



## Experimental investigation of pinned joints in NCF Glass-Fibre reinforced composite plates

Oğuzcan İnal\* , Akın Ataş 

Department of Mechanical Engineering, Balıkesir University, Balıkesir, 10145, Turkey

### Highlights:

- Damage mode and mechanisms of pinned joints in quasi-unidirectional glass NCF composite layups were investigated
- Cross-ply layups of this particular material system were less sensitive to the lateral support provided by bolt clamping force.
- Initial damage starts at the 0° bundles as a fibre micro-buckling mode.

### Keywords:

- Non-crimp fabric composites,
- Pinned Joints,
- Glass fibre reinforced polymer composites,
- Micro-buckling

### Article Info:

Received: 28.03.2017

Accepted: 18.01.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416441

### Acknowledgement:

Oğuzcan İNAL wishes to acknowledge the Turkish Higher Council of Education (YÖK) within the Academic Training Programme (ÖYP). This study was funded by Scientific Research Projects Department (BAP) of Balıkesir University under the Project BAP.2017.005.

### Correspondence:

Author: Oğuzcan İnal

e-mail:

inal@balikesir.edu.tr

phone: +90 266 612 1194

### Graphical/Tabular Abstract

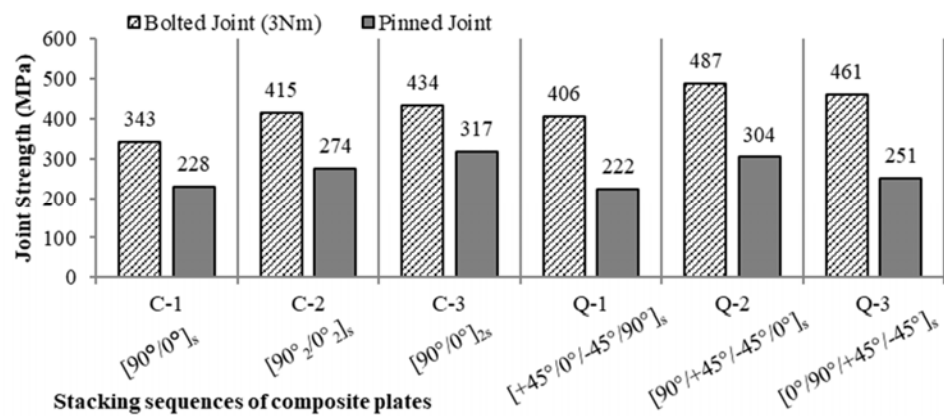


Figure A. Pin joint test results of glass non-crimp fabric (NCF) composite plates.

**Purpose:** The main goals of this study were to observe the damage mode and measure the strength of pin joints in selected quasi-unidirectional glass NCF composite layups and provide recommendations for their optimum design.

### Theory and Methods:

The specimen preparation and the mechanical tests were conducted according to the ASTM D-5961 standard test method. Damage analysis of tested specimens was carried out by optical micrography and transparent light photography.

### Results:

The results of pinned joint tests are shown and compared with bolted configurations of the same layups in the Fig. A. The pin joint strength was decreased for all layups due to the lack of lateral support provided by the bolt head and nut. However, the cross-ply layups were less sensitive to the lateral support in comparison to the quasi-isotropic layups. It was observed that the major cause of the damage initiation was fibre micro buckling at the 0° bundles due to their significantly low compressive strength. In cross-ply layups, the 90° bundles restricted the buckling of the 0° bundles by acting as a lateral support. Also, stacking of the plies in the same direction together resulted in a lower resistance against the bundle buckling.

### Conclusion:

The mechanical performance of the pinned joints of the quasi-unidirectional NCF composites was evaluated experimentally including basic imaging techniques. The results showed that the cross-ply layups have a better performance against pin loading in comparison to the quasi-isotropic layups.



## Kıvrımsız cam elyaf takviyeli kompozit plakalarda pim bağlantılarının deneysel olarak incelenmesi

Oğuzcan İnal\*<sup>ID</sup>, Akın Ataş<sup>ID</sup>

Balikesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Altıeylül, Balıkesir, 10145, Türkiye.

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Pim bağlantılarında hasar
- Kıvrımsız elyaf takviyeli kompozitlerde mekanik bağlantılar
- Kıvrımsız elyaf takviyeli kompozitlerde fiber demeti burkulması

### Makale Bilgileri

Geliş: 28.03.2017  
Kabul: 18.01.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416441

### ÖZET

Bu çalışmada, pim bağlantısına sahip yarı-tek yönlü cam kıvrımsız elyaf (KE) takviyeli kompozit plakaların mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Üç farklı çapraz-katlı ve üç farklı yarı-izotropik elyaf sıralamasına sahip kompozit plakalar vakum destekli reçine transfer yöntemi (VARTM) ile üretilmiştir. Deney numunelerinin pim bağlantısı testleri ASTM D-5961 test standardına göre yapılmıştır. Test sonuçları farklı malzeme ve bağlantı sistemleriyle karşılaştırılmıştır. Son olarak, delik çevresinde hasar oluşan bölgelerin kesitleri optik mikroskopta incelenmiştir.

### Anahtar Kelimeler:

Kıvrımsız elyaf kompozitler,  
pim bağlantıları,  
cam fiber takviyeli polimer  
kompozitler,  
mikro-burkulma

## Experimental investigation of pinned joints in NCF Glass-Fibre reinforced composite plates

### H I G H L I G H T S

- Failure in pinned joints
- Mechanical joints in non-crimp fabric based composites
- Fiber bundle buckling in non-crimp fabric based composites

### Article Info

Received: 28.03.2017  
Accepted: 18.01.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416441

### ABSTRACT

In this study, mechanical behaviour of quasi-unidirectional (quasi-UD) non-crimp fabric (NCF) reinforced composite plates with pinned joints was investigated experimentally. Composite laminates with three different cross-ply and three different quasi-isotropic layups were manufactured with vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM) method. The pin-bearing tests of the specimens were completed according to ASTM D5961 standard. Test results were compared with a different material system and joint configuration. Finally, the cross-sections of damaged areas were inspected with optical microscopy.

### Keywords:

Non-crimp fabric  
composites,  
pinned joints,  
glass fiber reinforced  
polymer composites,  
micro-buckling.

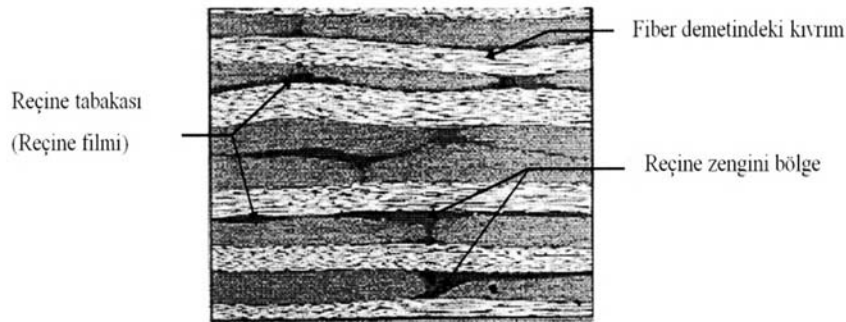
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet değerleri sebebiyle havacılık-uzay, otomotiv ve deniz taşıtları alanlarında gittikçe artan bir kullanım oranına sahip olmaktadır. Bu nedenle kompozit malzeme teknolojileri gün geçtikçe gelişmektedir. Kompozit malzemelerin termal, mekanik, yapısal özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ise çeşitli çalışmalar devam etmektedir. Gelişen teknolojinin bir ürünü olarak farklı malzeme sistemleri de ortaya çıkmaktadır. Tek yönlü prepregler ve dokuma kumaş takviyeli kompozitler uygulamada en çok tercih edilen malzeme sistemleridir. Bunların dışında, kıvrımsız elyaf takviyeli kompozitler de havacılık-uzay, otomotiv, deniz taşıtları, rüzgâr enerjisi sistemlerinde kendilerine yer bulmaktadırlar [1].

Kıvrımsız elyaflar (KE); dikiş iplikleriyle birbirine tutturularak demet haline getirilen fiberlerden oluşan tekstil ürünleridir. Prepreg malzemeler yüksek mukavemet sağlasa da, saklama koşulları nedeniyle raf ömürleri sınırlıdır ve otoklav işlemini de kapsayan yüksek üretim maliyetlerine sahiptirler. Diğer yandan dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri daha ucuzdur fakat dokuma işlemi sırasında oluşan kıvrımlardan dolayı fiberlerin mukavemeti önemli ölçüde azalmaktadır. Kıvrımsız elyaflar ise hem ucuz üretim maliyetlerine ve sınırsız raf ömürlerine hem de fiber demetlerinin kıvrımsız olması sebebiyle iyi mukavemet değerlerine sahiptirler [2-4]. Birçok araştırmacı KE takviyeli kompozitlerin mikro-yapısını deneysel veya nümerik yöntemlerle incelemiştir. Drapier ve Wisnom [5] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak iki boyutlu (2-B) birim hücrede KE kompozitler için basma davranışını modellemiştir. Çapraz-katlı dikişli KE kumaşla üretilen kompozit plakanın modellendiği bu çalışmada 0° fiber demetlerinin mezo-burkulmasının basma yükü altındaki hasarı kontrol ettiğini gözlemlemiştir. Ayrıca 90° fiber demetlerinin 0° fiber demetlerini iyi takviye etmesi halinde mezo-burkulma hasarına karşı iyileşme olacağına değinmişlerdir. Aynı modeldeki sınır koşullarını değiştirerek malzemenin heterojenliğinin ve reçine özelliklerinin kayma davranışını en çok etkileyen faktörler olduğu sonucuna ulaşmıştır [6]. Edgren vd. [7] çekme özelliklerini inceledikleri çalışmada 90° fiber demetlerinin hasarını ve

hasarın ilerlemesini incelemiş ve sınıflandırmışlardır. Öncelikle demet içerisinde başlayan hasarın devamında komşu tabakalara doğru yayıldığı ve sonrasında da yıkıcı hasarın oluştuğunu görmüşlerdir. Mattsson vd. [8, 9] ise çekme davranışı üzerine yaptıkları çalışmada elyaf sıralamasının rijitliği etkilediğini gözlemlemiştir. Bu etki %20 seviyelerine kadar çıkmakla beraber, hasar başlangıcının bu sonucu ortaya çıkardığı görülmüştür. Joffe vd. [10] fiber demetlerindeki kıvrımın basma mukavemetine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Kıvrımın açısı arttıkça basma mukavemetinin düştüğünü gözlemlemiştir. Basma yükünün kıvrımın açısına göre mikro-burkulma ve matris göçmesi şeklinde hasar oluşturduğu sonucuna varmışlardır. Kıvrıma sahip 0° fiber demetinin iki yanının da boşta olması halinde basma yükü altında %0,3 birim uzama değerinde hasara uğradığı, iki yanından da kendisiyle simetrik demetlerle desteklendiğinde ise %0,5'ten biraz daha yüksek birim kısalma değerinde hasara uğradığını gözlemlemiştir. Buradan yola çıkarak yan destek koşullarının da fiber demetlerindeki burkulma hasarı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. KE kompozitlerde fiber demetlerinin arasında, dikiş ipliklerinin geçtiği bölgelerde oluşan boşluklar üretim esnasında Şekil 1'de görüldüğü gibi reçine ile dolmaktadır. Bu bölgelere reçine zengini bölge (RZB) denilmektedir. Mikhaluk vd.'e [11] göre RZB'ler fiber hacim oranı çok düşük olduğu için gerilme yığılmaları oluşturmamakta ve genel yapıya kıyasla erken hasar almaktadırlar.

Kullanılan kompozit malzeme sisteminden bağımsız olarak, tasarımcı açısından en kritik aşamalardan bir tanesi parçaların montajıdır. Montaj işlemi için en çok kullanılan yöntemler yapıştırma, mekanik bağlama (pim, perçin, civata) veya bu iki yöntemin birlikte kullanılmasıdır. Mekanik bağlantılar, bağlantı elemanının ucuz ve kolay bulunabilir olması, tamir/bakım için sökülebilmeye, yüksek yük taşıma/iletme kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir. Fakat bağlantı elemanının içinden geçmesi için açılan delikler yapılar da gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Bu nedenle yapısal bütünlüğün korunabilmesi için kompozit malzeme sistemlerindeki bağlantı bölgelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Kullanılan malzeme sistemi, bağlantı tipi ve geometrisi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak mekanik bağlantılarda en çok gözlemlenen hasar



Şekil 1. Çapraz-katlı plaka kesitinde KE kompozit içyapısı [12] (Microstructure of a cross-ply NCF composite plate section)

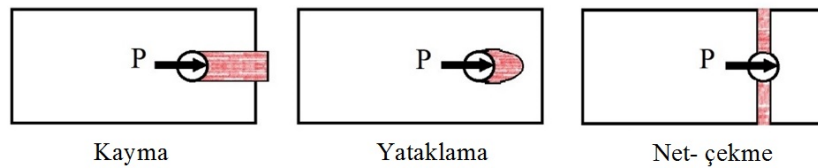
modları Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir. Pim ve/veya cıvata bağlantısına sahip kompozit malzemeler üzerinde yapılan çeşitli deneysel çalışmalar neticesinde farklı geometriler ve yanal destek koşulları (pimli ve cıvatalı) için kompozit plakalar için hasar ilerleyişi ve maksimum yüklerin farklı oldukları görülmüştür. Eriksson [13] yaptığı çalışmada hem pim hem cıvata bağlantılı grafit fiber/epoksi kompozit plakaları incelemiştir. Delik çevresindeki hasarlı bölgede kesit alarak yaptığı incelemelerde, yanal destek bulunması halinde (cıvata bağlantısında) hasarın delikten daha uzakta yoğunlaştığını, yanal desteksiz halde (pimli bağlantıda) ise hasarın deliğin hemen kenarında yoğunlaştığını gözlemlemiştir. Park [14] yaptığı çalışmada sıkma torku ve elyaf sıralamasının mekanik bağlantılarda yatak mukavemetine etkisini incelemiştir. Hem pimli hem cıvatalı bağlantıların incelendiği çalışmadan çıkartılan en önemli sonuç, sıkma kuvveti arttıkça delaminasyon mukavemetinin arttığıdır. Ayrıca hasar da sıkma torku arttıkça pul kenarında yoğunlaşmıştır. Son olarak 90° tabakaların dışta, 0° tabakaların ise orta düzlemde bulunmasının plaka mukavemetini artırdığını ifade etmiştir. Öndürücü vd. [15]  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  ve  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$  cam/epoksi kompozit plakalarda pim bağlantılarını deneysel olarak incelemiştir. e/d ve w/d oranlarının artmasının bağlantı hasar modunu yataklama haline getirdiği ve en yüksek mukavemet değerlerinin yüksek e/d ve w/d oranlarında elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Atas ve Soutis [16] yaptıkları deneysel çalışmada farklı elyaf düzenlerine sahip çapraz-katlı ve yarı-izotropik kompozit plakalarda pim ve elle sıkılmış cıvata bağlantılarını numune geometrilerini de değiştirmek suretiyle incelemiştir. Ayrıca kullandıkları tokluğu artırılmış epoksi matris ve yüksek mukavemetli karbon fiber içeren malzeme sistemi için kritik-altı hasar mekanizmalarını da raporlamışlardır. Khashaba vd. [17] dört farklı elyaf düzeni için pim bağlantılarındaki hasar yükleri ve modlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre, ilk hasar yükü  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  plaka için en yüksek olmasına rağmen maksimum yük  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  plakaya aittir. Ayrıca  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  plakada hasar modu yataklama şeklinde oluşurken,  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  plakada kayma şeklinde oluşmuştur. Wu ve Tsun [18] pim bağlantısına sahip çapraz-katlı kompozit plakalarda başlıca hasar mekanizmasının fiber mikro-burkulması olduğunu kademe kademe yükleme yapıp kesit alarak mikroskop ile gözlemlemiştir. Ayrıca mikro-burkulma sayesinde başlayan hasarın en dıştaki 0° tabakalardan orta düzleme doğru delik çevresinden uzaklaşarak kademe kademe ilerlediğini gözlemlemiştir. Tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerde mekanik bağlantılar hakkında birçok çalışma bulunmasına rağmen, görece yeni olan KE takviyeli

kompozitler gibi malzeme sistemlerinde de mekanik bağlantıların davranışlarının bilinmesi, bu yeni malzeme sistemlerinin çeşitli sektörlerdeki mühendislik yapılarında kullanıma alınabilmeleri açısından önem taşımaktadır. Bu konuda, cıvata bağlantılarındaki hasar ve bu hasarın sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi yazarlar tarafından incelenmiştir. Çalışmada yaygın kullanılan modellerle ve hasar analizi yöntemlerinin KE takviyeli kompozitler için de uygulanabilir olduğu görülmüştür [19]. Bu çalışmanın temel amacı ise pim bağlantılı KE takviyeli kompozit plakaların hasar mekanizmalarının belirlenmesi ve hem aynı malzemenin cıvata bağlantılı konfigürasyonu ile karşılaştırılması hem de klasik prepreg sistemine sahip tek-yönlü kompozitlerle karşılaştırılmasıdır. Bu doğrultuda hem deney numunelerinin görüntüleri karşılaştırılmış, hem de optik mikroskopta hasar incelenmiştir.

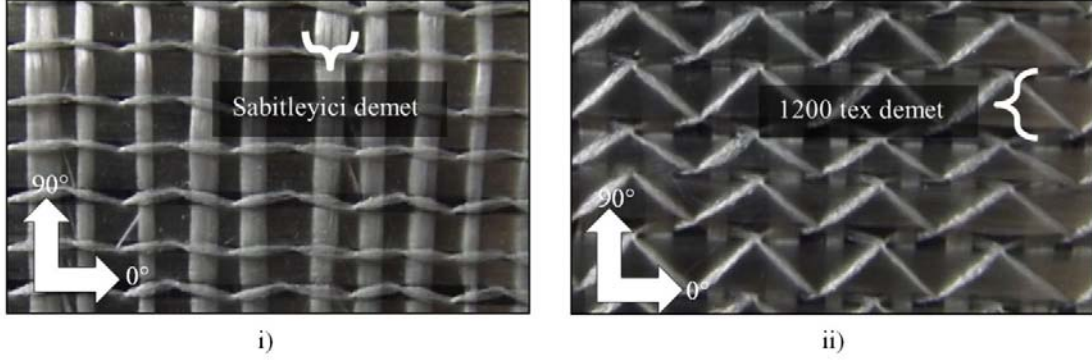
## 2. MALZEME SİSTEMİ VE DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI (MATERIAL SYSTEM AND SPECIMEN PREPARATION)

Çalışmada kullanılan KE kumaş (L300E10C [20]), Metyx A.Ş. tarafından üretilmiştir. Yarı-tekyönlü tek tabaka KE kumaşın tercih edilmesinin sebebi, çok katlı plakalarda tabaka yönlendirme açılarının istenildiği gibi belirlenmesinde sağladığı kolaylıktır. Birbirine dikişli çok katlı KE kumaşlarda ise bazı elyaf düzenlerinin üretilmesi için özel ürünleri temin etmek gerekebilir. Literatürde yarı-tekyönlü [21] olarak anılan bu kumaş aslında hem 0° hem de 90° fiber demetlerinden oluşmaktadır. Fakat 0° ve 90° fiber demetleri sırasıyla 1200 tex ve 68 tex olarak kullanılmıştır. (Tex ifadesi 1km uzunluğa sahip fiber demetinin kütleini ifade etmektedir.) 68 tex 90° fiber demetleri mukavemet sağlamaktan ziyade 1200 tex 0° fiber demetlerini sabitlemek ve kumaştaki dikiş performansını artırmak amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan yarı-tekyönlü kumaşın ön ve arka yüzlerine ait birer fotoğraf Şekil 3’te gösterilmiştir. Dikiş özelliklerini de içeren tekstil detayları ise Tablo 1’de verilmiştir.

Kompozit plaka üretiminde vakum destekli reçine transfer yöntemi (VARTM) kullanılmıştır. Oda sıcaklığında kürleşebilen Hexion L160 epoksi reçine, Hexion H160 sertleştiricisiyle 4:1 oranında karıştırılmış ve sıvı haldeki reçine-sertleştirici karışımı 300mm × 300mm düz kalıba vakum ile emdirildikten sonra plaka -700mmHg basınç altında 16-20 saat boyunca kürleşmeye bırakılmıştır. Kürleme işlemi bittikten sonra kalıptan çıkartılan 8 tabakalı plakaların ortalama kalınlığı 2,5 mm olarak, 4 tabakalı plakaların kalınlığı ise 1,25 mm olarak (bir tabaka kalınlığı



Şekil 2. Mekanik bağlantılarda hasar modlarının şematik gösterimi (Schematic of failure modes in mechanically fastened joints)



**Şekil 3.** Metyx L300E10C yarı-tekyönlü cam KE kumaş, i) ön yüz ve ii) arka yüz  
(Metyx L300E10C quasi-UD glass NCF, i) front face and ii) back face)

**Tablo 1.** Yarı-tekyönlü KE tekstil kumaş detayları [20]. (Details of the quasi-UD NCF textile.)

Metyx L300E10C		Tabaka	Fiber türü	Alan ağırlığı
Dikiş ölçüsü	10 dikiş/inç	0°	1200 Tex	283 gr/m <sup>2</sup>
Dikiş tipi	Tricot	90°	68 Tex	37 gr/m <sup>2</sup>
Dikiş uzunluğu	3 mm	Dikiş	76 Dtex	10 gr/m <sup>2</sup>
			Toplam:	330 gr/m <sup>2</sup>

0,3125mm) ölçülmüştür. Plakanın fiber hacim oranı ise ASTM D-3171 [22] standardının II numaralı yöntemine (Test Method II) göre göre yaklaşık %45 olarak hesaplanmıştır.

Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra kalıptan çıkartılan plakalarda delikler karbür uçlu matkaplar ile delinmiştir ve plakalar elmas kesiciyle numune boyutlarında kesilmiştir. Pim deliğinin çapı (d) 6 mm'dir. e/d ve w/d oranları ise bütün plakalarda sırasıyla 3 ve 6 olarak sabittir. Her elyaf sıralaması için en az dörder numune test edilmiştir. Deney numunelerine ait şematik bir resim Şekil 4'te görülmektedir.

Pim bağlantılarının incelenmesi planlanan çapraz-katlı ve yarı-izotropik elyaf sıralamaları Tablo 2'de görülmektedir. Bu sıralamalar malzeme sisteminin HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi tek-yönlü prepreg olduğu önceki çalışmalardan alınmıştır [16,24,25] Aynı elyaf sıralamaları kullanılarak, farklı malzeme sistemlerinin aynı mekanik bağlantı koşullarındaki davranışını gözlemlemek hedeflenmiştir.

**Tablo 2.** Pim bağlantılı deney numunelerine ait elyaf sıralamaları ve plaka kodları.

(Stacking sequences and laminate codes of pin bearing test specimens.)

Çapraz-katlı plakalar	Yarı-izotropik plakalar
C-1 [90°/0°] <sub>s</sub>	Q-1 [+45°/0°/-45°/90°] <sub>s</sub>
C-2 [90° <sub>2</sub> /0° <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	Q-2 [90°/+45°/-45°/0°] <sub>s</sub>
C-3 [90°/0°] <sub>2s</sub>	Q-3 [0°/90°/+45°/-45°] <sub>s</sub>

### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bütün pim bağlantılı kompozit plaka deneyleri ASTM D-5961/5961M [23] standardına göre yapılmıştır. Testler 2 mm/dak yer-değiştirme kontrollü olarak Zwick marka mekanik test cihazında tamamlanmıştır. Ölçülen maksimum

yükten %30 yük düşüşü olduğunda cihazla bütünleşik yazılım tarafından deney sonlandırılmış ve ölçülen verilerle yük-yer değiştirme eğrileri her bir numune için kaydedilmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra numuneler ışığı geçiren yapıları sayesinde arka taraflarına konulan kuvvetli ışık kaynağı yardımıyla incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. Numunelerin hasar yükü yük-yer-değiştirme grafiğindeki ilk tepe noktasına (ilk yük düşüşü) tekabül eden yük olarak belirlenmiştir. Hasar yükleri ve yatak mukavemetleri Tablo 3'te listelenmiştir. Yatak mukavemetleri Denklem 1'e göre belirlenmiştir;

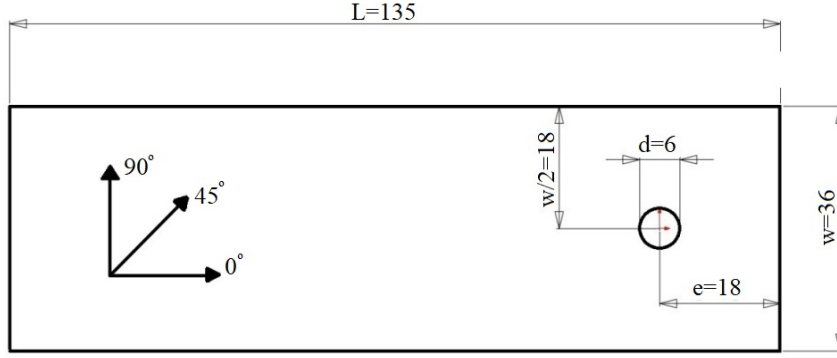
$$\sigma_b = P/(dt) \quad (1)$$

Denklemden  $P$  ilk yük tepe noktasındaki yükü,  $t$  plaka kalınlığını ve  $d$  delik çapını ifade etmektedir.

Deney sonuçlarına göre 3 Nm tork ile sıkılmış cıvata bağlantısına ve aynı elyaf sıralamasına sahip plakalarda olduğu gibi [19,26] çapraz-katlı plakaların mukavemet değerleri büyükten küçüğe doğru C-3, C-2, C-1 olarak, yarı-izotropik plakalarınki ise Q-2, Q-3, Q-1 şeklinde olmuştur. Buradan elyaf sıralamasının bağlantı mukavemeti için belirleyici bir unsur olduğu görülmektedir. Diğer yandan pim bağlantısına sahip çapraz-katlı plakaların mukavemetleri, yarı-izotropik plakalardan ufak bir farkla daha yüksek bulunmuştur. 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantısına sahip bütün plakaların mukavemet değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer Q-2 elyaf sıralamasına ait olmasına rağmen, pim bağlantısında en yüksek mukavemet değeri C-3 elyaf sıralamasına aittir. Bunun başlıca sebebi pim bağlantısında herhangi bir sıkma torku/yanal destek olmadığı için özellikle yüksek basınç gerilmesine maruz kalan pim önündeki bölgede fiber demetlerinin artan yük ile birlikte düzlem-dışı şekil değiştirmeye zorlanmasıdır.

Aynı malzeme sistemi, geometrik özellikler ve elyaf düzenlerine sahip pimli ve 3 Nm sıkma torklu civata bağlantısına sahip cam KE/epoksi plakaların bağlantı mukavemetleri Şekil 5'te birlikte gösterilmiştir. Elyaf sıralamaları aynı olan kompozit plakalara pim bağlantısı uygulandığında bağlantı mukavemetleri; C-1 için %33,5, C-2 için %33,9, C-3 için %26,9, Q-1 için %45,3, Q-2 için %37,5 ve Q-3 için %45 oranında düşmüştür. Yanal desteğin

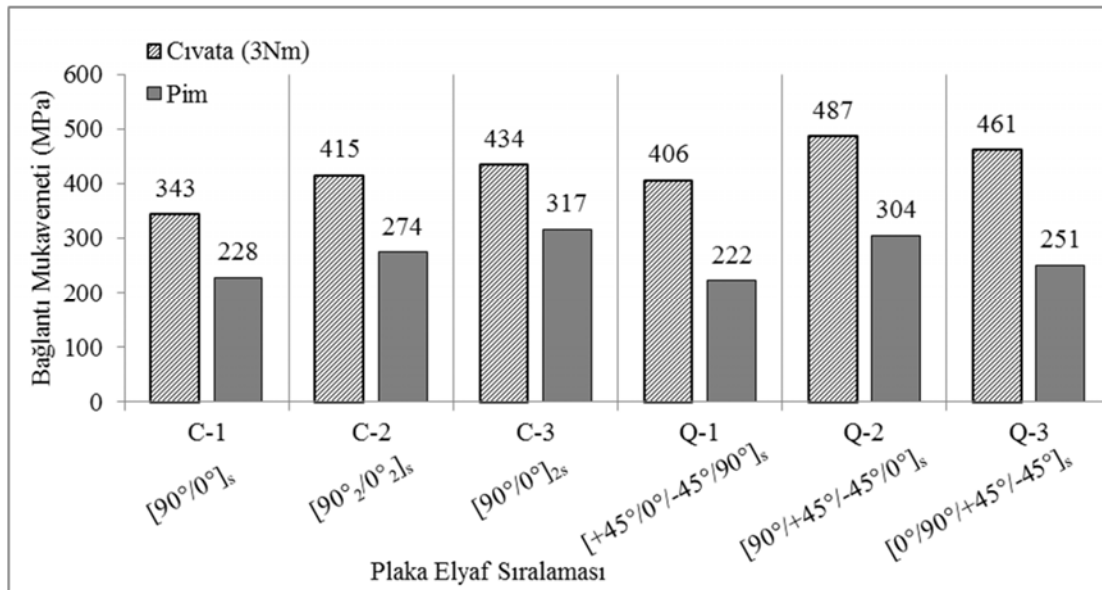
kaldırılması halinde, pim önünde yüksek basınç gerilmelerine maruz kalan fiberler düzlem-içi ve/veya düzlem-dışı burkulmaya uğrayarak bağlantı mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Mikro-burkulma eğiliminin en yüksek olduğu yönlendirme açısı yükün fiber ekseninde geldiği  $0^\circ$  tabakalar olup, en düşük olanı ise yükün fiber eksenine dik geldiği  $90^\circ$  tabakalardır. Buradan yola çıkarak  $0^\circ$  tabakaların komşu tabakalar tarafından en iyi şekilde desteklendiği C-3



Şekil 4. Deney numunesinin geometrisi [23] (Geometry of the test specimen)

Tablo 3. Yatak mukavemetleri ve hasar modları (B: yataklama modu) (Pin bearing strengths and failure modes (B: bearing mode))

Elyaf Sıralaması	Hasar Modu	Hasar yükü (N)		Yatak mukavemeti (MPa)		Varyasyon (%)
		Ortalama	Sapma	Ortalama	Sapma	
		x	s	x	s	
C-1 $[90^\circ/0^\circ]_s$	B	1708	95	228	13	5,5
C-2 $[90^\circ_2/0^\circ_2]_s$	B	4105	256	274	17	6,2
C-3 $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	B	4753	218	317	15	4,6
Q-1 $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$	B	3335	162	222	11	4,8
Q-2 $[90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$	B	4565	228	304	15	5
Q-3 $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$	B	3763	205	251	14	5,4



Şekil 5. 3 Nm sıkma torklu civata bağlantılı [19, 26] ve pimli kompozit plakaların bağlantı mukavemetlerinin karşılaştırılması (Comparison of the bearing strengths of 3 Nm torqued bolted and pinned composite plates [19, 26])

elyaf sıralaması için mukavemet farkı %26,9 iken, en dış yüzünde  $0^\circ$  tabaka bulunduran Q-3 elyaf sıralamasında mukavemet farkının %45 olması açıklanabilir. C-3 elyaf sıralamasında  $0^\circ$  tabakalar her iki tarafından da  $90^\circ$  tabakalarla sınırlandırılmış olup burkulmaya karşı daha stabil bir yapı oluşturulmuştur. Q-3 elyaf sıralamasında ise  $0^\circ$  tabakalar en dış yüzeyde olup sadece bir yandan  $90^\circ$  tabakaya komşudur. Diğer yanları ise serbest yüzeylerdir. Herhangi bir yanal destek de bulunmadığı için Q-3 elyaf sıralamasındaki  $0^\circ$  tabakaların burkulma eğilimleri diğer tabakalardakilere göre yüksektir.

### 3.1. Çapraz Katlı Plakalar (Cross-Ply Laminates)

#### 3.1.1. C-1 $[90^\circ/0^\circ]_s$ elyaf sıralaması (C-1 $[90^\circ/0^\circ]_s$ stacking sequence)

C-1 elyaf sıralamasına sahip pim bağlantılı HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi, 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalardaki hasarlar Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Şekil 6i'de HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi malzeme için (a) enine matris çatlakları, (c) delaminasyon ve (d)  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı görülmektedir. Şekil 6ii'de cam KE/epoksi malzeme için (a) enine matris çatlakları, (c) delaminasyon ve (d)  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı (yataklama hasarı) görülmektedir. Pim bağlantısı için iki farklı malzeme sisteminde de hasarlar benzer şekilde oluşmuştur. Cam KE/epoksi malzeme sistemi için pim ve cıvata bağlantıları karşılaştırıldığında ise cıvata bağlantısında (Şekil 6iii) (a) enine matris çatlaklarının daha geniş alana yayıldığı ve  $90^\circ$  fiber demetlerinde delaminasyon oluştuğu görülmektedir. (d) temas bölgesinde  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı aynı şekilde oluşmuştur fakat cıvata bağlantısında pim bağlantısından daha fazla (e) yayılmıştır. Cıvata bağlantısında ayrıca (b)  $90^\circ$  demetlerde  $0^\circ$  tabakalardaki aksel ayrılmadan dolayı oluşan matris çatlakları da gözlemlenmiştir. C-1 elyaf düzeninde yüklemeye; yüzeydeki  $90^\circ$  tabakalara dik olarak gelmektedir. Bu nedenle deliğin yüklemeye maruz kalan bölgesinde bulunan ilk RZB, fiberler tarafından iletilen yük altında hasar görerek bağlantının ilk hasar yükünü belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 7'deki

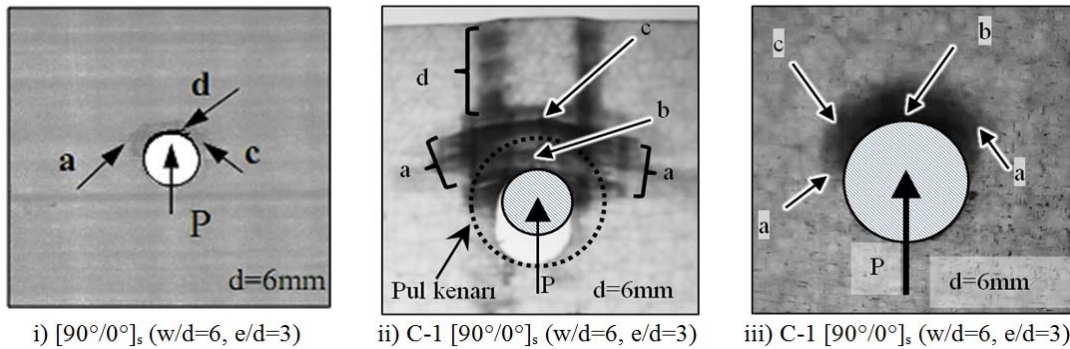
görselde iki farklı C-1 numunesi hasar fotoğrafları ve yük-yer değiştirme eğrileriyle birlikte verilmiştir. RZB'nin delikten uzak olduğu numunede bağlantı rijitliği grafikten de görüleceği üzere ufak bir farkla daha yüksektir. Aynı zamanda  $0^\circ$  tabakalardaki fiber demetlerinin aksel ayrılma hasarı daha net ortaya çıkmaktadır. RZB'nin deliğin hemen bitişiğinde olduğu numuneye bakıldığında ise RZB'de oluşan hasar sonrasında hasarın plakanın enine doğru yayıldığı ve bağlantı rijitliğinin daha düşük olduğu görülmektedir.

#### 3.1.2. C-2 $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ elyaf sıralaması (C-2 $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ stacking sequence)

C-2 elyaf sıralamasına sahip pim bağlantılı HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi, 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalardaki hasarlar Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Şekil 8i'de HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi malzeme için (a) enine matris çatlakları, (b)  $0^\circ$  tabakadaki aksel ayrılma (c) delaminasyon ve (d)  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı görülmektedir. Şekil 8ii'de cam KE/epoksi malzeme için (a) enine matris çatlakları, (b)  $0^\circ$  tabakalar için aksel ayrılma başlangıcı, (c) delaminasyon ve (d)  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı (yataklama hasarı) görülmektedir. Pim bağlantısı için iki farklı malzeme sistemi için de hasarlar aynı şekilde oluşmuştur. Cam KE/epoksi malzeme sistemi için pim ve cıvata bağlantıları karşılaştırıldığında ise cıvata bağlantısında (Şekil 8iii) (a) enine matris çatlaklarının daha geniş alana yayıldığı ve  $90^\circ$  fiber demetlerinde delaminasyon oluştuğu görülmektedir. (d) temas bölgesinde  $0^\circ$  tabakalardaki fiberlerin basma hasarı benzer şekilde oluşmuştur fakat cıvata bağlantısında pim bağlantısından daha fazla (e) yayılmıştır. Cıvata bağlantısında ayrıca (b)  $90^\circ$  demetlerde  $0^\circ$  tabakalardaki kayma hasarından (aksel ayrılmadan) dolayı oluşan matris çatlakları da net olarak gözlemlenmiştir.

#### 3.1.3. C-3 $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$ elyaf sıralaması (C-3 $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$ stacking sequence)

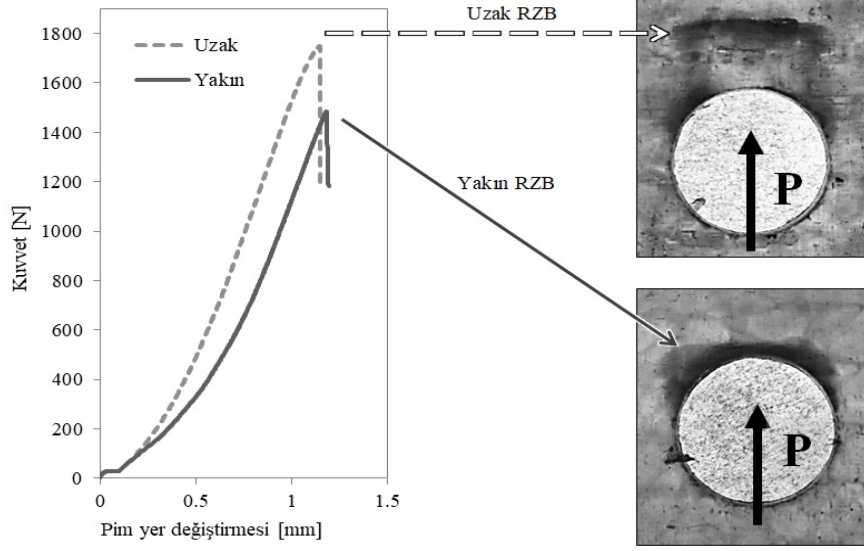
C-3 elyaf sıralamasına sahip 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi



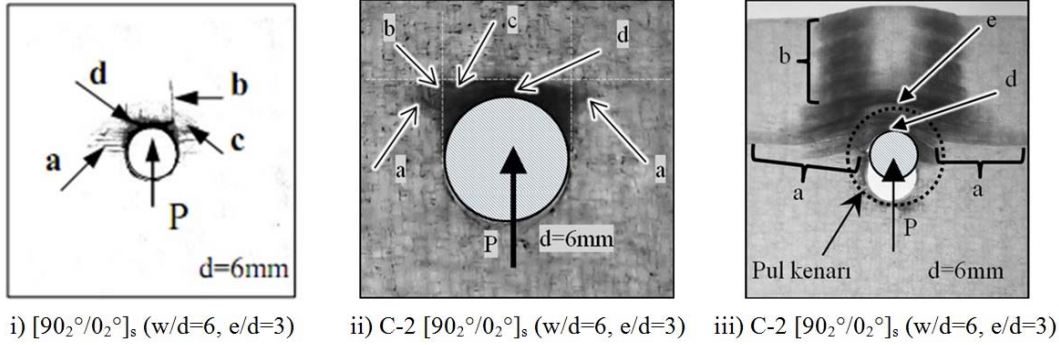
**Şekil 6.** C-1  $[90^\circ/0^\circ]_s$  elyaf sıralamasına sahip i) pim bağlantılı HTS40/977-2 karbon fiber/epoksi [16], ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi ve iii) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19, 26] plakalarda hasar (Damage in C-1  $[90^\circ/0^\circ]_s$  stacking sequence for i) pinned joint of HTS40/977-2 carbon fibre/epoxy [16], ii) pinned joint of glass NCF/epoxy and iii) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19, 26])

plakalardaki hasarlar Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. Cıvata bağlantısında (Şekil 9i) (a) enine matris çatlaklarının daha geniş alana yayıldığı ve (b) 90° demetlerde 0° tabakalardaki kayma hasarından (eksenel ayrılmadan) dolayı oluşan matris çatlakları gözlemlenmiştir. Temas bölgesinde 0°

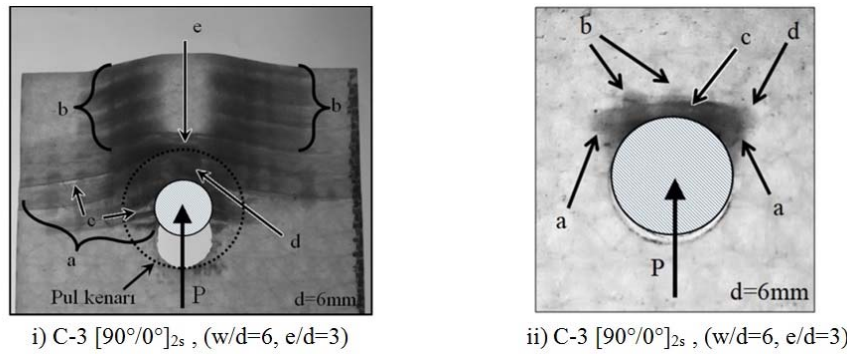
tabakalardaki fiberlerin basma hasarı (d) aynı şekilde oluşmuştur fakat cıvata bağlantısında pim bağlantısından daha fazla (e) yayılmıştır. Yüzeydeki 90° fiber demetlerinin aralarındaki RZB'lerin hasara uğrayarak demetlerin (c) ayrılmasına sebep olduğu da görülmektedir. Şekil 9ii'de cam



Şekil 7. İki farklı uzaklıktaki reçine zengini bölgenin C-1 plakasında oluşturduğu hasarların karşılaştırılması (Comparison of the damage patterns caused by the resin rich zones for two different distances to the hole edge in the C-1 laminate)



Şekil 8. C-2 [90°/0°]s elyaf sıralamasına sahip i) pim bağlantılı HTS40/977-2 karbon fiber /epoksi [16], ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi ve iii) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19,26] plakalarda hasar. (Damage in C-2 [90°/0°]s stacking sequence for i) pinned joint of HTS40/977-2 carbon fibre/epoxy [16], ii) pinned joint of glass NCF/epoxy and iii) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19,26].)



Şekil 9. C-3 [90°/0°]2s elyaf sıralamasına sahip i) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19,26] ve ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalarda hasar.

(Damage in C-3 [90°/0°]2s stacking sequence for i) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19,26] and ii) pinned joint of glass NCF/epoxy.)



KE/epoksi malzeme için (a) enine matris çatlakları, (b) 0° tabakalar için aksenal ayrılma başlangıcı, (c) delaminasyon ve (d) 0° tabakaların basma hasarı (yataklama hasarı) görülmektedir.

### 3.2. Yarı-İzotropik Plakalar (Quasi-Isotropic Laminates)

#### 3.2.1. Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub> elyaf sıralaması (Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub> stacking sequence)

Q-1 elyaf sıralamasına sahip 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalardaki hasarlar Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Cıvata bağlantısında (Şekil 10i) (f) ±45° demetlerde oluşan aksenal ayrılma ve (c) delaminasyon görülmektedir. (d) temas bölgesinde basma hasarı aynı şekilde oluşmuştur fakat cıvata bağlantısında pim bağlantısından daha fazla yayılmıştır. Şekil 10ii'de cam KE/epoksi malzeme için (f) ±45° demetlerde oluşan aksenal ayrılma, (d) temas bölgesinde basma hasarı (yataklama hasarı) ve (c) delaminasyon görülmektedir. Bası yükü altında burkulmaya karşı en dayanıklı olan 90° tabakaların orta düzlemde bulunması plakanın stabilitesini genel olarak düşürmektedir. Bu nedenle yarı-izotropik tabakalar arasında en düşük mukavemet hem cıvata hem pim bağlantısı için Q-1 elyaf sıralamasına aittir. Q-1 elyaf sıralamasının pim bağlantısının cıvata bağlantısı ile arasında ise %45,3 mukavemet farkı bulunmaktadır. Cıvata bağlantısında yanıl destek sayesinde stabilitesi artan tabakalar yük karşısında daha mukavemetli

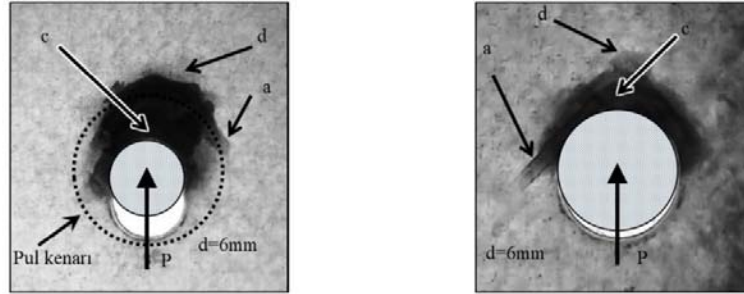
davranmıştır. Dolayısıyla yanıl desteğin mukavemeti en çok etkilediği elyaf sıralaması Q-1 olmuştur.

#### 3.2.2. Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub> elyaf sıralaması (Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub> stacking sequence)

Q-2 elyaf sıralamasına sahip 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalardaki hasarlar Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantısında yüzeyde (a) enine hasarın daha fazla yayıldığı ve 90° fiber demetlerinde ayrılma olduğu oluşturduğu görülmektedir. Buna ek olarak yük altında kalan alanda (d) yataklama modu olduğu ve bu hasarın (e) pul kenarından öteye kadar yayıldığı da görülmektedir. Pim bağlantısında ise bası yüküne maruz kalan bölgede (a) enine matris çatlakları, (c) delaminasyon ve (d) yataklama hasarı oluşmuştur. En dışta 90° tabakanın bulunduğu bu elyaf sıralaması merkezinde de 0° tabakaya sahiptir. 0° tabakanın merkezde olup komşu tabakalar sayesinde tarafından en iyi şekilde desteklenmektedir. Bu durum Q-2 elyaf sıralamasının hem cıvatalı hem de pimli bağlantıda en yüksek mukavemet değerine sahip olmasını sağlamıştır.

#### 3.2.3. Q-3 [0°/90°/+45°/-45°]<sub>s</sub> elyaf sıralaması (Q-3 [0°/90°/+45°/-45°]<sub>s</sub> stacking sequence)

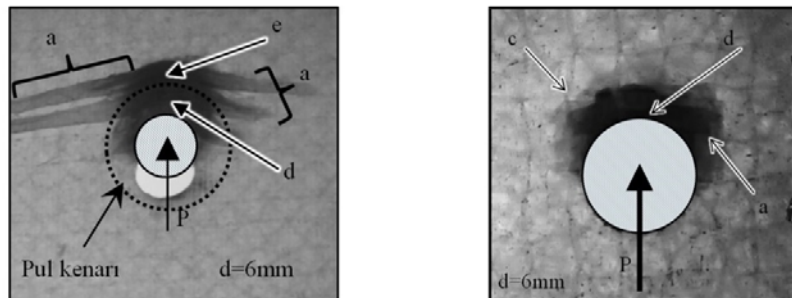
Q-3 elyaf sıralamasına sahip 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi ve pim bağlantılı cam KE/epoksi



i) Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub>, (w/d=6, e/d=3)

ii) Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub>, (w/d=6, e/d=3)

**Şekil 10.** Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub> elyaf sıralamasına sahip i) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19,26] ve ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalarda hasar. (Damage in Q-1 [+45°/0°/-45°/90°]<sub>s</sub> stacking sequence for i) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19,26] and ii) pinned joint of glass NCF/epoxy.)



i) Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub>, (w/d=6, e/d=3)

ii) Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub>, (w/d=6, e/d=3)

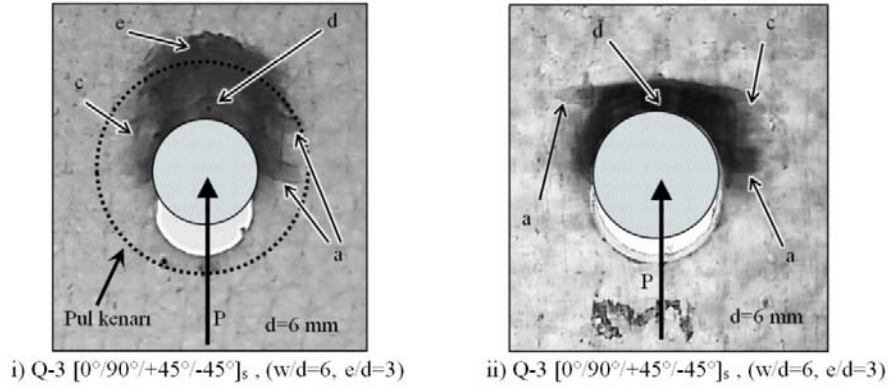
**Şekil 11.** Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub> elyaf sıralamasına sahip i) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19,26] ve ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalarda hasar. (Damage in Q-2 [90°/+45°/-45°/0°]<sub>s</sub> stacking sequence for i) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19,26] and ii) pinned joint of glass NCF/epoxy.)

plakalardaki hasarlar Şekil 12'de karşılaştırılmıştır. Cıvata bağlantısında (Şekil 12i) (a) enine matris çatlakları, (d ve e) pul kenarından daha öteye kadar yayılan yatak hasarı ve (c) delaminasyon da görülmüştür. Pim bağlantısına bakıldığında ise sadece (d) yatak hasarının cıvataadaki kadar yayılmadığı, (c) delaminasyon ve (a) enine matris hasarının benzer şekilde olduğu gözlenmiştir. Q-3 elyaf sıralaması için 3 Nm cıvata ve pimli bağlantılar arasında %45 mukavemet farkı bulunmuştur. Bunun en büyük sebebi  $0^\circ$  tabakanın en dış yüzeylerde bulunmasıdır. En dışta olan bu tabaka sadece bir yandan  $90^\circ$  tabakayla desteklenmektedir. Bu durum  $0^\circ$  tabakadaki fiber demetlerinin kolayca burkulmaya uğramasına ve daha az yük taşımaya neden olmuştur.

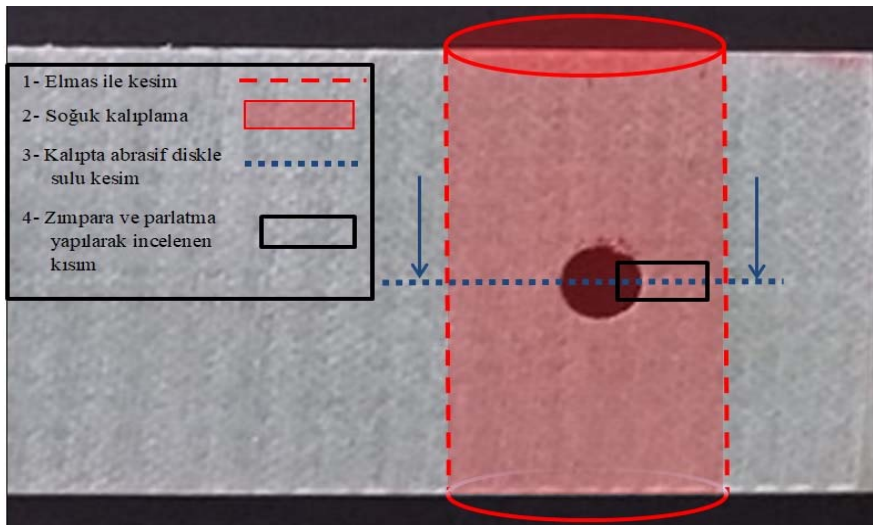
#### 4. OPTİK MİKROSKOPTA HASARLI KESİTLERİN İNCELENMESİ (INSPECTION OF THE DAMAGED CROSS-SECTIONS UNDER OPTICAL MICROSCOPY)

Test edilen numunelerden bazıları için pim yüküne maruz kalan kısımda kesit alınarak mikroskopta inceleme yapılmıştır. Bu incelemelerle tabakaların hasar durumları

hakkında daha detaylı fikir sahibi olmak ve içyapıdaki hasar mekanizmalarını gözlemek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda numunelerin önce kalıba alınması gerekmektedir. Sıcak kalıplama/bakalite alma işleminde yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa maruz kalan kompozit plaka bütünlüğünü kaybetmekte ve camlaşma sıcaklığı aşılnca reçine bozularak kesitin dağılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle camlaşma sıcaklığı sıcak kalıplama sıcaklığının altında olan malzemeler için soğuk kalıplama yapılması gerekmektedir. Soğuk kalıplama işlemi için cam KE/epoksi malzeme sisteminin kendi reçinesi olan LR160 epoksi reçine kullanılmıştır. İncelenecek kesitin kalıplama işleminden önce elmas vb. kesicilerle kesilmesi, hasarlı bölgede ister istemez hasarı artıracığı için kalıp içerisindeyken kesme işlemi yapılmıştır. Şekil 13'te görülen kırmızı bölge deney numunesinden ayrıldıktan sonra soğuk kalıplama işlemine tabii tutulmuştur. Kesim için abrasif disk kullanılmıştır. Kesim sırasında soğutma sıvısı kullanılması kesici-numune sürtünmesinden dolayı ortaya çıkan ısının uzaklaştırılarak numunenin zarar görmesini engellemek için önemlidir. Kesim işlemi tamamlandıktan sonra zımpara makinesine

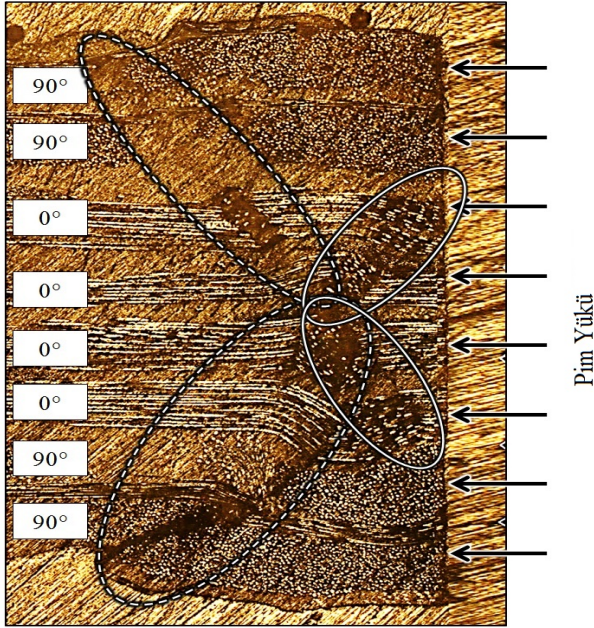


Şekil 12. Q-3  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$  elyaf sıralamasına sahip i) 3 Nm sıkma torklu cıvata bağlantılı cam KE/epoksi [19,26] ve ii) pim bağlantılı cam KE/epoksi plakalarda hasar. (Damage in Q-3  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$  stacking sequence for i) 3 Nm torqued bolted joint of glass NCF/epoxy [19,26] and ii) pinned joint of glass NCF/epoxy.)



Şekil 13. Kesit alınan düzlem ve incelenecek bölge. (Cut plane and inspection area.)

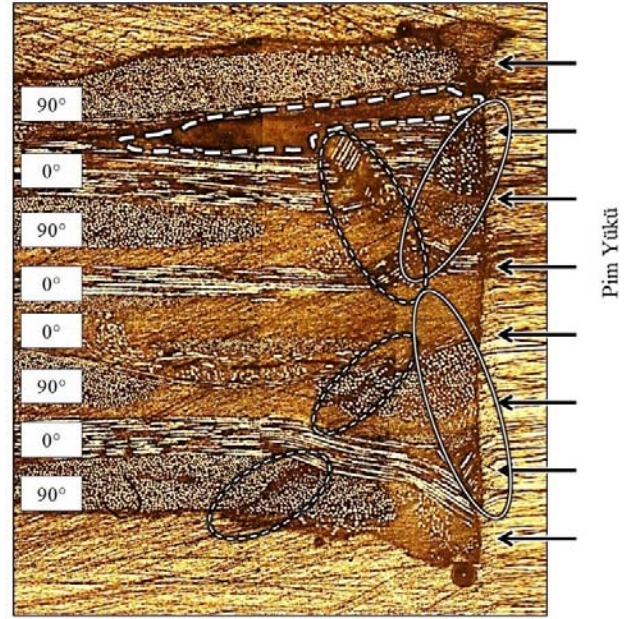
bağlanan numuneler sırasıyla 120, 800 ve 2000 kum numaralarına sahip zımparalar ile incelenecek yüzeyi zımparalandıktan sonra, parlatma diskine yerleştirilmiş ve selülozik tiner kullanılarak parlatma işlemi tamamlanmıştır. C-2, C-3, Q-2 ve Q-3 elyaf sıralamasına sahip plakalarda kesit alınarak inceleme yapılmıştır. Bu plakaların seçilmesinin temel sebebi  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  tabakaların yerleşim farkının oluşturduğu hasar farklılıklarının incelenmesidir. Şekil 14'te C-2 elyaf sıralamasına sahip pim bağlantılı numunenin hasarının mikroskop görüntüsü görülmektedir. Klasik prepreg sistemlerde çapraz-katlı plakalarda dış yüzeyden orta düzleme gidildikçe delik çevresinden uzaklaşan burkulma hasarları oluşmaktadır [18]. Prepreglerdekiyle aynı şekilde  $0^\circ$  tabakalarda düzlem-dışı burkulma hasarının oluşmuş ve fiber demetlerinin bu hasar neticesinde kırıldığı görülmüştür. Sürekli çizgilerin içerisinde kalan bölgede bu hasar görülmektedir. KE takviyenin kullanıldığı bu çalışmada ise bu hasara ek olarak dışarıdaki  $90^\circ$  fiber demetleri arasındaki RZB'lerdeki ve/veya demetlerdeki basma hasarı neticesinde oluşan çatlaklar  $0^\circ$  tabakalarda ikinci bir burkulma hasarının oluşmasına yol açmıştır. Bu çatlaklar Şekil 14'te kesikli çizgiler içerisinde gösterilmiştir. Bu iki hasar tipinden dolayı  $0^\circ$  tabakalarda iki adet burkulma bölgesi oluşmuştur. Hasarları oluşturan çatlaklar ise orta düzlem yakınlarında çakışmaktadır.



**Şekil 14.** C-2 elyaf sıralamasına sahip, test edilmiş pim bağlantılı numunenin delik çevresindeki kesit görüntüsü (Cross-sectional view of the damaged area near the hole edge of tested specimen with C-2 stacking sequence)

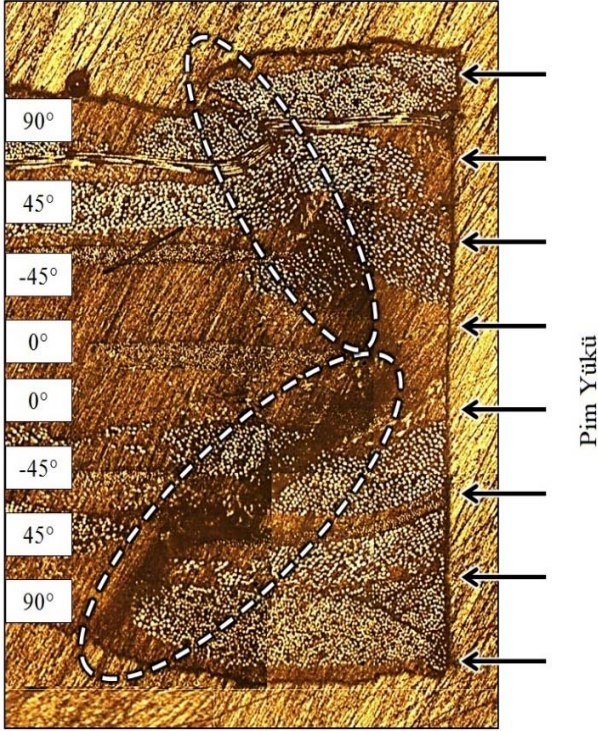
Şekil 15'te görülen C-3 elyaf sıralamasındaki hasar incelendiğinde ise C-2 elyaf sıralamasındaki hasarlara benzer şekilde burkulma hasarının oluştuğu fakat daha kısa oldukları görülmektedir.  $0^\circ$  tabakaların  $90^\circ$  tabakaların arasına dağılması burkulmaya karşı C-3 elyaf sıralamasında C-2'ye göre daha stabil bir yapı oluşturmuştur.

Yükleme sırasında kesitin yukarı yarısında görülen düzensiz kesikli çizgiyle işaretli bölgede  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  tabakalar arasında delaminasyon oluşmuştur. Bu da  $0^\circ$  tabakanın stabilitesini düşürmüş ve burkulma hasarının oluşmasına yol açmıştır. Buna karşılık komşu tabakadan ayrılan  $90^\circ$  tabakada basma hasarı oluşmamıştır. Kesitin alt yarısına bakıldığında ise  $90^\circ$  tabakalarda basma hasarı (kesikli daireler içerisindeki kısım) oluşmuştur. Bu hasar neticesinde oluşan çatlak komşu  $0^\circ$  tabakada burkulmaya sebep olmuştur fakat fiber demetinde burkulma kaynaklı kırılma görülmemektedir. Orta düzlemde bulunan  $0^\circ$  tabakalardan birisi kesitte görülmemektedir. Bunun sebebi ise kesit alınan bölgede o tabakanın RZB'si görüntülenmiştir. Fiber demeti daha derinde bulunmaktadır.

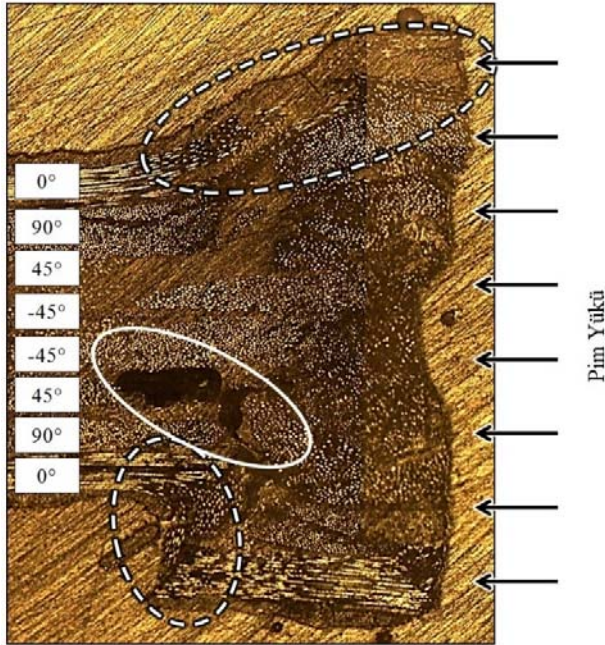


**Şekil 15.** C-3 elyaf sıralamasına sahip, test edilmiş pim bağlantılı numunenin delik çevresindeki kesit görüntüsü (Cross-sectional view of the damaged area near the hole edge of tested specimen with C-3 stacking sequence)

Şekil 16'da Q-2 numunesine ait delik çevresindeki hasarlı bölge görülmektedir. Kesit görüntüsünde merkezdeki  $0^\circ$  tabakaların RZB'leri yakalanabilmiştir. Merkezdeki  $0^\circ$  tabakaların görüntüde bulunmamasının Q-2 elyaf sıralamasındaki hasar mekanizmalarının anlaşılmasında büyük bir etkisinin olmayacağı düşünülmektedir. Zira Şekil 16'da kesikli dairelerin içerisindeki bölgeler dıştaki  $90^\circ$  tabakalarda RZB ve/veya fiber demetinin basma hasarına uğramasıyla başlayan çatlakları ifade etmektedir. Çatlaklar çapraz-katlı numunelerdekine benzer şekilde orta düzleme doğru delik kenarına yaklaşmakta ve birbirleriyle çakışmaktadır. Ayrıca kesitin üst yarısında  $90^\circ/45^\circ$  ara yüzünde bulunan sabitleyici 68 tex demetin hasarı da görülmektedir. Bu hasara bakıldığında sabitleyici demetlerin ayrı bir hasar karakteristiğine sahip olmadığı buldukları yerdeki hasar mekanizmasına riayet ettikleri görülmektedir. Q-3 elyaf sıralamasına sahip numunenin Şekil 17'deki kesit görüntüsüne bakıldığında ise ilk olarak dış yüzeylerde bulunan  $0^\circ$  tabakaların bir taraflarının boşta olmasından dolayı düşen stabiliteilerinin sebep olduğu düzlem-dışı burkulma (üstteki kesikli daire) dikkat çekmektedir.



**Şekil 16.** Q-2 elyaf sıralamasına sahip, test edilmiş pim bağlantılı numunenin delik çevresindeki kesit görüntüsü (Cross-sectional view of the damaged area near the hole edge of tested specimen with Q-2 stacking sequence)



**Şekil 17.** Q-3 elyaf sıralamasına sahip, test edilmiş pim bağlantılı numunenin delik çevresindeki kesit görüntüsü (Cross-sectional view of the damaged area near the hole edge of tested specimen with Q-3 stacking sequence)

Kesitin alt yarısında en dışta bulunan 0° tabakada ise burkulma ve basma hasarı (alttaki kesikli daire) bir arada görülmektedir. Bu hasardan dolayı 0° fiber demeti düzlem-

dışına doğru şekil değiştirmiştir. Bunu takiben ise fiber demeti/matris ara yüzünde delaminasyon/ayrılma (sürekli çizgi içerisindeki kısım) oluşturmuştur. Diğer incelenen elyaf sıralamalarının görüntülerine oranla kesitin delik çevresinde kalınlık yönünde çok büyük miktarda saçıldığı görülmektedir. Düzlem-dışına doğru büyük miktarda burkulmaya uğrayan 0° tabakaların yük taşıma kabiliyetinin de düşmesi neticesinde diğer tabakalardaki hasar yıkıcı şekilde olmuştur. Kesitte net olarak görülmemekle birlikte 45° ve -45° tabakalarda da düzlem-İçi ve dışı burkulma olduğu anlaşılmaktadır. Q-3 elyaf sıralamasına sahip 3 Nm torklu civata bağlantılı ve pim bağlantılı numuneler arasında %45 civarı mukavemet farkının oluşmasının başlıca sebebinin düzlem-dışı burkulma miktarının fazla olması olduğu anlaşılmaktadır. Benzer bir durum Q-1 elyaf sıralaması için de geçerlidir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada pim bağlantısına sahip cam KE/epoksi malzemelerin mekanik deneyleri ve mikroskop altında hasarlı bölgelerin incelenmesi yapılmıştır. Mekanik deneylerdeki hasar sonuçları 3 Nm torklu civata bağlantısına sahip aynı cam KE/epoksi malzeme ve pim bağlantısına sahip HTS40/977-2 karbon fiber malzeme [16, 25] ile karşılaştırılmıştır. Farklı malzeme sistemlerine sahip pim bağlantılı kompozit plakalar için hasar modlarının benzer olduğu görülmüştür. Aynı malzeme sistemine sahip pim bağlantılı ve 3 Nm torklu civata bağlantılı kompozit plakalar içinse hasar modlarının benzer karakteristiğe sahip olduğu, mukavemetlere bakıldığında ise en az %27 (C-2 elyaf sıralaması) ve en çok %45 (Q-1 elyaf sıralaması) mukavemet farkı olduğu görülmüştür. Bu mukavemet farklarının sebebinin anlaşılması için delik çevresindeki hasarlı bölgede kesit alınarak mikroskopta inceleme yapılmıştır. Mikroskop incelemelerinde 0° tabakalarda düzlem-dışı burkulma hasarının olduğu görülmüştür. Bu burkulma hasarının klasik prepreg sistemlerdekiyle benzer ve farklı yanlarına değinilmiştir. RZB ve fiber demetlerinden (takviye fazının yapısından) dolayı ortaya çıkan bir hasar da gözlemlenmiştir. Bu hasar dış tabakalarda delik kenarından uzakta olup, plaka orta düzlemine doğru delik kenarına yaklaşarak ilerlemektedir.

Mevcut malzeme sisteminde pim bağlantılı konfigürasyonlarında optimum mukavemet sonuçları elde etmek için plakanın en dışında 90° kullanılması, 0° tabakaların ise plakanın en dışında kullanılmaktan kaçınılması gerekmektedir. Q-3 elyaf sıralamasına bakıldığında en dışta bulunan 0° tabakaların komşular tarafından iyi desteklenmediği için burkulma hasarına karşı daha zayıf oldukları görülmüştür. Ayrıca C-2 ve C-3 elyaf sıralamaları göz önüne alındığında aynı yönlendirme açlarına sahip tabakaların birbirleriyle komşu olarak sıralanması yerine, birbirine komşu olan tabakaların farklı yönlendirme açlarına sahip olmasının da pim bağlantısı mukavemetine olumlu etkisi olacağı gözlemlenmiştir.

**TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENTS)**

Oğuzcan İNAL Yükseköğretim Kurulu'na (YÖK), Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında sağladığı destekten ötürü teşekkür eder. Bu çalışma, BAP.2017.0005 numaralı Araştırma Projesi kapsamında Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Lomov S.V., Non-crimp fabric composites: manufacturing, properties and applications Elsevier, 2011.
2. Bibo G., Hogg P., Backhouse R. and Mills A., Carbon-fibre non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures, *Composites Science and Technology*, 58 (1), 129-143, 1998.
3. Bibo G., Hogg P. and Kemp M., Mechanical characterisation of glass-and carbon-fibre-reinforced composites made with non-crimp fabrics, *Composites Science and Technology*, 57 (9), 1221-1241, 1997.
4. Hogg P.J., Ahmadnia A. and Guild F.J., The mechanical properties of non-crimped fabric-based composites, *Composites*, 24 (5), 423-432, 1993.
5. Drapier S. and Wisnom M.R., Finite-element investigation of the compressive strength of non-crimp-fabric-based composites, *Composites Science and Technology*, 59 (8), 1287-1297, 1999.
6. Drapier S. and Wisnom M.R., A finite-element investigation of the interlaminar shear behaviour of non-crimp-fabric-based composites, *Composites Science and Technology*, 59 (16), 2351-2362, 1999.
7. Edgren F., Mattsson D., Asp L.E. and Varna J., Formation of damage and its effects on non-crimp fabric reinforced composites loaded in tension, *Composites Science and Technology*, 64 (5), 675-692, 2004.
8. Mattsson D., Joffe R. and Varna J., Damage in NCF composites under tension: effect of layer stacking sequence, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (9), 2666-2682, 2008.
9. Mattsson D., Joffe R. and Varna J., Methodology for characterization of internal structure parameters governing performance in NCF composites, *Composites Part B: Engineering*, 38 (1), 44-57, 2007.
10. Joffe R., Mattsson D., Modniks J. and Varna J., Compressive failure analysis of non-crimp fabric composites with large out-of-plane misalignment of fiber bundles, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (8), 1030-1046, 2005.
11. Mikhailuk D., Truong T., Borovkov A., Lomov S.V. and Verpoest I., Experimental observations and finite element modelling of damage initiation and evolution in carbon/epoxy non-crimp fabric composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (9), 2751-2766, 2008.
12. Miller A., The effect of microstructural parameters on the mechanical properties of non-crimp fabric composites, Cranfield University, 1996.
13. Eriksson I., On the bearing strength of bolted graphite/epoxy laminates, *Journal of Composite Materials*, 24 (12), 1246-1269, 1990.
14. Park H.J., Effects of stacking sequence and clamping force on the bearing strengths of mechanically fastened joints in composite laminates, *Composite Structures*, 53 (2), 213-221, 2001.
15. Öndürücü A., Esendemir Ü. and Tunay R.F., Progressive failure analysis of glass-epoxy laminated composite pinned-joints, *Materials & Design*, 36, 617-625, 2012.
16. Ataş A. and Soutis C., Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CFRP composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 54, 20-27, 2013.
17. Khashaba U., Sebaey T., Mahmoud F., Selmy A. and Hamouda R., Experimental and numerical analysis of pinned-joints composite laminates: Effects of stacking sequences, *Journal of Composite Materials*, 47 (27), 3353-3366, 2013.
18. Wu P. and Sun C., Modeling bearing failure initiation in pin-contact of composite laminates, *Mechanics of Materials*, 29 (3), 325-335, 1998.
19. İnal O., Balıkoğlu F. and Ataş A., Bolted joints in quasi-unidirectional glass-fibre NCF composite laminates, *Composite Structures*, 183, 536-544, 2018.
20. Datasheet for L300E10C, Metyx A.Ş.
21. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov, S.V. and Verpoest I., Quasi-UD glass fibre NCF composites for wind energy applications: a review of requirements and existing fatigue data for blade materials, *Mechanics & Industry*, 14 (3), 175-189, 2013.
22. ASTM D-3171-11 Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, 2012.
23. ASTM D 5961/D 5961 M-05 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, 2001.
24. Ataş A. and Soutis C., Application of cohesive zone elements in damage analysis of composites: Strength prediction of a single-bolted joint in CFRP laminates, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 66, 96-104, 2014.
25. Ataş A. and Soutis C., Strength prediction of bolted joints in CFRP composite laminates using cohesive zone elements, *Composites Part B: Engineering*, 58, 25-34, 2014.
26. İnal O., Kıvrımsız Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Plakalarda Cıvata Bağlantılarının Deneysel ve Nümerik olarak İncelenmesi, Master's Thesis, Balıkesir University, Balıkesir, 2017.

