

ÇOK KATMANLI DOKUMA KARBON-EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDE TEK EKSENLİ GERİLME ALTINDA HASAR BAŞLAMA VE YAYILMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI*

Mehmet KARAHAN
Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O.
Tekstil Programı Görükle Bursa-Türkiye

ÖZET

Tekstil kompozitlerinde hasar ve mekanik özellikler, tekstil yapısı ile yakından ilgilidir. Bu makale, çok katmanlı 2x2 dimi karbon dokuma kompozitlerin, tek eksenli gerilim altında mekanik özelliklerini ve hasar başlama ve yayılma özelliklerini araştırmaktadır. Hasar araştırmaları, akustik emisyon kayıtları, tüm yüzeyli gerinim ölçümleri, x-ray ve optik mikroskop gözlemleri ile yapılmıştır. Testlerin sonucunda kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar başlama gerinim değerleri tespit edilmiştir. Çözümlü doğrultusunda hasarın 0.2-0.3% gerinim düzeyinde başlayıp yayıldığı gözlenmiştir. Mikroskopik gözlemler hasarın, ipliklerin dokuma kumaş yapısında kıvrım aldıkları ve birbirleri ile kesiştikleri kısımlarda başladığını ve yayıldığını göstermiştir. Tüm yüzeyli gerinim ölçümleri ise, hasarın başlamasına neden olan gerilim konsantrasyon bölgelerinin tekstil yapısına bağlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekstil Kompozitleri, Mekanik Özellikler, Hasar Özellikleri, Akustik Emisyon, Tüm Yüzeyli Gerinim Ölçümü.

AN INVESTIGATION OF DAMAGE INITIATION AND PROGRESSION PROPERTIES IN MULTI-LAYER WOVEN CARBON-EPOXY COMPOSITE MATERIALS IN UNI- AXIAL TENSION

ABSTRACT

Damage and mechanical properties in textile composites are closely connected with the textile reinforcement's internal structure. This paper reports and discusses a study of the mechanical behavior and damage of a 2x2 twill woven carbon/epoxy composite resulting from uni-axial tension in the warp direction. A damage investigation was performed by using acoustic emission, full-field strain optical measurements, as well as X-ray and optical microscopy. As a result of the tests, the mechanical properties and strain values of the composite's damage threshold were determined. Damage initiation when loaded in the warp direction occurred between 0.2-0.3% of the applied strain. Microscopic examination showed that damage or cracks initiated where the yarn was crimped and at interactions between the warp and fill yarns. Full-field strain measurements highlight the relation between the strain concentrations that are linked with the damage initiation and the reinforcement structure.

Key Words: Textile Composites, Mechanical Properties, Damage Properties, Acoustic Emission, Full Field Strain Measurement

* Bu çalışma 16-18 Mayıs 2010 tarihleri arasında İstanbul'da düzenlenen IV. Uluslararası Teknik Tekstiller Kongresinde sözlü olarak sunulmuştur.

1. GİRİŞ

Tekstil kompozitlerinde dayanımı belirleyen en önemli unsur, genellikle kompozit yapıda hasar başlama ve yayılma özellikleridir. Tekstil kompozitlerinde hasar başlama özellikleri, değişik yapılar için kapsamlı olarak çalışılmıştır: bezayağı dokuma [1-4], dimi dokuma [5], saten dokuma [6, 7], üç boyutlu interlok dokuma [8, 9], üç boyutlu ortogonal dokuma [1-4, 10-12], saç örgü (braiding) kompozitler [13-15] ve kıvrımsız çok eksenli çözümlü örme yapılar [16, 17]. Hasar başlama akustik emisyon (AE) kayıtları [1-6, 9, 16], optik veya elektronik mikroskop incelemeleri [1-4, 9, 13, 17] ve çekme diyagramında eğimin değişimi [8] ile tespit edilmeye çalışılmıştır.

Hasarın başlaması eğer uygulanan gerinime bağlı olarak açıklanıyor ise, farklı tekstil malzemeleri için önemli ölçüde benzerdir. Temel farklılık yüklemeye doğrudur. Yüklemeye lif doğrultularından herhangi birisinde (0° veya 90°) yapıldığında diğer doğrultulardaki (45° gibi) yüklemelerden farklı olması gerekir. Başlangıçta yüklemeye bağlı olarak çatlaklar meydana gelir ve daha sonra ileri düzey deformasyon oluşur. Lif doğrultusundaki yüklemelerde kıvrımsız çok eksenli çözümlü örme yapılarında hasar başlama gerinimi 0.2-0.4% arasında tespit edilmiştir [16, 17]. Gao [6] saten dokuma kompozitlerde 0.15% gerinimde çatlakların ipliklerin içinde meydana geldiğini rapor etmiştir. Daggumati et. al. [7] saten dokuma kompozitlerde hasar başlama ve yayılma özelliklerini deneysel olarak tespit etmiş ve nümerik sonuçlar ile kıyaslamışlardır.

Tekstil kompozitlerinde hasar meydana gelmesi, tek doğrultuda lif takviyelemesine sahip, uni-directional (UD) lamine yapılar göre daha karmaşıktır ve makro yapıdan mikro yapıya kadar farklı seviyelerdeki parametrelerin belirlenmesini gerektirir. Bu parametreler, makro seviyede, numune üzerinden kapsamlı olarak mukavemet, kopma uzaması ve dayanımdaki düşüş, meso seviyede, tekstil takviye malzemesinin iç kısmında hasar başlangıç bölgeleri ve mikro seviyede, ipliklerin ve lif katmanlarının içindeki lokal hasar tipleri olarak özetlenebilir. Bu nedenle tekstil yapısının meso seviyede geometrik modelinin oluşturulması ve iç yapısının veya geometrisinin tam olarak ortaya konması önemlidir. Dokuma kompozitlerde hasar başlama ve yayılma özelliklerinin, dokuma yapının konstrüksiyona ve yapıdaki iplik kıvrımlarına bağlı olarak değişmesi beklenmektedir.

Bu çalışma 2x2 twill dokuma karbon epoxy kompozitlerin değişik yüklemeye doğrultularında hasar özelliklerini araştırmayı hedeflemektedir. Tek eksenli gerilme altında hasarın ilk başladığı ve yayıldığı gerilim-gerinim seviyeleri AE kayıtları ile tespit edilmiş ve hasarın meso ve mikro yapıda ne şekilde yayıldığı ise x-ray ve optik mikroskop gözlemleri ile elde edilmiştir. Numuneler üzerinden tüm

yüzeyle gerinim ölçülmesi yöntemi ile numunelerin çekme gerilmesi sırasında gerinim haritalaması ve gerilim konsantrasyon bölgelerinin tespiti yapılabilmektedir. Bu sayede tekstil yapısındaki iplik kıvrımlarının ve iplik kesişimlerinin, yapıdaki gerilim dağılımına ve hasar başlama özelliklerine etkileri tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

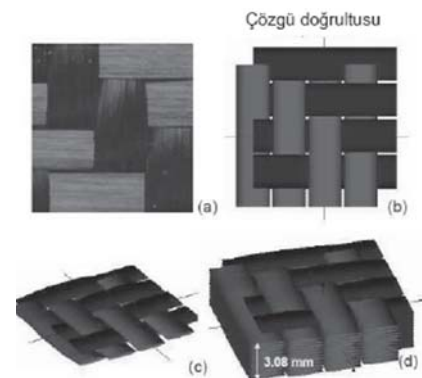
Tablo 1, 2x2 dimi karbon dokuma kumaşa ve karbon liflerine ait özellikleri göstermektedir.

Tablo 1: G986 tipi 2x2 dokuma kumaşın ve karbon liflerinin özellikleri

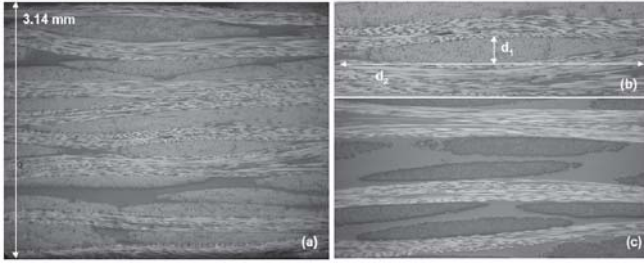
Dokuma	Dimi 2/2
Çözümlü/atki iplikleri	6K HTA karbon
Çözümlü/atki sıklığı, iplik/cm	3.5
Çözümlü/atki kıvrımı, %	0.1/0.1
Gramaj, g/m ²	285
Lif Young Modülü, GPa	238*
Lif mukavemeti, MPa	3950*
Lif uzama oranı, %	1.7*
Lif Poisson oranı	0.26*
Lif çapı, µm	7*

* üretici firma verileri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan G986 tipi karbon dokuma kumaşın geometrik modellemesi *wise-tex* [18] geometrik modelleme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). *Wise-tex* modellemesinde kompozit malzeme kesitinden alınan iplik kesit ölçüleri kullanılmıştır. Ölçümler, kumaş katmanlarının birbiri üzerine geçmeyen kısımlarından optik mikroskop altında alınmıştır. Kompozit malzeme numune kesiti ve modellemede kullanılan iplik kesit ölçüleri Şekil 2a ve b'de verilmiştir. Şekil 1d'de 11 katlı G986 kumaşın kompozit yapı içinde üst üste dizilmiş durumu verilmiştir. Tek katlı kumaş kalınlığı 0.286 mm iken, 11 katlı üst üste dizilmiş yapıda toplam kalınlık 3.08 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 1: (a) G986 karbon kumaşın ön yüz görünümü; (b, c) tek kat kumaş birim hücrelerine ait *wise-tex* modelleme görünümü ve (d) 11 katlı G986 kumaşa ait *wise-tex* modeli.



Şekil 2: (a) 11 kat kompozit malzemede numune kesiti (b) numune kesitinden iplik genişliği (d_1) ve uzunluğu (d_2) ölçülerinin alınma şekli; aynı kumaş ve reçine ile üretilmiş 8 kat kompozit malzemede numune kesiti (c) [19].

Tablo 2: G986 kumaşa ait wise-tex modelleme sonuçları

Birim hücre boyutları: 11.40/11.40/0.286 mm (uzunluk/genişlik/kalınlık)					
Kumaş gramajı: 287.6 g/m ²					
Porozite (iplikler içi): 23 %					
Lif hacimsel oranı (V_f): 57.1 %					
İplikler	d_1 , mm	d_2 , mm	V_f , % (iplik kesitinde)	Birim hücrede iplik uzunluğu, mm	İplik kıvrımı, %
Çözü	0.14	2.80	74.2	11.45	0.1
Atkı	0.14	2.80	74.2	11.45	0.1

Epikote 828 LV Shell epoksi reçine, Epikure DX 61514 katılaştırıcı ile birlikte kullanılmıştır. Karışım oranları reçine ve katılaştırıcı için 100/17 olarak alınmıştır. Epoksi reçine özellikleri, elastik modül 2.7 GPa, Poisson oranı 0.4, çekme mukavemeti 75 Mpa ve kopma uzama oranı 3.7% olarak alınmıştır [16, 20].

2.2 Kompozit Numunelerin Üretimi

Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak kumaşlar 400x400 mm ebatlarında çözgü doğrultusunda kesilmişlerdir. Kumaşlar atkı ve çözgü doğrultusunda aynı özelliklere ve lif hacimsel oranına sahip oldukları için, kompozit numuneler sadece çözgü doğrultusunda kesilmiş kumaşlar ile hazırlanmıştır.

Kompozit plakalar vakumlu reçine transfer metodu ile 11 kat kumaş ile yaklaşık 3 mm kalınlıkta ve yaklaşık 58% lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde üretilmişlerdir.

Numunelerin üretiminde kumaşlar öncelikle kalıp içine yerleştirilmektedir ve kalıp kapatıldıktan sonra belirli bir basınç altında reçine enjekte edilmektedir, bu sırada ekstradan birde vakum basıncı yapıya negatif bir basınç uygulamaktadır. Bu durum reçine enjeksiyon hızını artırdığı gibi, yapı içindeki hava boşluklarının azalmasına da yardımcı olmaktadır. Kalıp 200 KPa basınç ile kapatılmaktadır. Kalıp içine yerleştirilen kalınlık belirleyici (spacer) üretilen plakaları kalınlığını belirler ve aynı zamanda lif hacimsel oranını da belirler. Kalıp kapatıldıktan sonra önce vakumlama yapılmış, sürekli vakumlama altında reçine enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Reçine enjeksiyonu tamamlandıktan sonra 80 derece sıcaklıkta 1 saat katılaşma işlemi için beklenmiş, ardından da 140 derecede 2 saat süre ile katılaşma tamamlanmıştır.

2.3. Deneysel Metodoloji

Bu çalışmada kullanılan deneysel metodolojinin detayları literatürde [16, 17, 21, 22] mevcuttur. Kullanılan metodoloji kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çekme yüklemesi altında gerilim-gerinim eğrisinin elde edilmesi,
- Akustik emisyon (AE) meydana gelen çatlakların hangi gerinim seviyesinde başladığının tespit edilmesi,
- Tüm yüzeyli gerinim haritalamanın yapılması,
- Farklı yüklem seviyelerinde çatlakların yayılmasının x-ray ve optik mikroskop ile tespit edilmesi.

2.3.1. Çekme Testleri:

Çekme testleri Instron 4505 test cihazında 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 25x210 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Numuneler sadece çözgü doğrultusunda kesilmişlerdir. Numunelerin instrona bağlandıkları kısımda çene basıncı nedeniyle hasar görmemesi için end tab kullanılmıştır. Çeneler arası mesafe veya çekme testi uzunluğu 120 mm olarak alınmıştır. Çekme testinden önce hazırlanmış numunelerin orta kısmı siyah-beyaz noktacıklar şeklinde boyanmıştır. Boyama işlemi siyah ve beyaz spreylere yapılmıştır.

Gerinim değerlerindeki (ϵ) hatalar, instron çenelerinin hareket etiği mesafenin tam olarak doğru tespit edilmesinden kaynaklanır. Bu durum özellikle çok yüksek mukavemetli ve yüksek rijitliğe sahip malzemelerin testi sırasında kendiliğinden meydana gelebilmektedir. Bu tür hatalar optik ekstansiyometre kullanılarak elimine edilmiştir. Gerinimin gerçek veya düzeltilmiş değerleri numunenin merkez kısmının gerinim değerlerinin okunması ile tespit edilmiştir.

Çekme testi sırasında sistem bu boyalı kısımdan her 0.5 s de bir görüntü almaktadır. Testin ilk başında alınan görüntü referans olarak kullanılmaktadır. Daha sonraki görüntülerde ise noktacıkların yer değişimine bağlı olarak gerinim hesaplanmakta ve yüzey gerinim haritalaması yapılmaktadır. Yüzey gerinim haritası (1) optik ekstansiyometre olarak ve (2) yüzeyde gerinim dağılımı ve gerilim konsantrasyon kısımlarının tespit edilmesi için kullanılır. Gerilim konsantrasyon kısımları hasar başlama ve yayılma özellikleri açısından bilgi vereceği gibi modelleme çalışmalarında da yararlı bilgiler sağlamaktadırlar.

Her bir testte, iki akustik emisyon sensörü, numunenin uç kısımlarına yapıştırılmaktadır. Bu sensörler çekme testi sırasında numune iç yapısında meydana gelen çatlakların ses enerjisini kaydetmektedirler. Bu sayede numune iç yapısında meydana gelen her türlü çatlak veya deformasyonun hangi gerinim seviyesinde meydana geldiği takip edilebilmektedir. Ayrıca kaydedilen AE kayıtlarının enerji seviyesinde belirlenebilmektedir. Böylece meydana gelen çatlakın hangi büyüklükte bir çatlak olduğu da belirlenebilmektedir.

Testlerde ilk olarak 8 numune kopma gerçekleşinceye kadar çekilmişlerdir. Buradan kopma gerilimi ve nihai gerinim değeri tespit edilmiştir. AE verilerine bakılarak hasarın ilk başladığı ve arttığı ε_1 and ε_2 değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler ε_2 değerine kadar dört ilave numune test edilmiştir. Bu seviyedeki testlerin AE sonuçları kontrol edilerek ε_1 seviyesi kesin olarak tespit edilmiştir. Daha sonra dört numunede ε_1 seviyesine kadar test edilmişlerdir. Son olarak dört adet numune, hasarın tamamen yayıldığı gerinim seviyesi ε_3 seviyesinde test edilmişlerdir. ε_1 , ε_2 ve ε_3 seviyesine kadar test edilen numuneler, x-ray ve optik mikroskop gözlemleri için kullanılmışlardır. Testlerin sonucu olarak, Young modülü, çekme mukavemeti, kopma uzama oranı ve Poisson oranı gibi mekanik özellikler ve hasar başlama ve yayılma gerinim değerleri tespit edilmiştir.

2.3.2. X-ray ve Optik Mikroskop Gözlemleri

Çatlakların gözlenmesi için, Philips HOMX 16 sistem x-ray cihazı ve AEA Tomohawk yazılımı kullanılmıştır. Numuneler x-ray cihazında gözlenmeden önce yaklaşık 12 saat Diomethan penetrant içinde bekletilmişlerdir. X-ray imajları 1024x1024 piksel çözünürlükte alınmıştır.

Kompozit plakaların optik mikroskop ile kesit alanlarının incelenmesi için önce elmas uçlu kesici ile numune alınmıştır ve numunelerin yüzeylerinin parlatılması için numuneler dairesel bir kalıp içine yerleştirilmiş ve boşluk kısımları epoksi reçine ile doldurularak katılaştırılmıştır. Yaklaşık 8 saatlik bir katılma süresinden sonra numunelerin yüzeyleri parlatılma öncesi aşındırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu amaçla ilk olarak 120 numara zımpara kullanılarak numunelerin yüzeyi aşındırılmış daha sonra sırasıyla 320, 800, 1200 ve 4000 numara zımparalar ile numune yüzeyleri parlatılmıştır. Her bir aşındırma 15 dakika süre ile uygulanmıştır. En son olarak 2 μ m inceliğinde elmas süspansiyon ile kadife bir tekstil yüzeyi kullanılarak numune parlatılmış ve yüzeyi mikroskop incelemesi için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin kesitleri Reichert-ZETOPAN stereo mikroskop ile incelenmişlerdir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Mekanik Özellikler

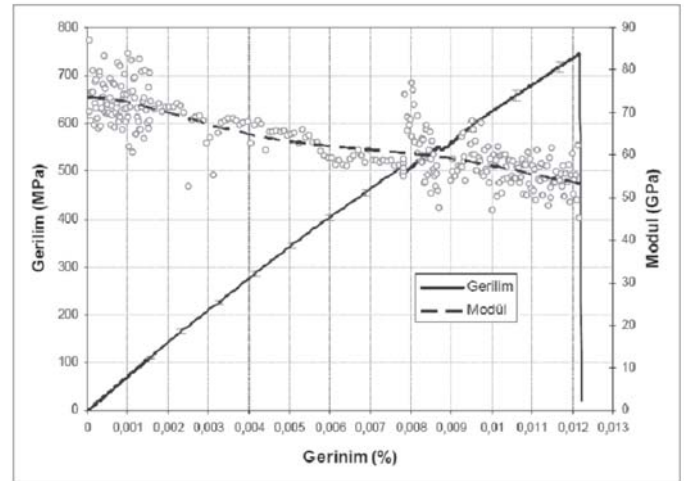
Lif hacimsel oranı, $V_f = \frac{N \times A}{\rho \times h}$ bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada m kullanılan kumaşın gramajı (285 g/m^2), N , kullanılan kumaş kat sayısı (11 kat), ρ lif yoğunluğu (1.78 g/cm^3) ve h kompozit plakanın kalınlığıdır ($3.14 \pm 0.03 \text{ mm}$). Bu bağıntıya bağlı olarak lif hacimsel oranı 57% civarında tespit edilmiştir. Bu sonuç Tablo 2'de gösterilen, *wise-tex* geometrik modellemesinden elde edilen sonuca oldukça yakındır.

Çekme testlerinde LIMESS kamera ile numune yüzeyinden kaydedilen gerinim ölçümlerinin ortalaması alınmıştır. Gerinimin optik olarak kaydı saniyede iki imaj alınarak kaydedilmiştir. LIMESS gerinim kaydı ölçümlerinden Poisson oranı hesaplanmıştır, Poisson oranının hesaplanmasında $\nu = -\varepsilon_x / \varepsilon_y$ bağıntısı kullanılmıştır. Burada ε_x , çekme doğrultusuna göre numunenin enine doğrultudaki deformasyonu iken, ε_y , çekme doğrultusunda meydana gelen deformasyondur.

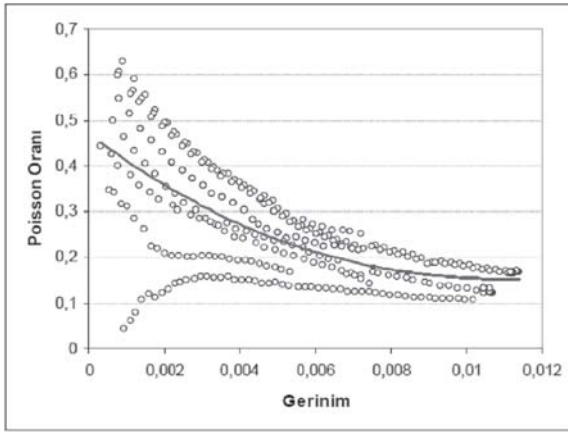
Çekme testi sonuçlarına bağlı olarak, gerilim ve Young modülünün gerinim değerine bağlı olarak değişimi, Şekil 3'de görülmektedir. Şekil 4 ise Poisson oranı değişimini göstermektedir. Çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'de, E : Young modülü; ε_{max} : maksimum çekme mukavemeti; ε_{min} : numunenin koptuğu gerinim seviyesi; ε_{min} : ilk tespit edilen hasar kaydına karşılık gelen gerinim seviyesi; ε_j : hasarın yayılmaya başladığı ilk gerinim seviyesi ve ε_2 : hasarın yayılmaya başladığı ikinci gerinim seviyesini göstermektedir. Elastik modül, gerilim-gerinim eğrisinin başlangıç kısmının eğiminden tespit edilmiştir.

Tablo 3: Karbon-epoksi kompozit numunelerde çözüğü doğrultusunda gerçekleştirilen testlerde elde edilen mekanik özellikler.

Parametre	Çözüğü Doğrultusu		
	Ortalama	standart sapma	Varyans Katsayısı,%
E (0 - 0.1%), GPa	71.44	1.14	1.16
E (0.1 - 0.3%), GPa	69.04	1.07	1.6
E (0.3 - 0.6%), GPa	64.64	1.21	1.87
Poisson oranı	0.24	0.10	42.6
ε_{max} , Mpa	739	10	1.3
ε_{max} , % ε	1.23	0.01	1.1
ε_{min} , % ε	0.21	0.01	6
ε_1 , % ε	0.27	0.01	3
ε_2 , % ε	0.29	0.01	4
V_f , %	57.1 (çözüğü: 28.5; atkısı:28.5)		



Şekil 3: Çözüğü doğrultusunda ortalama gerilim-gerinim eğrisi ve Young modülünün gerinime bağlı olarak değişimi (hata barları standart sapmayı göstermektedir).



Şekil 4: Poisson oranının gerinim değerine bağlı olarak değişimi (kırmızı çizgi ortalama trendi göstermektedir).

Gerilim-gerinim eğrisi yaklaşık olarak linear görünmekle birlikte, ideal bir lineerliğe sahip değildir. Uygulanan gerilim arttıkça çekme eğrisinin hafif bir non-lineerlik gösterdiği görülmektedir. Bu non-lineerliğin çekme eğrisinin başlangıç kısımlarında çok az olduğu ancak özellikle 0.3% gerinim değerinden sonra arttığı görülmektedir. Bu durum karbon-epoksi numunelerde hasarın 0.3%'de sonra iyice yayılması ile ilgilidir. Diyagramın non-lineerliği nedeniyle Tablo 3, Young modülünün 3 farklı değerini göstermektedir. Bunlar başlangıç, 1000 μ den az olan gerinim kısmı, orta kısım 1000...3000 μ aralığı ve 3000...6000 μ aralığıdır. Uygulanan gerinim sıfırdan 10.000 μ ye doğru arttıkça, Young modülü çözgü doğrultusu için, 2.4 GPa (3.3%) azalmaktadır. Bu durum gerilim-gerinim eğrisinde hafif bir non-lineerlik olduğunu göstermektedir. Bu azalma çok az olmakla birlikte 3000 μ 'den sonraki kısımlarda daha fazla bir azalma görülmektedir. Bu durum Şekil 3'deki eğride Young modülünün değişiminden gözlemlenebilir. Bu değerden sonra hasarın daha fazla yayıldığı ve kompozit yapıda lif ve ipliklerde kopmalar meydana geldiği, başlamış çatlakların iyice yayılıp derinleştiği anlaşılmaktadır. Ancak gerilim arttıkça eğrideki non-lineerlik artmaktadır. Nitekim 3000...6000 μ gerinim seviyelerinde modül 6.8 GPa (9.5%) azalma göstermektedir. Testin başından itibaren kopma gerçekleşinceye kadar Young modülü değerinde yaklaşık 26%'lik bir azalma olduğu kaydedilmiştir.

Young modülü değeri, çözgü doğrultusunda, lif hacimsel oranı ($V_{f, \text{çözgü}} = 28.5\%$), iplik numarası, kumaş konstrüksiyonu ve kumaş sıklığına (Tablo 2) ve matris özelliklerine [16, 20] bağlı olarak, *Tex-Comp* yazılımı ile [23] hesaplanmış Young modülü değerleri ile kıyaslanabilir. Karbon liflerinin Young modülü olarak $E_f = 238$ GPa alınmıştır, bu değer üretici firmanın değeridir (Tablo 1). Bu değerlere bağlı olarak Young modülü çözgü doğrultusunda 71.8 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer deneysel olarak tespit edilen değere oldukça yakındır. Karışım kanunu ile aynı parametreler kullanılarak yapılan hesaplamada Young modülü 67.3 GPa olarak hesaplanmıştır. Ancak bu değer

enine doğrultudaki ipliklerin katkısından dolayı 3-4 GPa daha artırılabilir. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasında iyi bir uyum vardır.

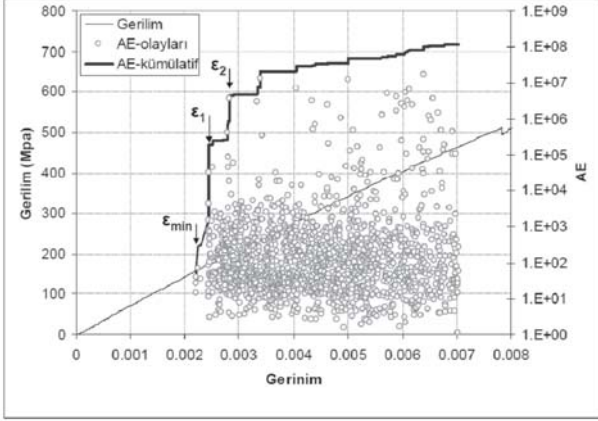
Ölçülen mukavemet değeri çözgü doğrultusunda 73910 MPa olarak elde edilmiştir. Maksimum kopma uzama oranı ise 1.230.01% olarak elde edilmiştir. Mukavemet ve uzama oranı karışım kanunu ile çözgü doğrultusundaki lif hacimsel oranı dikkate alınarak hesaplandığında, mukavemet yaklaşık 1142 MPa, uzama oranı ise 1.35% olarak elde edilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasında özellikle çekme mukavemeti değerlerinde ciddi bir fark vardır ve bu durum dokuma yapısındaki kıvrımın mukavemet üzerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Aynı lif hacimsel oranına sahip kıvrımsız tek doğrultulu (UD) yapıya ait çekme mukavemeti ile 2x2 dimi dokuma kompozite ait çekme mukavemeti arasında yaklaşık 0.65 (veya 35% düşüş) gibi bir faktör vardır. Bu durum çeşitli çalışmalarda [24-32] farklı tekstil kompozitleri için yaklaşık 0.6-0.9 arasında olarak ileri sürülmüştür.

3.2. Hasar Başlama ve Yayılma Özellikleri

Çalışmanın öncelikli amacı, 2x2 dimi çok katmanlı dokuma kompozitlerde hasarın başlama ve yayılma özelliklerinin belirlenmesidir. AE kayıtları, hasarın başladığı ve yayıldığı karakteristik gerinim seviyelerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır. AE kayıtlarında enerji seviyesi ve AE olaylarının sıklığı dikkate alınması gereken parametrelerdir. X-ray ve optik mikroskop gözlemleri ise, hasarın meso ve mikro seviyede nasıl başlayıp nasıl yayıldığı konusunda bilgi vermektedir.

Şekil 5, gerilim-gerinim eğrileri ile birlikte, 2x2 dokuma kompozit malzeme için çözgü doğrultusunda AE kayıtlarının tipik sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5'den de görüldüğü gibi, çekme testi başladığında başlangıçta herhangi bir AE kaydı olmamaktadır. Daha sonra belirli bir yük seviyesine gelince (bu yük seviyesi ϵ_{min} olarak belirlenen gerinim oranına karşılık gelir) oldukça seyrek AE olayları meydana gelmeye başlamaktadır. Daha sonra olayların meydana gelme sıklığı ve olayların enerjisi ani bir şekilde artmaktadır ve enerji seviyesi kısa bir süre sonra daha yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum kümülatif AE enerjisi eğrisinin eğiminin artması ile sonuçlanır. İlk hasar başlama gerinim değeri ϵ_1 olarak belirtilir. Bu değer gerilim-gerinim eğrisinin eğiminde kalıcı bir değişimin başladığı gerinim değerine de karşılık gelmektedir. ϵ_{min} ve ϵ_1 arasında meydana gelen hasarlar test edilen numunenin dayanımını etkileyecek ve kötüleştirecek etkiye sahip değildir. Bir miktar daha yüksek yük seviyelerinde AE kümülatif enerji diyagramında ikinci bir dirsek verme bölgesi meydana gelir, bu kısım ikinci hasar başlama gerinimidir ve ϵ_2 ile ifade edilir.

AE sensörleri test sonuna kadar takılı kalmazlar, ε_2 seviyesinin biraz üzerinde çıkartılmışlardır. Aşağıda AE kayıtlarına bağlı olarak hasar başlama ve yayılma özellikleri detaylı olarak sunulmuştur.

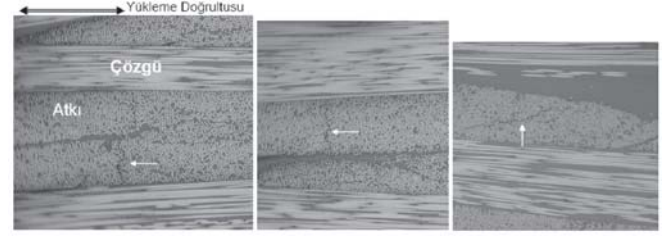


Şekil 5: Gerilim-gerinim eğrisi ile birlikte AE olayları ve kümülatif AE eğrisi.

3.3. Kompozit Yapıda Meso ve Mikro Seviyede Hasar Yayılma Özelliği

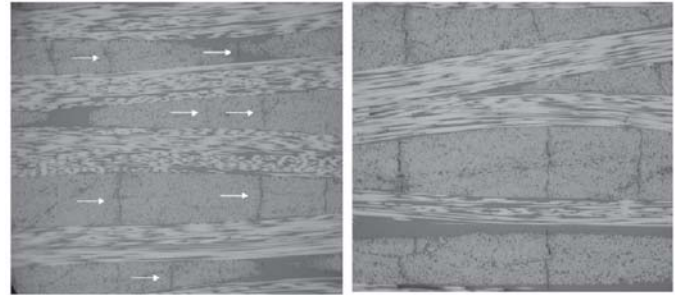
Tablo 3 ve Şekil 5'den açıkça görüldüğü gibi, çözüğü doğrultusunda yapılan yüklemelerde hasar başlama gerinimleri ε_{min} , ε_1 ve ε_2 sırasıyla 0.21% (150 MPa civarı), 0.27% (200 MPa civarı) ve 0.29% (220 Mpa civarı) olarak tespit edilmiştir. AE diyagramı (Şekil 5) incelendiğinde, aynı zamanda düşük enerjili AE olaylarının sayısının ve AE olaylarının yoğunluğunun çok fazla olduğu görülmektedir. Bu durum yapıda çok fazla sayıda enine çatlak meydana geldiğini göstermektedir.

Hasarın hemen başlamasından sonra (0.21%) veya çok az daha yüksek gerinim seviyesinde malzeme yapısında küçük ebatlı mikro çatlaklar meydana geldiği görülmektedir (Şekil 6). Bu çatlaklar lif kırılması değildir, çünkü bu yük seviyesi lif kırılması için gereken seviyeden oldukça azdır. Bu çatlakların lif kırılması olmadığı, Şekil 3'de modül eğrisinden de görülebilir. Modül eğrisinde 0.2% gerinim değerine kadar çok hafif bir düşüş meydana gelmiştir. Ancak 0.3% değerinden sonra modülde daha hızlı bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Çözüğü doğrultusunda yapılan yüklemelerde, başlangıç çatlakları atkı iplikleri içinde enine çatlaklar şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuç çeşitli çalışmalardaki sonuçlar ile uyumludur [1, 2, 6-9]. Kompozit yapıda dokuma yapının tesadüfi olarak birbirleri içine girmesi yani nesting davranışından dolayı bu çatlakların yerlerini kesin olarak tespit etme imkanı yoktur. Ancak mikroskop resimlerinden genelde ipliklerin kesişim yerlerinde ve kıvrımın maksimum olduğu kısımlarda başladığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle ε_2 seviyesindeki mikroskop incelemeleri ile doğrulanmıştır. Başlangıç çatlaklarının uzunluğu, iplik genişliğinin hemen hemen yarısı kadar olduğu göz önüne alınabilir.



Şekil 6: İlk hasar başlama gerinimi, ε_1 seviyesinde meydana gelmiş çatlaklar.

İkinci hasar başlama geriniminden sonra (ε_2) iki olay meydana gelir (Şekil 7): (1) başlangıç çatlakları yukarıda tartışıldığı gibi yayılır ve büyür ve (2) yeni ve daha büyük çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların yerleri göz önüne alındığında, özellikle iplik kesişimlerinin olduğu kısımlarda yoğunlaştıkları görülmektedir. AE sonuçlarına göre, hasarın başlamasından sonra aniden yayıldığı görülmektedir. Dolayısı ile hasarın başladıktan sonra çok hızlı yayıldığını söyleyebiliriz. Bu durum yapıda nesting etkisinin artmasından dolayı lokal olarak lif hacimsel oranının artmasından kaynaklanabilir. Bu seviyeden sonra AE kayıtlarının yoğunluğu çok fazladır ancak AE olaylarının büyük kısmı düşük enerjili olaylardır. Bu durum yapıda büyük ölçüde matriks çatlaklarının yayıldığı göstermektedir. Şekil 7 incelendiğinde, ε_2 seviyesinden sonra modülün daha hızlı azaldığı görülmektedir. Bu durum bu seviyeden sonra lif kopmalarının da meydana geldiğini göstermektedir. ε_2 seviyesinde meydana gelen çatlakların uzunlukları dikkate alındığında, bazı çatlakların numunenin tam eni boyunca yayıldığı ancak yeni meydana gelen çatlakların ise daha kısa oldukları görülmektedir.



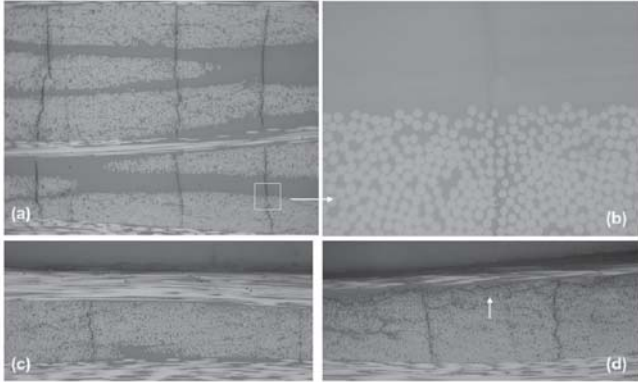
Şekil 7: İkinci hasar başlama gerinimi, ε_2 seviyesinde meydana gelmiş çatlaklara örnekler.

İkinci hasar başlama seviyesinin üzerinde ve nihai kopma hasarına yakın yüklemelerde (ε_3) çözüğü doğrultusundaki yüklemelerde çok sayıda çatlak gözlenmektedir. Atkı ipliklerindeki enine çatlakların derinliği ve yoğunluğu artmıştır. X-ray gözlemlerinden çatlakların numunenin enini tamamen kapladıkları görülmektedir (Şekil 8). Mikroskop gözlemleri ise, enine çatlakların büyüdüğünü ve derinleştiğini göstermektedir (Şekil 9). Normalde bu yüklemelerde iplik katmanları arasında delaminasyon çatlaklarının meydana gelmesi beklenmektedir.

Ancak oldukça az sayıda delaminasyon çatlakına rastlanmıştır. Bazı numunelerde bu yükleme seviyesinde hiç delaminasyon çatlakı meydana gelmediği görülmektedir (Şekil 9c). Gözlenen delaminasyon çatlaklarının numune en üst ve en alt katmanlarında meydana geldiği görülmüştür (şekil 9d). Ancak bunların oranı toplam kontrol edilen mikroskop resimlerinin sadece %20 sine tekabül etmektedir. Bu durumda nesting etkisinin delaminasyonu engellediğini söyleyebiliriz. Bu durum çeşitli araştırmacılar [33-35] tarafından da ileri sürülmüştür. Bu enine çatlaklar ilerleyen aşamalarda atkı ipliklerinin kopmasına ve delaminasyona neden olmaktadır.



Şekil 8: ϵ_3 seviyesindeki yüklemde x-rayda gözlenen enine çatlakların numune yüzeyinden ve kesitinden görülmesi

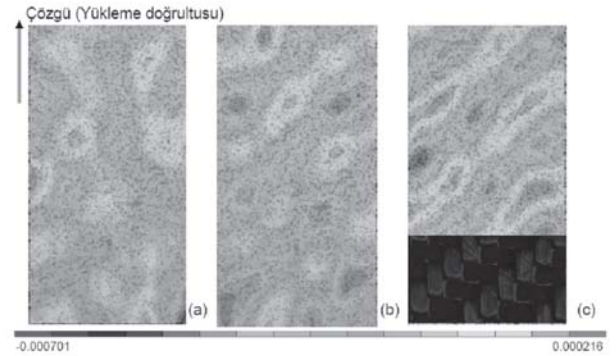


Şekil 9: İyice yayılmış hasar durumunu gösteren ϵ_3 seviyesindeki yüklemde sonucunda meydana gelmiş çatlakların görünümü: (a, b) tüm numune enince yayılmış ve derinleşmiş çatlaklar; (c) Numune en üst katmanında meydana gelen enine çatlaklar; (d) numune en üst katmanında meydana gelen delaminasyon çatlakları.

3.4. Gerinim Haritalama

Gerinim haritalama, çekme testi sırasında numune üzerinden dijital görüntülerin alındığı bir ölçüm sistemidir. Bu amaçla Vic2D yazılımı (LIMESS Messtechnik und Software GmbH) kullanılmıştır, sistemin detayları literatürde [1, 2] bulunabilir. Bu ölçüm için numuneler ilk olarak orta kısımlarından homojen bir şekilde siyah-beyaz noktacılar meydana gelecek şekilde boyanmışlardır.

Çekme testi sırasında sistem bu boyalı kısımdan her 0.5 saniyede bir görüntü almaktadır. Testin ilk başında alınan görüntü referans olarak kullanılmaktadır. Daha sonraki görüntülerde ise noktacıların yer değişimine bağlı olarak gerinim hesaplanmakta ve yüzey gerinim haritalaması yapılmaktadır. Yüzey gerinim haritası optik ekstansiyometre olarak kullanıldığı gibi, yüzeyde gerinim dağılımı ve gerilim konsantrasyon kısımlarının tespit edilmesi için kullanılır. Gerilim konsantrasyon kısımları, hasar başlama ve yayılma özellikleri açısından bilgi vereceği gibi modelleme çalışmalarında da yararlı bilgiler sağlamaktadırlar. Bu çalışmada kullanılan gerinim haritalama imajları 30x25 mm bir imaj için 1392x1040 piksel yani 40 piksel/mm çözünürlüktedir.



Şekil 10: Çözgü doğrultusunda 0.2% (a), 0.6% (b) ve 1.08% (c) gerinim seviyelerinde elde edilmiş yüzey gerinim haritaları

Şekil 10, çözgü doğrultusu için hasar başlama öncesi (a) tipik bir gerinim haritalama şeklini göstermektedir. Bu şekil incelendiğinde, gerinim dağılımının tamamen tesadüfi olduğu görülmektedir. Bu tesadüflüğün nedeni katmanların birbirlerinin içine geçmesi olarak belirtilebilir. Ancak yükleme seviyesi arttıkça gerinim dağılımının bariz bir şekilde çözgü ve atkı ipliklerinin kesiştiği kısımlarında yoğunlaştıkları görülmektedir (şekil 10b ve c) özellikle 1.08% seviyesindeki imaj, yüzeydeki çözgü ipliklerinin üzerinde ve çözgü iplikleri arasındaki reçine bölgelerinde maksimum gerinim konsantrasyon bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu durum farklı çalışmalarda [1, 14] öne sürülen görüşler ile uyumludur. Yüzeydeki atkı iplikleri üzerinde ise minimum gerinim bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Dokuma yapıdaki iplik kesişimleri ve kıvrımlar, gerilim dağılımının belirli yerlerde yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Bu durum gerilim konsantrasyon bölgelerinin oluşmasına ve daha erken hasar meydana gelmesine neden olmaktadır.

İpliklerin kıvrım alması, kompozit malzeme iç yapısındaki gerilim-gerinim dağılımını ve kompozit malzeme deformasyon mekanizmasını önemli ölçüde etkilemektedir. İpliklerin kıvrımlı kısımları, ipliklerin içinde ekstra gerilim konsantrasyonuna ve iplik kalınlığı boyunca yüksek gerilim gradyanına neden olur. Bu durum dokuma kompozitlerde belirli noktalarda hasarın daha erken başlamasına ve başladığı yerden kolayca yayılmasına neden olur. Gerilimin malzeme yüzeyinde dağılımı ise nonhomojen bir karakteristiğe sahiptir. Bu durum yapıda ipliklerin kıvrım alması nedeniyledir.

4. SONUÇ

2x2 dimi dokuma çok katmanlı karbon-epoksi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve hasar başlama ve yayılma özellikleri araştırılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Düzlemsel mekanik özelliklerin iplik kıvrımları nedeniyle azaldığı gözlenmiştir. Çekme mukavemetinin aynı özelliklerdeki kıvrımsız UD bir yapıya nazaran 0.65'lik bir faktörle azaldığı tespit edilmiştir.
- Çözgü doğrultusunda uygulanan gerinime bağlı olarak hasar başlama ve yayılması 0.2-0.3% arasında gerçekleşmiştir. Bu değer aynı özelliklerdeki kıvrımsız yapıya göre düşüktür.
- Çözgü doğrultusunda hasar başlama, iplilerin kıvrım aldıkları veya birbirleri ile kesiştikleri kısımlarda lif matriks ayrılmaları şeklinde başlamaktadır, gerilim seviyesi arttıkça lif kırılmaları meydana gelmekte ve başlayan çatlaklar derinleşerek yayılmaktadır.
- Çatlakların başlaması Young modülünde birden bir düşüş meydana getirmemektedir. Ancak çatlaklar yapıda arttıkça, Young modülü tedrici olarak azalmaktadır. Kopma meydana gelinceye kadar Young modülünün 26% düştüğü gözlenmiştir.
- Yüksek lif hacimsel oranından dolayı kompozit yapı içinde kumaş katmanlarının birbiri içine girmesi, katmanlar arası delaminasyonu azaltmaktadır.
- İplik kıvrımları yapıda homojen olmayan bir gerilim dağılımına neden olmaktadır. Bu durum gerilim konsantrasyon bölgelerinin meydana gelmesine neden olmakta ve bu noktalarda hasar daha erken başlamaktadır.
- Yapıdaki gerilim dağılımı kumaş konstrüksiyonu ile ilişkilidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak BİDEB-2219 kapsamında, K.U. Leuven MTM'de gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya olan katkılarından dolayı Stepan V. Lomov, Bart Pelgrims ve Kris Van de Staye'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- 1- Lomov, S.V, Bogdanovich, A.E., Ivanov, D.S., Mungalov, D., Karahan, M., Verpoest, I., A comparative study of tensile properties of non-crimp 3d orthogonal weave and multi-layer plain weave e-glass composites. Part 1: materials, methods and principal results, *Composites A*, 40, 1134–1143 (2009).
- 2- Ivanov, D.S., Lomov, S.V, Bogdanovich, A.E., Karahan, M., Verpoest, I., A Comparative study of tensile properties of non-crimp 3d orthogonal weave and multi-layer plain weave e-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results, *Composites A*, 40, 1144–1157 (2009).
- 3- Lomov S.V., Bogdanovich A. E., Ivanov D. S., Mungalov D., Verpoest I., Karahan M., Damage progression in 2D and non-crimp 3D woven composites, *Composites 2009 2nd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites*, 1-3 April 2009, Imperial College London, UK.

- 4- Lomov S. V., Bogdanovich A. E., Ivanov D. S., Hamada K., Kurashiki T., Zako M., Karahan M., and Verpoest I., Finite element modelling of progressive damage in non-crimp 3D orthogonal weave and plain weave E-Glass composites, *2ND WORLD CONFERENCE ON 3D FABRICS*, April 6-7, 2009, Greenville, South Carolina, USA.
- 5- Lomov S. V., Gorbatikh L., Greef N., Karahan M., Godara A., Mezzo L., Luizi F., Verpoest I., Nano-engineered fibre reinforced composite: Gain in properties and limitations of the manufacturing, *14TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, 7-10 June 2010, Budapest, Hungary.
- 6- Gao, F., Boniface, L., Ogin, S. L., Smith, P. A., Greaves, R. P., Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: Part 1. Observations of damage accumulation, *Composites Science and Technology*, 59(1), 123-136 (1999).
- 7- Daggumati, S. , De Baere, I. , Van Paepegem, W, Degrieck, J., Xu, J., Lomov, S.V., Verpoest, I., Meso-scale modelling in thermoplastic 5-harness satin weave composite, *ICCM-17, 17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, 27-31 July (2009).
- 8- John, S., Herszberg, I., Coman, F., Longitudinal and transverse damage taxonomy in woven composite components, *Composites Part B*, 32, 659-668 (2001).
- 9- El Hage, Ch., Aboura, Z., Younes, R., Benzeggagh, M.L., Zoeter, M., Experimental damage studies of 2.5D interlock CFRP under uniaxial loading, *Proceeding of ECCM-12*, Biarritz, France, Aug. 29–Sept. 1, (2006).
- 10- Bogdanovich, A.E., Lomov, S.V., Karahan, M., Mungalov, D., and Verpoest, I., Quasi-static and fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric. Part 1: Stiffness and strength, *Composites Part A*, submitted.
- 11- Karahan, M., Lomov, S.V., Bogdanovich, A.E., and Verpoest, I., Quasi-static and fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric. Part 2: Damage monitoring and analysis, *Composites Part A*, submitted.
- 12- Karahan, M., Lomov, S.V., Bogdanovich, A.E., and Verpoest, I., Quasi-static and fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric. Part 3: Fatigue behaviour, *Composites Part A*, submitted.
- 13- Lomov, S.V., Ivanov, D.S., Truong, T.C., Verpoest, I., Baudry, F., Vandenbosche, K., Xie H., Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in tensile test, *Composites Science and Technology*, 68, 2340-2349 (2008).
- 14- Masters, J.E., Ifju, P.G., A phenomenological study of triaxially braided textile composites loaded in tension, *Composites Science and Technology*, 56, 347-358 (1996).
- 15- Quek, S.C., Waas, A.M., Shahwan, K.W., Agaram, V., Compressive response and failure of braided textile composite: Part 1 – experiments, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39, 635-648 (2004).
- 16- Truong, C. T., Vettori, M., Lomov, S. V., Verpoest, I., Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 4: Mechanical properties of composites and damage observation, *Composites Part A*, 36, 1207-1221 (2005).
- 17- Edgren, F., Mattsson, D., Asp, L.E., Varna, J., Formation of damage and its effects on non-crimp fabric reinforced composites loaded in tension, *Composite Science and Technology* 64, 675-692 (2004).
- 18- Verpoest, I., Lomov, S.V., Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis, *Composites Science and Technology*, 65, 2563–2574 (2005).

- 19- Karahan, M., Lomov S., V., Bogdanovich, A. E., Mungalov, D., Verpoest, I., Internal geometry evaluation of non-crimp 3D orthogonal woven carbon fabric composite, accepted paper in pres, *Composite Part A*, doi:10.1016/j.compositesa.2010.05.014, (2010).
- 20- Shioya, M., Yasui, S., Takaku, A., A refined method for estimating fiber and interfacial shear strength by using a single-fiber composite. *Composite Interfaces*, 4(6):379–99 (1997).
- 21- Lomov, S.V., Ivanov, D.S., Truong Chi, T., Verpoest, I., Baudry, F., Vanden Bosche, K., and Xie, H., Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test, *Composites Science and Technology*, 68, 2340–9 (2008).
- 22- Lomov, S.V., Ivanov, D.S., Verpoest, I., Zako, M., Kurashiki, T., Nakai, H., Molimard, J., and Vautrin, A., Full field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites, *Composites A* 39,1218–31 (2008).
- 23- Lomov, S.V., Gusakov, A.V., Huysmans, G., Prodromou, A., and Verpoest, I., Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites, *Composites Science and Technology*, 60,2083-2095 (2000).
- 24- Dadkhah, M.S., Flintoff, J.G., Kniveton, T., and Cox, B.N., Simple Models for Triaxially Braided Composites, *Composites*, 26, 91-102 (1995).
- 25- Masters, J.E, Naik, R.A., Minguet, P.J., Effects of preform architecture on modulus and strength of 2-D triaxially braided textile composites, in *Mechanics of Textile Composites Conference*, ed. C. C. Poe, Jr., and C. E. Harris, NASA Conference Publication 3311, Part 2, pp 349-378.
- 26- Minguet, P.J., Fedro, M.J., and Gunther, C.K., *Test methods for textile composites*, NASA Contractor Report 4609, Boeing Defense and Space Group, Philadelphia, 1994.
- 25- Curtis, P.T. and Bishop, S.M., An assessment of the potential of woven carbon fibre-reinforced plastics for high performance applications, *Composites* 15(14), 259-265 (1984).
- 27- Curtis, P.T. and Moore, B.B., A comparison of the fatigue performance of woven and non-woven CFRP laminates, *Proceeding of ICCMV*, San Diego, 1985, pp. 293-314.
- 28- Cox, B.N., Flanagan, G., Handbook of analytical methods for textile composites, Version 1.0. Rockwell Science Center, (Chapter 3)(1996).
- 29- Lee, B., Herszberg, I., Bannister, M.K., Curiskis, J.I., Effect of weft binder path length on the architecture of multi-layer woven carbon preform, in *Proceeding of the 11th International Conference on Composite Materials*, Scott ML, editor. Vol. V. Australian Composite Structures Society, Melbourne, Australia, 1997. p. 260.
- 30- Leong, K.H., Lee, B, Herszberg, I., Bannister, M.K., The effect of binder path on the tensile properties and failure of multilayer woven CFRP composites, *Composites Science and Technology*, 60, 149-156 (2000).
- 31- Lee, B., Leong, K.H., Herszberg, I., The effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(8) 652-670 (2001).
- 32- Zako, M., Uetsuji, Y., Kurashiki, T., Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials, *Composites Science and Technology*, 63,507–16 (2003).
- 32- Kurashiki, T., Zako, M., Hiroswawa, S., Lomov, S.V., Verpoest, I., Estimation of a mechanical characterization for woven fabric composites by FEM based on damage mechanics, in: *Proceedings ECCM-11*, 2004, Rodos; 2004 [CD edition].
- 33- Kurashiki, T., Zako, M., Nakai, H., Imura, M., Hiroswawa, S., Damage development of woven composites based on multi-scale analysis, in: *Proceedings of the 16th international conference on composite materials (ICCM-16)*, 2007, Kyoto; 2007 [CD edition].
- 34- Lomov, S.V., Verpoest, I., Peeters, T., Roose, D., Zako, M., Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate, *Composites Science and Technology*, 63(7), 993-1007 (2003).
- 35- Ito, M., Chou, T.W., An analytical and experimental study of strength and failure behaviour of plain weave composites, *Journal of Composite Materials*, 32(1): 2-30 (1998).