozitlerin dinamik çekme yüklemesi altında yorulma özellikleri tespit edilmiştir. Atkı doğrultusundan alınmış numuneler için sonsuz yorulma yük seviyesi 27.5 kN olarak tespit edilmiştir. Yorulma yüklemesi altında kompozit malzeme içinde hasarın z-ipliklerinin atkı iplikleri ile kesiştikleri kısımlarda başladığı ve buradan yayıldığı anlaşılmıştır. Üç boyutlu dokuma yapıda z-iplikleri iplik katmanlarını bir arada tuttuğu için, klasik iki boyutlu kompozitlerde meydana gelen delaminasyon hasarları meydana gelmemiştir. Bu durum kompozit malzeme modülü ve yük taşıma kapasitesinin iki boyutlu klasik kompozitlere göre daha üstün ve sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: 3-boyutlu dokuma, Yorulma ömrü, Hasar.

Abstract

This paper reports results of study of fatigue behavior of a non-crimp 3-dimensional woven carbon/epoxy composite in tension-tension fatigue. Infinite fatigue life limit corresponds to the load of 27.5 kN for fill direction. The damage under fatigue loading starts and develops from intersection of z-yarns and fill yarns. Since the z-yarns bonded the yarn layers, it is not seen the delamination damages. This indicate that for load carrying capacity and stiffness of 3-dimensional composites better than classic 2-dimensional textile composites.

Keywords: 3-dimensional weaving, Fatigue life, Damage.

1 Giriş

Lif takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışı son derece kompleks bir konudur ve bu konu üzerinde çok sayıda araştırma yapılmaktadır [1]. Yorulma yüklemesi sırasında meydana gelen hasarların kademeli olarak yayılması mukavemet ve modülün düşmesine neden olmaktadır ve malzeme ömrünü etkilemektedirler [2]. Kompozit malzemelerin yorulma davranışının araştırılması konusunda çeşitli çalışmalar [3]-[4]. Eksenel yüklemeye altında malzemenin modülündeki düşüşü belirli devir sayılarındaki çatlakların miktarındaki artış ile ispatlamışlardır. Kompozit malzemelerin yorulma hasarları matriks çatlakları, lif-matriks arabirim ayrılması veya delaminasyonu, lif kırıkları olarak genellenebilir. Bununla birlikte, kompozit malzemelerde kesin olarak hasar mekanizmasını tespit etmek mümkün değildir, çünkü gerilim seviyesine bağlı olarak hasar mekanizması da değişmektedir. Meydana gelen hasarın şekli ise gerilim seviyesi ve yüklemeye sayısına bağlı olarak değişmektedir [1]. Yorulma ömrü diyagramı (S-N eğrisi), lif takviyeli kompozit malzemelerin hasar özelliği hakkında bazı bilgiler verebilir. Bu diyagram ile kompozit malzemede hasarın yayılması giderek artan aşamalar ile üç aşamaya bölünmüştür ve bu aşamalar yorulma ömrünü de ifade etmektedir [5].

3 boyutlu dokuma (3BD) kompozit malzemelerin yorulma davranışları ile ilgili literatürde çok az veri mevcuttur. Mevcut veriler veya çalışmalar, ipliklerin birbirleri ile kıvrımlı olarak bağlantı yaptıkları "interlok" 3BD kompozitler üzerine

olmuştur. Bu çalışmalardan birisinde [6]. 3BD kompozitlerin kalınlık doğrultusundaki bağlantı ipliğinin (z- ipliği) lif hacimsel oranındaki değişimin etkisini değerlendirmiştir. Araştırmacılar yorulma ömrü bakımından 2-boyutlu dokuma (2BD) kompozitlere göre farklı oranlarda z-ipliğine sahip interlok 3BD dokuma kompozitlerin önemli derecede kötü olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte aynı araştırmacıların da belirttiği gibi, bu bulguları diğer 3BD yapılar için genellemek mümkün değildir. 3BD yapıların çok fazla tipi olması ve bu tiplerde konstrüksiyon, lif yerleşimi, lif kıvrımları, lif hacimsel oranı gibi kompozit özelliklerini direk olarak etkileyen parametrelerin farklı olması, bu tür genellemeleri diğer 3BD yapılar için de yapmaya engeldir [6]. Yorulma yüklemesi sırasında dokuma kompozitlerin hasar yayılması konusundaki veriler oldukça azdır, araştırmacılar [7]-[8]. Dokuma kumaş kompozitlerin yorulma davranışını, tek yönlü lif takviyeli (UD) kompozit yapılara oldukça benzer bulmuşlardır: önce lif ekseninden farklı doğrultularda (enine) matriks çatlakları meydana gelmektedir, bu çatlaklar birbirlerine bitişik olan lif demetleri arasında lokal ayrılmaların başlatıcısı olarak düşünülebilir. Yapıdaki iplik bağlantılarındaki kıvrımlar, bu tür delaminasyonların meydana gelmesini daha da çabuklaştırır ve bu nedenle 2BD yapıların modülü UD yapılara nazaran daha hızlı düşecektir. Daha da genellemek gerekirse, yorulma yüklemesi altındaki hasar değerlendirmesi statik çekme testindeki hasar değerlendirmesine benzerlik göstermektedir [9]. Hasarın meydana gelmesinde, uygulanan gerilim veya yük artışı,

yorulma yüklemesi sırasında devir sayısının artışı ile benzerlik göstermektedir.

Çözgü ve atkı ipliklerinin tamamen kıvrımsız olarak bir araya geldiği ve kalınlık doğrultusunda z-ipliği ile bağlandığı kıvrımsız 3BD yapılar, yukarıda belirtilen kıvrımlı dokuma konstrüksiyonların dezavantajlarına çok önemli çözümler sunmuştur [10]-[11]. Bu yapılar ile belirli kalınlıktaki kompozit malzemeler tek katlı olarak üretilebilmektedir ve üst düzey bir delaminasyon direnci sağlanmaktadır. Bu tür malzemelerin genellikle havacılık ve uçak endüstrisinde kullanılmaları, onların mekanik özelliklerinin ve yorulma davranışlarının tam olarak belirlenmesini daha da önemli bir

hale getirmektedir. Bu çalışmada ortogonal kıvrımsız 3BD dokuma karbon-epoksi kompozitlerin çekme yüklemesi altındaki yorulma davranışı, yorulma sırasındaki hasar yayılma özelliği ve sonsuz ömür gerilim seviyesi atkı doğrultusunda (90°) tespit edilmiştir.

2 Materyal ve Metod

2.1 Materyal

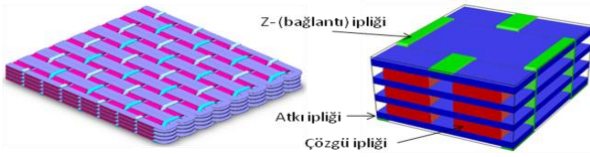
Çalışmada kullanılan ortogonal 3BD karbon kompozitlerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Kıvrımsız ortogonal 3BD yapının ve kompozit yapının parametreleri.

Dokuma yapısı	3B ortogonal (Şekil 1)	Gramaj, g/m ²	2499
Çözgü iplikleri	Toho Tenax 12K, 800* tex	Çözgü sıklığı (tel/inç)	12*
Atkı iplikleri	Toho Tenax 2x6K, 800* tex	Atkı sıklığı (tel/inç)	10*
Z iplikleri	Toho Tenax 1K, 66* tex	Lif çapı, µm	7*
Kompozit plaka kalınlığı	2.70 mm	Lif hacimsel oranı	52.2%

*Üretici firma teknik verileri.

3BD Kompozit malzemeler 1 bar basınç altında vakum infüzyon metodu ile üretilmişlerdir. Reçine olarak West System 105 epoksi ve 209 Extra Slow sertleştirici kullanılmıştır. Katılaşma oda sıcaklığında yapılmıştır. Plaka kalınlığı 2.64...2.75 mm arasında değişmektedir ve lif hacimsel oranı 52% civarındadır.



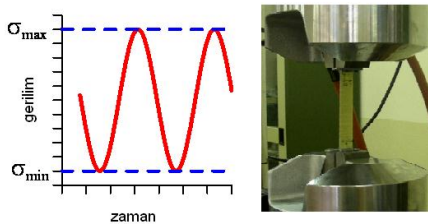
Şekil 1: 3-boyutlu ortogonal dokuma yapının şematik görünümü ve birim hücre yapısı.

2.2 Test Metodu

Kompozit malzemelerin yorulma yüklemelerine karşı olan davranışı periyodik çekme-çekme testi ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan yük veya gerilim seviyeleri statik çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre kararlaştırılmıştır [12]. Yorulma testlerinde araştırılan parametreler şunlardır:

- Gerilim veya yük seviyesine bağlı olarak yorulma ömrü (maksimum ve minimum gerilim veya yük seviyelerinde).
- Yorulma yüklemelerinde modüldeki değişim.
- Yorulma yüklemeleri altında hasar yayılma özelliği.

Testler sabit gerilim aralığında R=0.1 (minimum gerilimin maksimum gerilime oranı) kabul edilerek ASTM D3479-36 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yük sinüzoidal olarak uygulanmıştır (Şekil 2). Eğer numunenin dayanımı test sırasında azalıyor ise, gerilim artacaktır. Testler Schenk yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2: Yorulma testi sırasında yükün maksimum ve minimum gerilim aralığında sinüzoidal olarak uygulanışı.

Yüksek gerilim seviyeleri, o seviyede malzemenin kopuncaya kadar kaç devir yüklemeye dayandığını tespit etmek için kullanılmıştır; düşük gerilim seviyeleri ise sonsuz yorulma ömrü seviyelerini tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. Sonsuz yorulma ömrü 3 milyon devirde malzemenin kopmaması durumunda kullanılan bir tabirdir. Yorulma testleri 6 Hz frekansla yani saniyede 6 defa çekme yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonsuz yorulma ömrü gerilim seviyesi statik testlerde elde edilen ilk hasar başlama seviyesindeki gerilim değeridir. Eğer numune 3 milyon devirden önce kopuyor ise, gerilim seviyesi azaltılarak testler devam ettirilmiştir. Bu prosedür sonsuz yorulma ömrü gerilim seviyesi σ_{son} (veya yük seviyesi F_{son}) tespit edilinceye kadar devam ettirilmiştir.

Yorulma testleri 48 kN yükten başlayarak 40, 35, 30 ve 27.5 kN seviyelere kadar devam etmiştir. Testler sadece atkı doğrultularından kesilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler 24x250 mm ebatlarında kesilmişler ve test cihazı çenelerine tutturulan kısımlarına alüminyum end tab yapıştırılarak testlere hazır hale getirilmişlerdir. Her yük seviyesi için en az dört adet test yapılmıştır. Yorulma testlerinde ayrıca hasar yayılma özelliğinin araştırılması için 30 kN yük seviyesinde, 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 ve 1.000.000 devir yorulma testine tabi tutulan numuneler daha sonra x-ray ve kesit incelemeleri için kullanılmıştır.

3 Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Yorulma Test Sonuçları

3B karbon kompozit malzemelerin yorulma davranışı tek eksenli periyodik yükleme altında araştırılmıştır. Wöhler (S_N) eğrisi elde edilmiştir. Yorulma testleri sabit gerilim genliği altında sinüzoidal gerilim yüklemesi ile ve uygulanan maksimum ve minimum gerilimlerin oranı $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.1$ kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Testler 6 Hz frekans ile yani saniyede 6 defa yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sonsuz ömür σ_{son} gerilim seviyesi (veya F_{son} yük seviyesi) hasarın ciddi şekilde yayılmadığı ve numunenin kopmadığı gerilim seviyesini ifade etmektedir. Çalışmada numunenin 3 milyon devire kadar kopmadığı yükleme seviyesi sonsuz ömür olarak alınmıştır. Sonsuz ömür gerilim seviyesinin tespit edilmesi için testler 48 kN'dan başlayarak kademeli olarak

azaltılarak 40, 35, 30 ve 27.5 kN seviyelerinde devam ettirilmiştir.

Çekme yorulma testi için sonuçların bazı tipik bir örnekleri Şekil 3'de verilmiştir. Burada farklı yük seviyelerinde devir sayısına bağlı olarak yük-uzama eğrisinin eğimindeki değişim görülmektedir. Bu örnekler yüksek devir sayısında ve düşük yük altında (sinüzoidal yükleme $F_{max}=F_{son}=27.5$ kN, Şekil 3-a) ve düşük devir sayısında ve yüksek seviyede yük altında (sinüzoidal yükleme $F_{max}=48$ kN, Şekil 3-d) malzemenin yük-uzama eğrisindeki değişimi göstermekte ve malzemede hasar yayılmasına bağlı olarak eğrinin eğimi kademeli olarak düşmektedir. Şekil 3-a sonsuz ömür seviyesine kadar testin devam ettiği, Şekil 3-b, c ve d ise belirli bir devir sayısında kopmanın gerçekleştiği testlere örneklerdir. Şekil 4, farklı yük seviyelerinde devir sayısına bağlı olarak maksimum ve minimum uzama ve maksimum ve minimum yük değerlerindeki değişimi göstermektedir. Şekil 3-a, sonsuz ömür geriliminde yüklenmiş malzemenin davranışını göstermektedir ($F_{son}=27.5$ kN). Bu karakteristik yük seviyesinde başlangıç çatlakları nispeten daha hızlı yayılır ve yer değiştirme değeri (Şekil 4-a) önemli ölçüde artar ve $1 \cdot 10^4$ ve $1 \cdot 10^6$ devir sayıları arasında eğrinin eğimi azalır (Şekil 3a). Daha ileri devir sayılarında hasarın yayılması azalır, $1 \cdot 10^6$ ve $3 \cdot 10^6$ devir sayıları arasında eğrinin eğimindeki farklılaşma azalır, gerçekte belirli bir devir sayısından sonra eğri düz bir hale gelmektedir ve eğimi değişmemektedir. Hasarın değerlendirilmesinde değişik devir sayılarındaki x-ray gözlemleri çatlakların başlama ve gelişme süreci hakkında bilgi vermiştir.

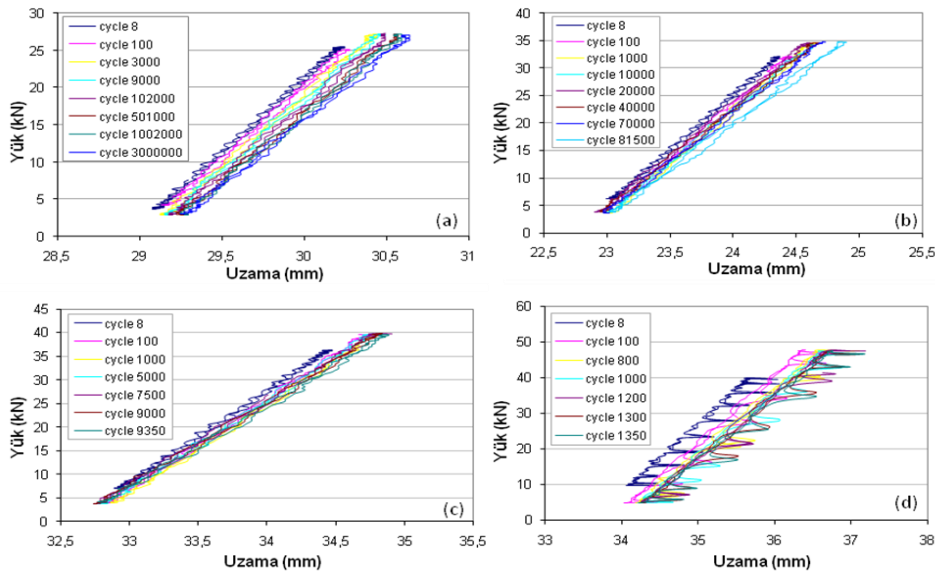
Şekil 3 ve 4'den anlaşıldığı gibi, malzemenin modülünde azalma olduğu açıktır. Sonsuz ömür yük seviyesinde bile malzemenin mekanik özelliklerinde ve modülünde azalma olacağı açıktır. Sonsuz yük seviyesinde yapılan testlerde bile önemli miktarda hasar meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak meydana gelen hasarın sadece matriks çatlakları olduğunu söyleyebiliriz. Bu gerilim seviyesi lif kopmalarının ve nihai kopmanın meydana gelmediği gerilim seviyesidir veya kopma hasarlarına neden olacak hasarların başlamadığı ve yayılmadığı yük seviyesidir.

Yüksek yük altında düşük devirli yorulma davranışı Şekil 3d'de verilmiştir. Devir sayısı arttıkça nihai kopma

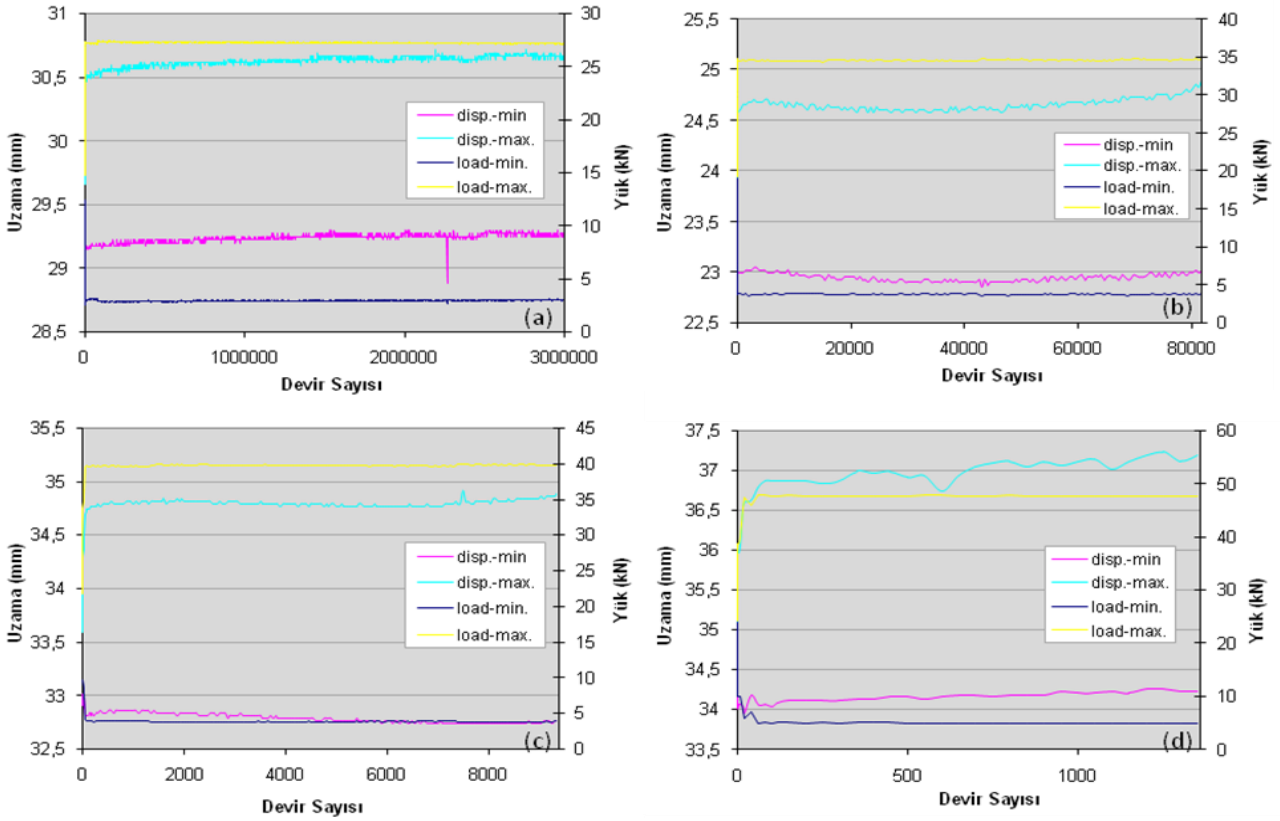
durumuna kadar eğimin arttığı görülmektedir. F_{son} yük seviyesinde yapılan testlerdeki sonuçlara bağlı olarak yük-yer değiştirme eğrisinin eğiminde azalmalar meydana gelmektedir. Daha yüksek yükleme seviyelerinde ise bu azalmalar meydana gelmemektedir. Özellikle kopmanın meydana geldiği devir sayısına yaklaştıkça, maksimum/minimum yer değiştirme önemli ölçüde artar, sonuçta hasar düzeyi artarak kopma meydana gelir. Ancak, bu durum 48 kN yük seviyesinde çok belirgin olarak görülmemiştir. Çünkü bu seviyede hasar yayılmaya fırsat bulamadan kopma gerçekleşmiştir. Ancak, 40 ve 35 kN yük seviyelerinde devir sayısına bağlı olarak uzamanın arttığı gözlenmiştir. Ayrıca yük-uzama (yer değiştirme) eğrilerinin eğimi kopma devir sayısına yaklaştıkça hızlı bir şekilde değişir. Bu bölge gerçekte yorulma testi sırasında tüketilen enerjiyi temsil etmektedir ve bu enerji ısı artışına, ses artışına ve hasar yayılmasına neden olur: daha büyük histeris bölgesi daha fazla miktarda enerjinin yayıldığını ve buna bağlı olarak daha fazla hasar oluşması anlamına gelir. Şekil 4-b ve c'deki grafiklere göre hasar yayılması kopma noktasına yaklaştıkça artmaktadır.

Yorulma davranışını karakterize eden önemli bir parametrede yük-uzama eğrisinin farklı devirlerde değişen eğimidir; farklı devir sayılarında eğrinin eğimindeki kayıplar, mekanik özelliklerdeki düşüşü göstermektedir. Hatta devir sayısı arttıkça elastik modülün azaldığını da göstermektedir. Bu eğriler test sırasında herhangi bir devir sayısında malzemenin gerilim ve gerinim değerlerini ifade edebilmektedir. Bununla birlikte yorulma testleri sırasında gerinim ölçülmesi mümkün değildir ve test cihazından alınan gerinim değerinin doğruluğu özellikle yüksek yük seviyelerinde düşüktür.

Bu nedenle yük-uzama eğrisindeki verilerden Young modülündeki azalma direkt olarak tespit edilemez. Bu nedenle yorulma testi sırasında malzeme özelliklerinin değerlendirilmesinde farklı devir sayılarındaki eğrinin eğimi direkt değil, oransal veya nispi bir sonuç verir. Yorulma testi sonrasında yorulma öncesi ve sonrası statik çekme testi sonuçlarına bağlı olarak, farklı devir sayılarında eğrilerin eğimlerinin kaba bir kıyaslaması elastik modüldeki değişimi ifade edebilir.



Şekil 3: Farklı yükleme seviyelerinde (a: 27.5 kN; b: 35 kN; c: 40 kN ve d: 48 kN) atkı doğrultusunda gerçekleştirilen yorulma testinde devir sayısına bağlı olarak yük-uzama eğrisinin eğimindeki değişim.



Şekil 4: Farklı yükleme seviyelerinde (a: 27.5 kN; b: 35 kN; c: 40 kN ve d: 48 kN) atkı doğrultusunda gerçekleştirilen yorulma testinde devir sayısına bağlı olarak yük-uzama eğrisinin eğimindeki değişim ve maksimum ve minimum uzama değerlerindeki değişim.

Şekil 3'e göre, eğimdeki en fazla değişimin 35 ve 40 kN yük seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, bu yük seviyelerinde hasarın iyice yayılıp daha sonra kopmanın gerçekleştiğini ifade etmektedir. Ancak düşük yükleme seviyelerinde eğrinin eğimindeki azalma son derece sınırlıdır, bu da modülün çok fazla düşmediğini ve malzemenin yük taşıma kapasitesinin hala devam ettiğini göstermektedir.

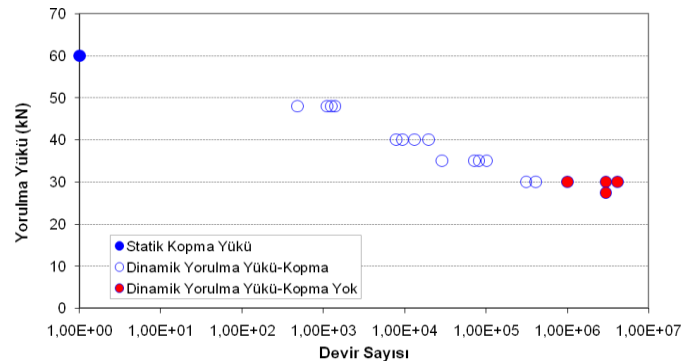
3.2 S-N Eğrisi ve Sonsuz Ömür Yük Seviyesi

Wöhler (S-N) eğrisini elde etmek için ve sonsuz ömür gerilim seviyesini tanımlamak için, deneysel çalışma farklı gerilim seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu değerler 3BD kompozit malzemede atkı doğrultusu için statik testlerden elde edilen [12], ilk hasar başlama yük seviyeleri (F_1) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (20-22 kN). Yorulma testlerinde ise, yük seviyeleri statik testlerde elde edilen ilk hasar başlama yük seviyesinin üzerindeki seviyelerde başlayarak test edilmeye başlanmıştır, bununla birlikte her iki doğrultuda da numuneler sonsuz ömür seviyesi olan 3.10^6 devir sayısına ulaşmadan kopmuştur. Sonsuz ömür gerilim seviyesi F_1 yük seviyesinin altında olduğu halde gözlemlenebilir hasarlar meydana gelmektedir. Sonuçta, maksimum gerilimden başlayarak sonsuz ömür gerilim seviyesi elde edilinceye kadar yük azaltılarak test devam ettirilmiştir, 3 milyon devir sonunda eğer kopma meydana gelmiyorsa sonsuz ömür seviyesine ulaşılmış olunur. Bu devir sayısı numunenin bundan sonra kopmayacağı anlamına gelmektedir.

3BD kompozit malzeme için atkı doğrultusu için Wöhler eğrisi Şekil 5'de verilmiştir; kopmanın meydana geldiği devir sayısı logaritmik eğri ile gösterilmiştir.

Wöhler eğrisinde, statik kopma yükü, çekme testlerinde atkı doğrultusundaki kopma yükünü ifade etmektedir [12].

Yorulma yük seviyesi değerleri, belirli yük seviyelerinde kopmanın gerçekleştiği devir sayılarını göstermektedir. Kopmanın olmadığı yük seviyeleri ise, sonsuz ömür yük seviyesinin bulunmasında kullanılmıştır. Buna göre 30 kN yük altındaki testlerde 3 milyon devirde kopma gerçekleşmemiş ancak bazı numunelerde kopmalar gerçekleşmiştir. Bu, 30 kN yük seviyesinin sonsuz ömür için bir sınır seviyesi olduğu anlamına gelmektedir ve 30 kN'un hemen altındaki yük seviyeleri, sonsuz ömür seviyesi olarak kabul edilebilir. Nitekim 27.5 kN yük seviyesinde herhangi bir kopma veya ciddi hasar meydana gelmemesi, bunu göstermektedir. Hatta sonsuz yük seviyesinin 27.5 kN dan biraz daha fazla olacağı düşünülebilir.



Şekil 5: Atkı doğrultusu için farklı yüklerdeki devir sayısına bağlı olarak elde edilmiş logaritmik S-N eğrisi.

3.3 Yorulma Yüklemesi Altında Hasar Yayılmasının Araştırılması

Hasar yayılmanın gözlemlenmesi 30 kN yük altında çeşitli devir sayılarında test edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hasarın nasıl başladığının ve yayıldığının iyi bir şekilde karakterize edilmesi için, 30 kN yük altında 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 ve 1.000.000 devir test edilen (kopmamış) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hasarın gözlemlenmesi için test edilen numuneler üzerinden yüksek çözünürlüklü kamera ile yüzeysel görüntüleri alınmıştır. Yüzeysel görüntülerde, yüzeysel matriks çatlakları ve lif kopmaları gözlemlenebilmektedir. İç yapı çatlaklarının detaylı ve daha kesin bir şekilde gözlemlenmesi için aynı numuneler üzerinde x-ray ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece çatlakların nerelerde başladığı ve ne şekilde yayıldığı kesin bir şekilde gözlenmiştir. X-ray gözlemlerinin yapı içerisinde ne şekilde başlayıp yayıldığının tespit edilmesi için aynı numuneler üzerinde 10.000, 100.000 ve 1.000.000 devir test edilmiş numunelerin kesitlerinde mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

30 kN yük altında farklı devir sayılarında gerçekleştirilen testler sonrası numune yüzeylerinden alınan görüntüler Şekil 6'da verilmiştir. Yüzey görüntüleri numunelerin orta kısmından alınmıştır. Testlerde kullanılan çekme yükleme doğrultusu şekillerin sol tarafında gösterilen oklar ile belirtilmiştir. Atkı doğrultusundaki numunelerin görüntüleri incelendiğinde, 10.000 ve 50.000 devire kadar olan testlerde yüzeyde görünür bir hasar gözlenmemiştir. Sadece en dış kenarlardaki z-ipliklerinin etrafında küçük çatlaklar olduğu görülmektedir. Ancak bu tür hasarlar numunenin orta kısımlarında kesinlikle gözlenmemiştir. Kenarlarda meydana gelmiş bu tür bir hasarın, kompozit numuneler kesilirken, kenardaki ipliklerin tesadüfen orta kısımlarından kesilmiş olmasından kaynaklanmaktadır, bazı numunelerde kenarlarında bu tür bir problem meydana gelmemiştir ve bu durum gerçekte yorulma özelliklerini etkilememektedir. Devir sayısı arttıkça kenarlarda başlayan bu tür hasarlar artmış ve kenar ipliklerinin açığa çıkmasına neden olmuştur. 500.000 devirden sonra bu durum açıkça görülmektedir ancak bu durum sadece kenar ipliklerinde kalmıştır. Kesinlikle içeri doğru yayılmamıştır. Bir milyon devir sonunda ise, numune üzerinde lokal delaminasyon ve lif kopması olabileceği düşünülen hasarlar meydana gelmiştir. Bu durum tüm numunelerde meydana gelmemekle birlikte hemen hemen test edilen numunelerin yarısında gözlenmiştir. Bir milyon devir sonunda kopma meydana gelmemekle birlikte bu tür bir hasarın meydana gelmesi, hasarın numunede iyice yayıldığını ifade etmektedir.

Kopmanın gerçekleştiği yük seviyelerinde test edilmiş numunelerden alınan görüntü Şekil 6-d'de verilmiştir. Buna göre atkı doğrultusunda test edilen numunelerde, yük seviyesi arttıkça numune yüzeyinde meydana gelen görünür hasarların azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni bu numunelerdeki temel hasar tipinin lif kopmaları olmasıdır ve bu nedenle bu yapılar matriks hasarları yayılmadan daha erken kopmaktadırlar. Bununla birlikte, atkı iplikleri arasındaki reçine zengin bölgelerde matriksin kalıcı deformasyonu yük seviyesi artsa da meydana gelmektedir.

Karbon-epoksi numunelerin şeffaf olmaması nedeniyle sadece yüzeysel hasarların çok belirgin olanları görülebilmektedir. İç yapı hasarları ve hasarların nerelerde başlayıp ne şekilde yayıldığının gözlenmesi için x-ray çekimleri yapılmıştır. Mikro yapıda hasarın tam olarak yerinin tespiti için ise x-ray

gözlemlerinden sonra numunelerden alınan kesitlerin incelenmesi ile tespit edilmiştir.

X-ray incelemeleri için 30 kN yük altında 10.000, 50.000, 100.000, 500.000 ve 1.000.000 devir sonrasında kopmamış numuneler kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir.

10.000 devir sonrasında atkı doğrultusunda yapılan testlerde yüzeyden alınmış x-ray resmine göre, çatlakların z-ipliklerinin tepe kısımlarında başlayıp çekme doğrultusuna göre enine doğrultuda yayıldığı görülmektedir. Çatlakların tüm z-ipliklerinde meydana gelmedikleri ve henüz numunenin eni boyunca tamamen yayılmadıkları görülmektedir. Kesit görüntüleri incelendiğinde, çatlakların yüzeydeki z-ipliklerinin tepe kısımlarında başlayıp daha sonra numune iç kısmına doğru ilerlemeye başladığı görülmektedir (kesit görüntülerinde sağ kısımdaki çatlaklar). Ancak henüz çatlakların numunenin orta kısmına kadar gelmedikleri de görülmektedir. Numunenin diğer kısmında ise meydana gelen çatlakların daha az olduğu görülmektedir. Enine kesitte gözlenen çatlakların önce enine daha sonra bir miktar boyuna olduğu görülmektedir. Bu durum çatlakların atkı ipliği boyunca yayılırken yön değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum enine kesit mikro yapı incelemelerinde net olarak ortaya konmuştur.

Mikro yapı incelemelerine göre, 10.000 devir sonrasında atkı doğrultusunda meydana gelen hasarların ve çatlakların yerleri, z-ipliğinin atkı iplikleri ile kesişim yerlerinin etrafıdır (Şekil 8). Çatlakların özelliği z-iplikleri ve atkı iplikleri arasındaki reçine zengin bölgelerde olması dikkat çekicidir. Yapılan incelemelerde hemen hemen tüm mikro fotoğraflarda aynı çatlak ve hasar tipinin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte atkı iplikleri içinde enine doğrultuda çatlakların başlayıp boyuna doğrultuda da yayıldığı tespit edilmiştir.

50.000 devir sonunda enine yönde çatlakların daha da arttığı ve yoğunlaştığı görülmektedir. Enine kesitten alınan görüntü incelendiğinde de çatlakların yoğunluğunun arttığı rahatlıkla görülmektedir. Çatlakların numune eni boyunca yayıldıkları görülmektedir ve sadece z-ipliğinin tepesinde başlayan çatlakların yayıldığı görülmektedir. Enine kesit görüntüsü incelendiğinde, çatlakların numunenin her yerine yayıldığı görülmektedir.

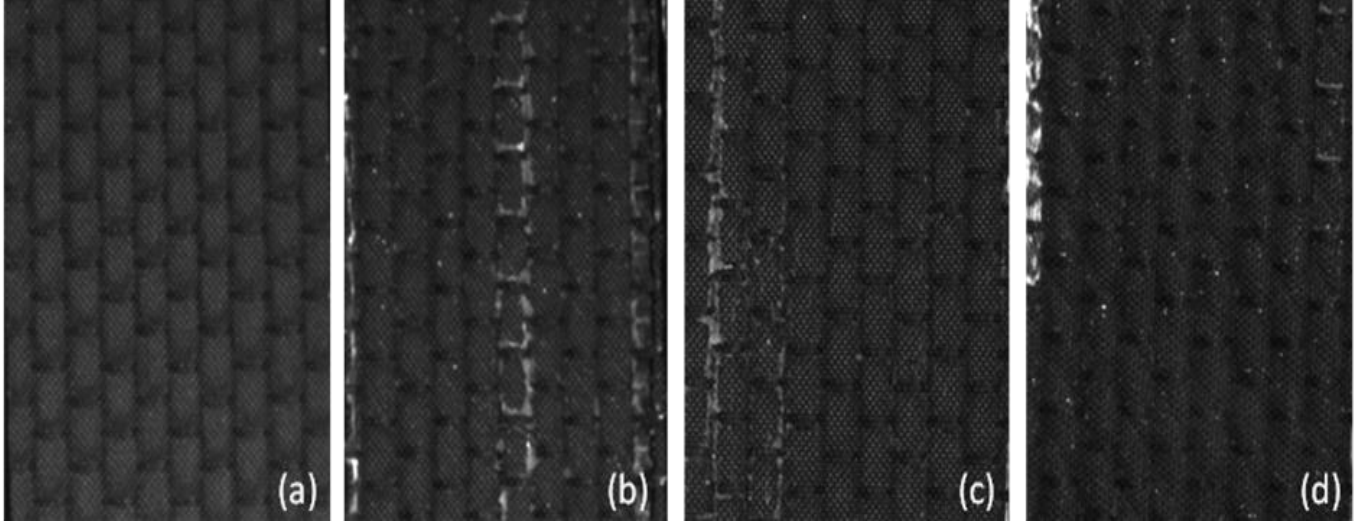
100.000 devir sonrasında enine çatlakların numunenin tamamına yayıldığı görülmektedir. z-ipliklerinin tepe kısmında başlamış çatlakların 100.000 devir sonrasında numunenin eni boyunca tamamen yayıldıkları ve belirginleştikleri görülmektedir. Z-ipliğinin etrafında birbirine yakın çatlakların olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra 2 z-ipliği arasında yeni küçük çatlakların başladığı da görülmektedir. Bu küçük çatlakların büyüklükleri birbirinden farklı olmakla birlikte numunenin eni boyunca tamamen yayılmış olanları da vardır. Bu durumda rahatlıkla şöyle bir sonuca varabiliriz: çatlaklar z-ipliklerinin tepe noktalarında başlamaktadırlar. Önce küçük enine çatlaklar şeklindedirler. Daha sonra yayılarak numunenin eni boyunca büyümekte ve derinleşmektedirler. Bir çatlak numunenin eni boyunca tamamen yayılınca hemen yanında farklı bir küçük çatlak başlamakta ve aynı şekilde yayılmaya devam etmektedir. Bu durum çatlakların belirli bir doyuma ulaşmasına kadar devam edecektir ancak 100.000 devir sonrasında böyle bir doyuma ulaşmadıkları görülmektedir. Enine kesit görünümü incelendiğinde, çatlakların numunenin sağında ve solunda hemen hemen eşit bir şekilde içeri doğru yayıldığı görülmektedir. Ancak orta kısımda henüz tam olarak yoğunlaşmadığı da görülmektedir. Bu durum çatlakların henüz doyma noktasına erişmediğini yeni çatlaklar başlayabileceğini

göstermektedir. Tüm çatlakların enine doğru yayıldığı ve ancak boyuna doğrultuda atkı iplik katmanları arasında delaminasyon çatlakları belirgin bir şekilde görülmektedir.

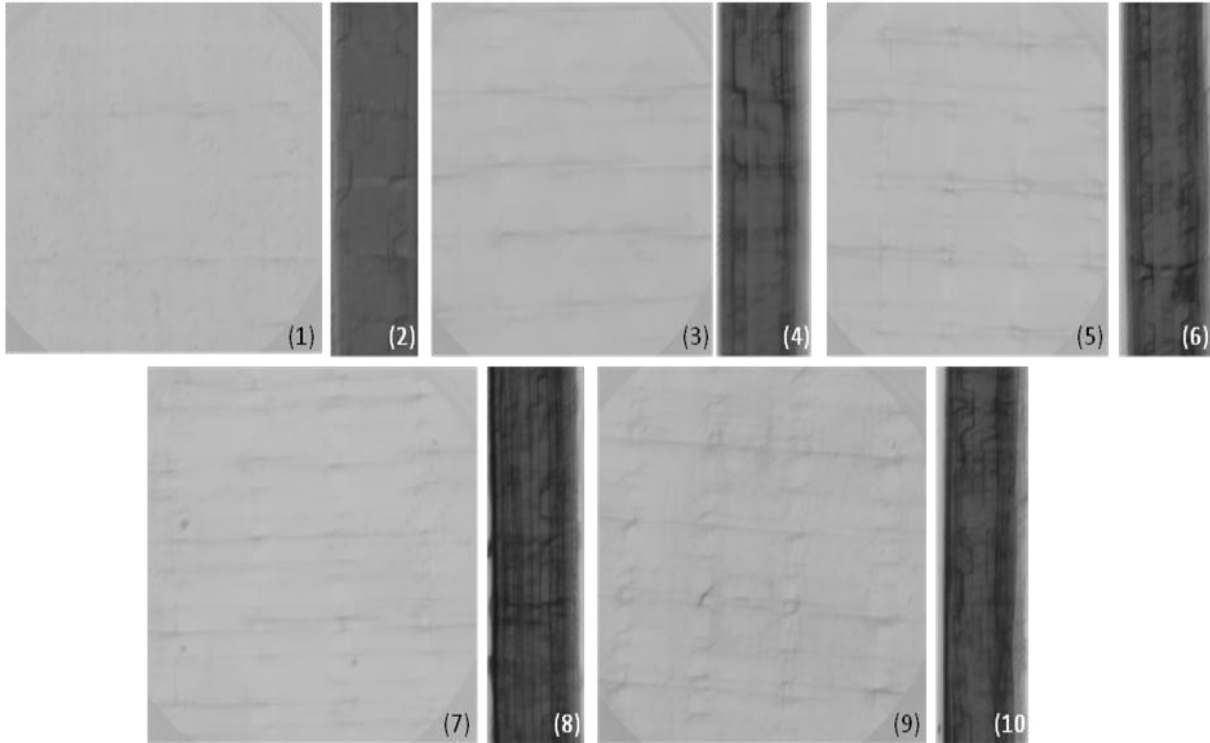
100.000 devir sonrasında mikro yapı incelemelerinden elde edilen şekillere göre (Şekil 9), çatlakların formu x-ray çekimlerinde tespit edilen U şeklini andırmaktadır. Çatlakların z-ipliklerinin atkı iplikleri ile kesişim yerleri olan reçine zengin kısımlarda önce enine daha sonrada boyuna doğrultuda yayıldıkları görülmektedir. Bu sonuçlara göre kumaş konstrüksiyonda yeni bir düzenleme yapılması ile reçine zengin bölgelerin azaltılması ve elde edilecek

malzemenin performansının daha üst seviyelere çıkarılabileceği görülmektedir.

500.000 devir sonrasında çatlakların iyice yayıldığı ve doyuma ulaştığı görülmektedir. Z-ipliklerinin tepe kısmında başlayıp tüm numune enince yayılmış olan çatlakların iyice derinleşip belirginleştiği görülmektedir. Z-ipliklerinin arasında da çatlakların yayıldığı görülmektedir. Özellikle ilk başlangıç noktası olan z-ipliklerinin tepe kısımlarında çatlakların ciddi şekilde derinleştiği görülmektedir.



Şekil 6: Yüksek gerilim seviyelerinde test edilen numunelerin yüzey görüntüleri. (a): test edilmemiş; (b) 35 kN; (c) 40 kN ve (d): 48 kN'da test edilmiş numune.



Şekil 7: 30 kN yük altında farklı devir sayılarında test edilmiş numunelerde yüzey ve kesitten alınmış x-ray görüntüleri. (1 ve 2: 10.000 devir yüzey ve kesit; 3 ve 4: 50.000 devir yüzey ve kesit; 5 ve 6: 100.000 devir yüzey ve kesit; 7 ve 8: 500.000 devir yüzey ve kesit ve 9 ve 10: 1.000.000 devir yüzey ve kesit görüntüleri).

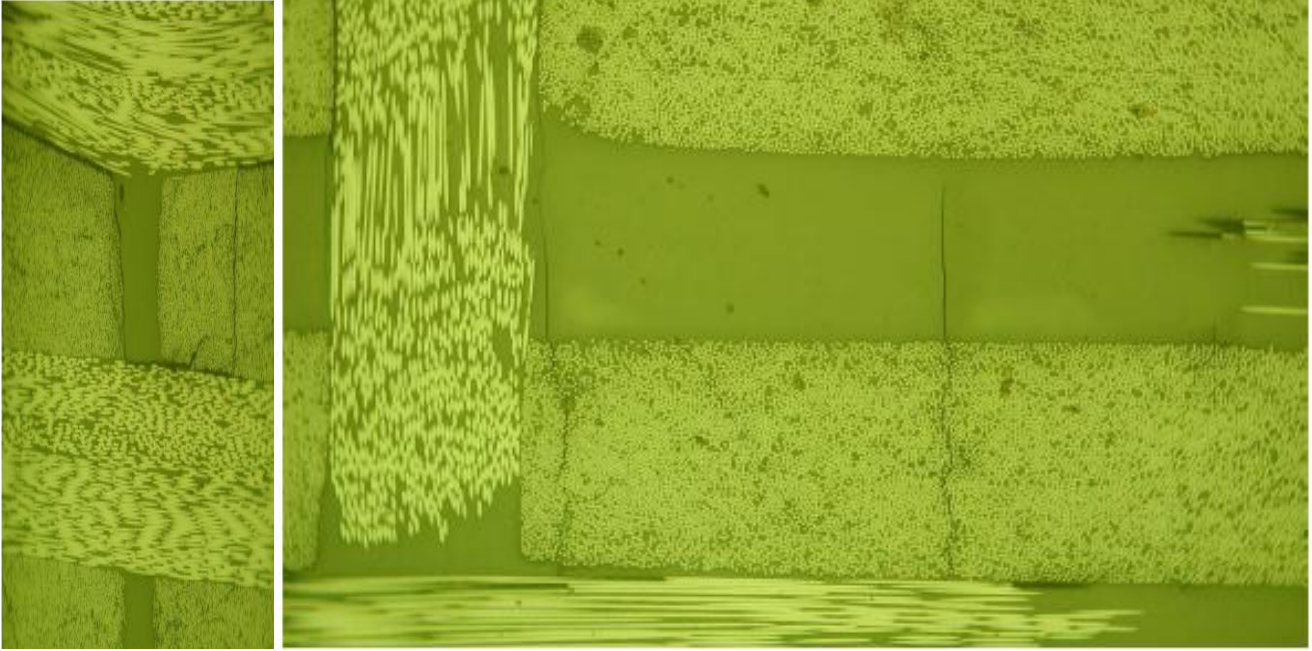
Enine kesit görünümü incelendiğinde ise, çatlakların numunenin her yerine yayılmış oldukları ve doyuma eriştikleri görülmektedir. Çatlakların numunenin her yerinde homojen bir şekilde yayıldıkları ancak çok küçük lokal delaminasyonlar haricinde delaminasyon hasarlarının meydana gelmediği görülmektedir.

Bir milyon devir sonrasında çatlakların 500.000 devire göre ciddi şekilde artmadıkları ancak çözgü katmanları arasında belirgin delaminasyon çatlakları meydana geldiği görülmektedir. Ancak delaminasyonun z-iplikleri tarafından engellenmesi nedeniyle gerçekleşmediği görülmektedir.

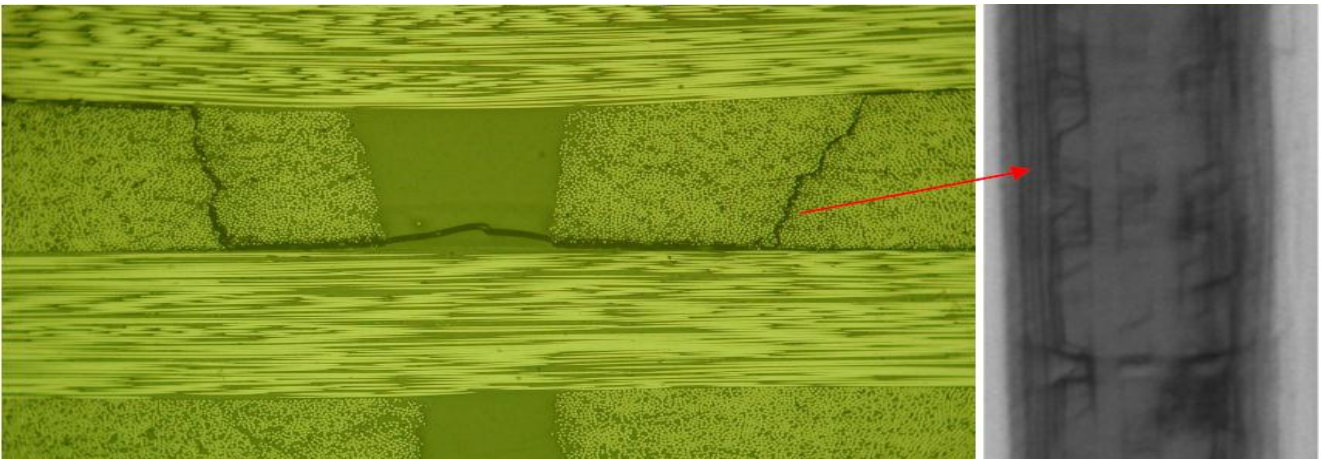
Mikro yapı incelemelerine göre, 1 milyon devir sonrasında atkı doğrultusunda çatlakların yayılmaktan ziyade daha önceki çatlakların derinleştiği görülmektedir. Yani yeni küçük çatlaklar yerine daha çok eski çatlakların derinleştiği görülmektedir. Çatlakların yayılmaması, yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu durum yapıda lif kopmalarının olmasına da neden olmuştur. Atkı doğrultusunda lif kopuşlarının olduğu mikro fotoğraflardan tespit edilmiştir (Şekil 10). Kopan lifin yapıda en üst katmandaki atkı ipliğinde (kırmızı daire içine alınan kısım)

meydana geldiği tespit edilmiştir ve muhtemelen bu kısımda iplik kıvrımı z-ipliğinin gerilimi nedeniyle bir miktar fazladır. Normalde bu kısımlarda ipliğin düz formdan sapması dokuma kıvrımı değildir. Ancak z-ipliğinin dokuma sırasında gerilimden dolayı atkı ipliklerini bir miktar bastırması, bu kısımlarda ipliğin düz formunun kısmen bozulmasına neden olmaktadır. Bu kısımlar yapıda her yerde meydana gelmemiştir. Ancak lif kopuşlarının özellikle bu nispeten kıvrımlı kısımlarda meydana gelmesi, bu küçük kıvrımların bile yapının performansını olumsuz etkilediğini ve kıvrımsız dokuma konstrüksiyonunun önemini ortaya koymaktadır.

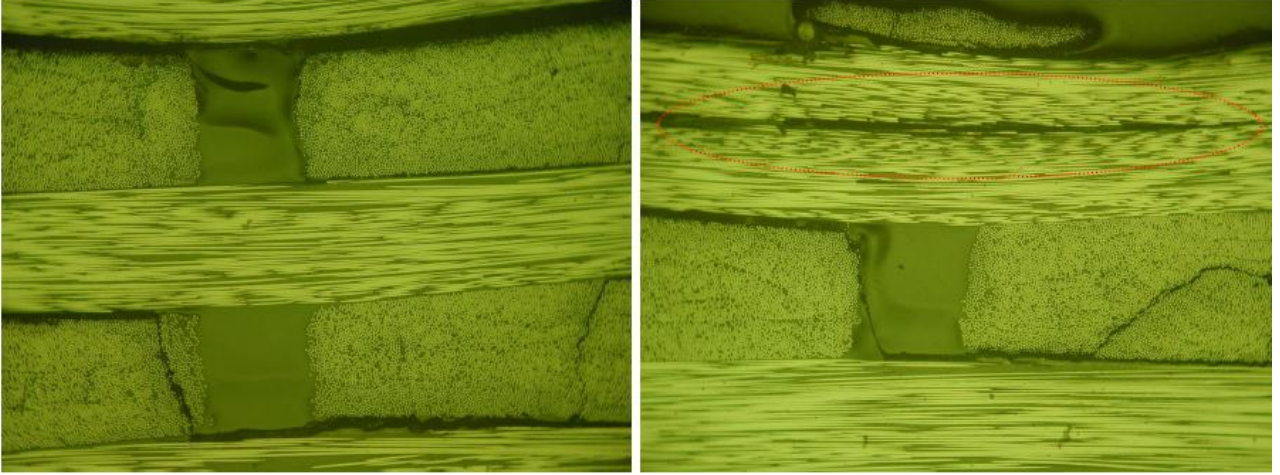
Şekil 11'den de görüldüğü gibi, z-ipliğinin atkı iplikleri ile direkt temas ettiği ve atkı ipliklerini sıkıştırdığı görülmektedir. Çözgü iplikleri ile ise sadece yan yana durmaktadır ve çözgü ipliklerinin kıvrımı veya formuna etkisi yoktur. Sarı halkalar z-ipliklerinin atkı ve çözgü iplikleri ile olan temasını göstermektedir. Kumaş yüzeyinden alınan kesit görünümü fotoğrafları, atkı ipliklerinin z-iplikleri tarafından ne kadar sıkıştırıldığını ve z-iplikleri ile kesişme noktalarında formunun bozulduğunu göstermektedir.



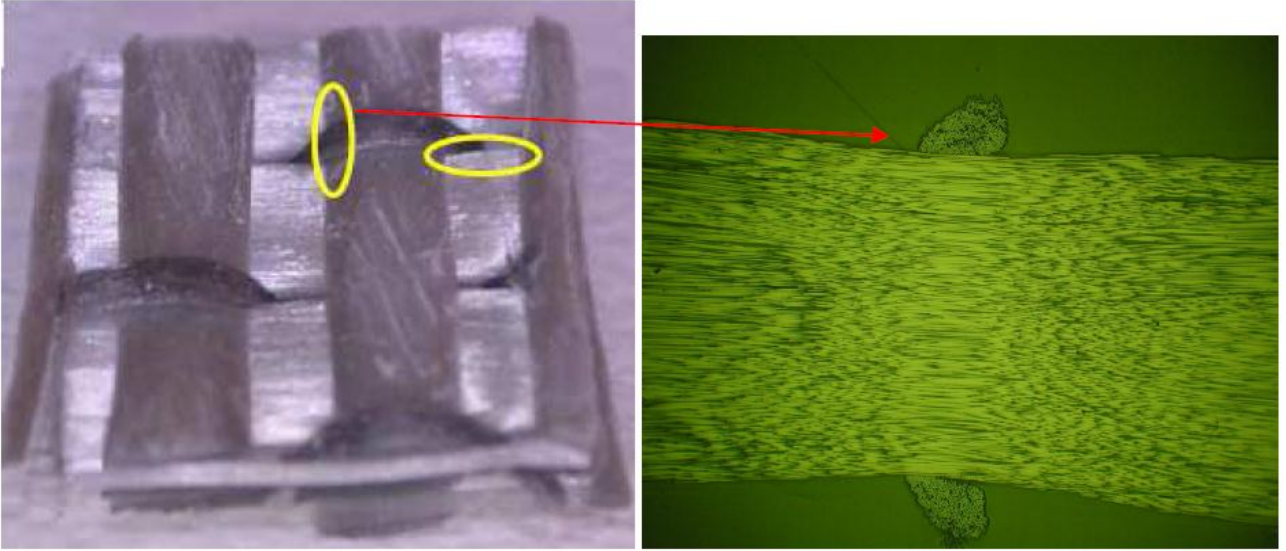
Şekil 8: 10.000 devir sonrasında atkı doğrultusunda meydana gelen hasarlar.



Şekil 9: 100.000 devir sonrasında atkı doğrultusunda meydana gelen hasarlar.



Şekil 10: Bir milyon devir sonrasında atkı doğrultusunda meydana gelen hasar şekli. Sağdaki şekilde z-ipliğinin altında kalan kısımda lif kopmaları kırmızı halka içine alınarak gösterilmiştir.



Şekil 11: Kumaş yüzey görünümü ve yüzeyden alınmış kesitte z-ipliğinin atkı ipliğinin sıkıştırması ve kıvrıma neden olması.

4 Sonuç

Bu çalışmada 3BD karbon-epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1- Yorulma ömrü S-N eğrisi ile ifade edilmiştir. 3.000.000 devir sonunda numunenin kompmadığı yük seviyesi sonsuz yorulma ömrü olarak kabul edilmiştir ve atkı doğrultusu için sonsuz yorulma ömrü 27.5 kN olarak bulunmuştur.
- 2- Yorulma testi sırasında yük-uzama eğrisinin eğimi, test sırasında kompozit malzeme modülünün önemli ölçüde düşmediğini göstermektedir.
- 3- Kompozit malzeme içinde hasar z-ipliklerinin atkı iplikleri ile keşistikleri kısımlarda başlamakta ve tüm numune eni boyunca yayılmaktadır. Z-iplikleri ile atkı ipliklerinin keşişim yerleri, atkı ipliklerini normal doğrultusuna göre bir miktar sıkıştırmakta ve hasar oluşumunu kolaylaştırmaktadır.
- 4- Küçük local delaminasyonlar haricinde yapının bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini bozacak delaminasyon hasarları meydana gelmemiştir.

5 Referanslar

- [1] Degrieck, J. and Van Paepegem, W., "Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review, American Society of Mechanical Engineers, Appl Mech Rev, Vol. 54, No. 4, July 2001.
- [2] Gowayed, Y. and Fan, H., Fatigue behavior of textile composite materials subjected to tension-tension loads, in Polymer Composites, Vol. 22, No. 6, December 2001.
- [3] Highsmith A.L. and Reifsnider K.L., Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates, in Damage in composite materials, ASTM STP 775, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 103-117, 1989.
- [4] Stinchcomb W.W. and Reifsnider K.L. Fatigue damage mechanisms in composite materials: a review: JT Fong, editor, ASTM STP 675, American Society for Testing and Materials, in Philadelphia, p. 762-787, 1979.
- [5] Talreja, R., Damage and fatigue in composites-A personal account, *Composites Science and Technology*, 68 (13): 2585-91, 2008.
- [6] Rudov-Clark, S., Mouritz, A.P., Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite, *Composites Part A*, 39, 1018-1024, 2008.

- [7] Schulte K., Reese E., Chou T-W., Fatigue behaviour and damage development in woven fabric and hybrid fabric composites, Proceedings of sixth international conference on composite materials and second European conference on composite materials, vol. 4., London and New York: Elsevier Applied Science;. (62), p. 489-99, 1987.
- [8] Talreja R., Fatigue of polymer matrix composites, in: Comprehensive composite materials. Elsevier Science Ltd.; p. 529-52, 2000.
- [9] Vallons, K., Zong, M., Lomov, S.V., Verpoest, I., Carbon composites based on multi-axial multi-ply stitched preforms-Part 6. Fatigue behaviour at low loads: Stiffness degradation and damage development, Composites: Part A, 38, 1633-1645, 2007.
- [10] Karahan, M., S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D. Mungalov, and I. Verpoest, Internal geometry evaluation of non-crimp 3D orthogonal woven carbon fabric composite, *Composites Part A*, 41: 1301-11, 2010.
- [11] Karahan, M., S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, and I. Verpoest, Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal woven fabric, *Composites Science and Technology*, 71: 1961-72, 2011.
- [12] Bogdanovich A.E., Karahan M., Lomov S.V. and Verpoest I., Quasi-static tensile behavior and progressive damage in carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric, *Mechanics of Materials*, Submitted, 2012.