



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Fiber takviyeli kompozitlerin farklı deformasyon hızındaki Mod I ve Mod I/II kırılma davranışlarının incelenmesi

Investigation of Mode I and Mode I/II fracture behavior at different deformation rates of fiber reinforced composites

Yazar(lar) (Author(s)): Zafer KAYA¹, Hüseyin Ersen BALCIOĞLU², Halit GÜN³

*ORCID*¹: 0000-0002-5489-3997

*ORCID*²: 0000-0002-8579-5142

*ORCID*³: 0000-0001-8107-5036

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaya Z., Balcıoğlu H. E. ve Gün H., “Fiber takviyeli kompozitlerin farklı deformasyon hızındaki Mod I ve Mod I/II kırılma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 843-853, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.707130

Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Deformasyon Hızındaki Mod I ve Mod I/II Kırılma Davranışlarının İncelenmesi

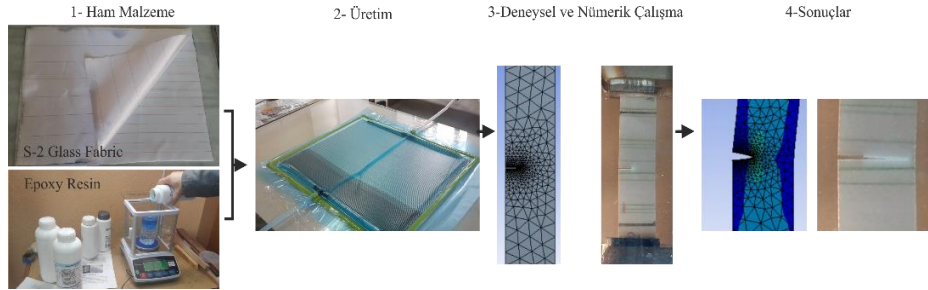
Investigation of Mod I and Mode I/II Fracture Behavior at Different Deformation Rates of Fiber Reinforced Composites

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Aynı çatlak boyutuna sahip numunelerin test sonuçları deformasyon hızı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermiştir./ The test results of the samples with the same crack size showed that the load carrying capacity increased as the deformation rate increased.
- ❖ Mod I ve Mod I/II çatlak ucu açılma durumunda, aynı deformasyon hızı için, çatlak boyu artarsa, kırılma tokluğu değeri %83,89'a kadar artış gösterdiği görülmüştür./It has been observed that in Mode I and Mode I/II crack tip onset status, if the crack length increases for the same deformation rate, the fracture toughness value increases up to 83.89%.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Deneyel ve nümerik çalışmaları aşamaları / The Stages of experimental and numerical study



Şekil. Deneyel ve nümerik çalışmaları aşamaları /Figure. Stages of experimental and numerical study

Amaç (Aim)

Çatlak uzunluğu, çatlak geometrisi ve deformasyon hızının tabakalı kompozitlerin kırılma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır./ The effects of crack length, crack geometry and deformation rate on the fracture behavior of laminated composites were investigated.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

S-2 cam/epoksi tabakalı kompozitlerin üretimi için vakum destekli reçine transfer metodu kullanılmıştır./Vacuum assisted resin transfer material was used for the production of S-2 glass/epoxy laminated composites.

Özgünlük (Originality)

Çatlak başlangıcının deformasyon hızı ve çatlak geometrisi ile olan ilişkisi ifade edilmiştir. / The relationship between crack onset and deformation rate and crack geometry is expressed.

Bulgular (Findings)

Deneyel ve SEY sonuçları hem Mod I hem de Mod I/II çatlak ucu açma koşullarındaki S-2 cam/epoksi lamine kompozit malzemenin kırılma davranışlarının, çatlak geometrisine ve deformasyon hızına duyarlı olduğunu göstermektedir./ Experiments and FEM results show that the fracture behavior of S-2 glass/epoxy composite material is sensitive to environmental temperature and strain rate in both Mode I and Mode I/II crack tip opening conditions.

Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmanın sonuçları, farklı sıcaklık ve farklı deformasyon oranlarında zorlanan özellikle hava araçlarının tasarımlarında, kırılma hasar mekanizmalarının öngörüsü için başvuru kaynağı olarak kullanılabilir./ The results of this study can be used as a reference source for the prediction of fracture damage mechanisms, especially in aircraft designs that are forced at different temperatures and different deformation rates.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Deformasyon Hızındaki Mod I ve Mod I/II Kırılma Davranışlarının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Zafer KAYA¹, Hüseyin Ersen BALCIOĞLU^{2*}, Halit GÜN³

¹ Makine Mühendisliği ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye

² Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye

(Geliş/Received : 21.03.2020 ; Kabul/Accepted : 10.09.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 21.09.2020)

ÖZ

Günümüzde endüstri paydaşları, yapı elemanlarını daha ergonomik, daha hafif ve daha sağlam malzemeler kullanarak üretme yoluna gitmektedirler. Bu durum fiber takviyeli kompozitlerin talebini arttırmıştır. Farklı çalışma koşulları altında kullanılan kompozit malzemelerin, kullanım yerlerine göre sahip olması gereken bir takım mekanik özellikler mevcuttur. Malzemenin bu mekanik davranışlarına etki eden faktörlerden biri de üretim, montaj veya kullanım sırasında meydana gelen çatlak oluşumlarıdır. Tabakalı kompozitlerin kırılma davranışlarına, deformasyon hızı, çatlak uzunluğu ve çatlak geometrisi doğrudan etki eder. Bu çalışmada, farklı uzunluk ve farklı geometride çatlakla sahip S-2 cam/epoksi tabakalı kompozitlerin farklı deformasyon hızlarındaki kırılma davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında 5mm, 10mm ve 15mm çatlak uzunluğuna ve 0° ve 45° çatlak geometrisine sahip test numunelerinin farklı deformasyon hızındaki Mod I (açılma modu) ve Mod I/II (karma mod) kırılma davranışları araştırılmıştır. Çatlak başlangıcı ile deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kırılma testleri $8,3 \times 10^{-3}$, $8,3 \times 10^{-4}$ ve $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ olmak üzere üç farklı deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca S-2 cam / epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma davranışları, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel ve SEY sonuçları hem Mod I hem de Mod I/II çatlak ucu açma koşullarındaki S-2 cam/epoksi lamine kompozit malzemenin kırılma davranışlarının, çatlak geometrisine ve deformasyon hızına duyarlı olduğunu, ayrıca incelenen test parametrelerine göre değiştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kırılma tokluğu, gerininim enerjisi boşalma oranı, deformasyon hızı, çatlak geometrisi, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Investigation of Mode I and Mode I/II Fracture Behavior at Different Deformation Rates of Fiber Reinforced Composites

ABSTRACT

Today, industry stakeholders are producing building elements using more ergonomic, lighter and more strength materials. This has increased the demand for fiber reinforced composites. Composite materials, which used in different environments and loading conditions, must have several mechanical properties according to their use. One of the factors affecting these mechanical behaviors of the material is crack formation that occurs during production, assembly or usage. The deformation rate, crack length and crack geometry directly affect the fracture behavior of the laminated composites. In this study, the fracture behaviors of S-2 glass/epoxy laminated composites having cracks in different lengths and geometries were investigated at different deformation rates experimentally and numerically. Within the scope of the study, the Mode I (opening mode) and Mode I/II (mixed mode) fracture behaviors of the samples with 5mm, 10mm and 15mm crack length and 0° and 45° crack geometry were investigated at different deformation rates. Fracture tests were carried out in three different deformation rates, such as 8.3×10^{-3} , 8.3×10^{-4} and $8.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to express the relationship between crack onset and deformation rate. Also, the fracture behavior of S-2 glass/epoxy laminated composites was analyzed by using the Finite Element Method (FEM). It was found that the results obtained were compatible with each other. Experiments and FEM results show that the fracture behavior of S-2 glass/epoxy composite material is sensitive to environmental temperature and strain rate in both Mode I and Mode I/II crack tip opening conditions and varies according to the investigated test parameters.

Keywords: Fracture toughness, strain energy release rate, deformation rate, crack geometry, Finite Elements Method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozitler, kimyasal olarak birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : c.beyzaince@gmail.com

oluşturduğu gelişmiş malzemelerdir. Polimer bazlı kompozit malzemelerde; yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, hafiflik, üretim kolaylığı, düşük maliyet, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı epoksi, polyester, fenolik ve vinilester gibi matris malzemeleri kullanılmaktadır [1].

Polimer matrisli fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerinde, üretim, montaj veya kullanım sırasında meydana gelen herhangi bir çatlak, yapının beklenmedik bir şekilde ani olarak hasara uğramasına neden olur. Tecrübeler kırılma ile hasara uğrayan yapı elemanlarının can ve mal kaybına neden olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, özellikle can güvenliğinin önem arz ettiği mühendislik yapılarında kullanılacak malzemelerin seçiminde, malzemenin kırılma davranışlarının bilinmesi önemlidir. Çatlağa sahip yapı elemanlarındaki kırılma hasarında, çatlağın konumuna, açısına ve uzunluğuna göre, çatlağın başlaması ve ilerlemesi birbirinden farklı biçimlerde gözlenir. Buna ek olarak, ortam sıcaklığı, malzeme üzerine gelen yükleme durumu gibi faktörler de etkilidir [2]. Kırılma mekaniği çatlağın ilerleyip ilerlemeyeceğini, kritik çatlak uzunluğunu, çatlağı ilerletmek için gereken minimum enerjiyi, verilen bir çatlağın kritik uzunluğa ne kadar zaman sonra ulaşacağını, çatlağın kararsız bir şekilde hızlı mı yoksa yavaş bir şekilde mi ilerleyeceğini ve yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse hangi hızda ilerleyeceğini tahmin etmekte yardımcı olur [3,4].

Kompozit yapı üzerine gelen yükler yapıyı bazen yavaş bazen ani olarak şekil değişimine zorlarlar. Çatlağın bu farklı durumlara karşı gösterdiği davranışlar malzeme seçiminde bilinmelidir. M. Kopietz ve arkadaşları [5] organo-mineral hibrit reçinelerinin eğilme ve kırılma dayanımları üzerine yaptıkları çalışmalarda tek kenar çatlaklı numunelerini farklı deformasyon hızlarında deneye tabi tutmuşlardır. Aktaş ve arkadaşları [6] cam/epoksi tabakalı kompozit plakaların örgü tipinin farklı oranlarındaki mekanik davranış özelliklerinin araştırmışlardır. Çalışmalarında 0,005 s-1, 0,0005 s-1 ve 0,00005 s-1 deformasyon hızlarını kullanmışlardır. Yapılan başka bir çalışmada J. Cui ve arkadaşları [7] uzun fiberli polimer kompozit malzemelerin mekanik ve hasar davranışlarını düşük deformasyon hızlarında (0,001 ve 0,01 s-1) ve yüksek deformasyon hızlarında (1, 10, 100, 200 ve 400 s-1) incelemişlerdir. Z. Jia ve arkadaşları [8] poliüretan yapıştırıcının farklı yükleme hızlarında (0,5mm/dk., 50mm/dk., 500mm/dk.) Mod I kırılma tokluklarını araştırmışlardır. Rojas-Sanchez ve arkadaşları [9] dört noktalı eğilme testleri kullanılarak karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin gerilme hızına bağlı olarak gerilme-gerinim davranışlarını araştırmışlardır. Zhang ve arkadaşları [10] farklı yükleme sıcaklıklarına ve deformasyon hızlarına maruz bırakılan cam elyaf-polipropilen kompozitlerin ara yüzünün moleküler dinamik simülasyonunu kullanarak yüzeyler arası mekanik davranışını incelemektedir.

Kompozit yapıda çatlağın açılmaya başlamasını, çatlağın uzunluğu, açısı ve konumu gibi çatlağın geometrik parametreleri de etkilemektedir. Arasan ve arkadaşları [11] hibrit kompozit plakalarda tek kenar, çift kenar ve merkezi çatlağın özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Kırılma tokluğu üzerine gerçekleştirilen diğer çalışmalarda ise Meng ve Wang [12] kırılma tokluğu üzerine yaptıkları çalışmalarında tek kenar çatlaklı ve merkezi çatlaklı test numuneleri ve

modeller üzerine çalışmışlardır. Satyanarayana ve Gattu [13] değişken yükleme hızları için dokuma lifi-cam/epoksi kompozit tabakaların Mod-I kırılma özelliklerinin belirlenmesinde boyut etkisini araştırmışlardır. Tek kenardan çatlağa sahip kompozit numunelerinin çekme testini gerçekleştirmişlerdir. Siddique ve arkadaşları [14] fiber takviyeli kompozitlerde Mod I kırılma tokluğu üzerine yaptıkları derleme çalışmada fiber ve matris kırılması, örgü şekli, üretim yöntemleri, numune kalınlığı, çekme hızı ve sıcaklık açısından yapılan çalışmaların bir özetini sunmuşlardır.

Kırılma yapı elemanlarında ani gelişen bir hasar türüdür. Özellikle gevrek yapıya sahip termoset matrisli fiber takviyeli kompozit yapılarındaki kırılma durumunda ani gerçekleşen kırılma hasarı can ve mal kayıplarına sebep olabilmektedir. Kırılma hasarı malzemenin maruz kaldığı yüklerin yavaş ya da aniden etki etmesi sonucu meydana gelebilir. Anizotropik yapıya sahip bu malzemelerin yapı elemanı olarak kullanılması için farklı çatlak parametreleri ve farklı yükleme koşulları gibi değişkenler altındaki kırılma davranışlarının bilinmesi önemlidir. S-2 cam fiberler yaygın kullanıma sahip olmamakla birlikte, özellikle yüksek dayanım gerektiren havacılık ve enerji sektörlerindeki uygulamalarda tercih edilen bir fiber türüdür. Bu çalışmada farklı uzunluklarda çatlağa sahip S-2 cam/epoksi tabakalı kompozit malzemenin farklı deformasyon hızlarına bağlı olarak, kırılma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda tek kenardan, 5mm, 10mm ve 15mm uzunluğunda ve 0° ve 45° açıda, çatlak geometrisine sahip S-2 cam/epoksi tabakalı kompozitler üç farklı deformasyon hızında ($8,3 \times 10^{-3}$ s-1, $8,3 \times 10^{-4}$ s-1 ve $8,3 \times 10^{-5}$ s-1) kırılma testlerine tabi tutulmuştur. Kırılma testleri sonucunda her bir test parametresine ait açılma modu (Mod I) ve açılma ile düzlem içi kayma modunun bir arada incelendiği karma mod (Mod I/II) kırılma davranışları incelenmiştir. Ayrıca S-2 cam/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma davranışları ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve her bir deneysel parametre için kırılma tokluğu ve J integral değerleri hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Kompozit Malzemelerin Üretimi (Manufacturing of Composite Materials)

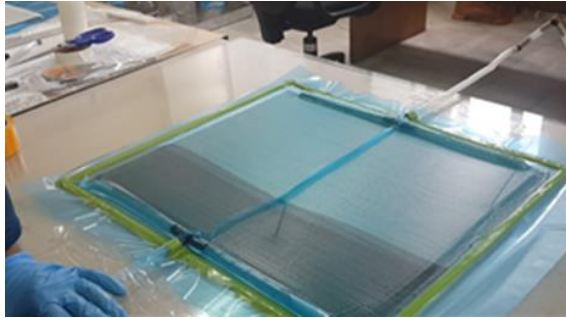
Düz dokuma yapıya sahip S-2 cam kumaşlar Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. şirketinden temin edilmiştir. Ağırlığı 190g/m², kalınlığı 130µm ve çözgü/atki oranı 28,7/27,5'dir. Çizelge 1'de takviye fazı olarak kullanılan S-2 cam fiber malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Matris malzemesi olarak kullanılan iki bileşenli termoset epoksi reçine Hexion firmasından temin edilmiştir. Matris malzemesi epoksi reçine (Hexion MGS L285) ve kürleştirici ajan (Hexion H287) ağırlıkça 100:40

oranında karıştırılarak hazırlanmıştır. Üretimden önce S-2 cam kumaş takviye malzemesi her biri 50×40 cm boyutlarında kesilmiştir. Üniform ıslanma sağlamak ve reçine havuzu oluşumunu önlemek için kompozit malzemenin üretimi sırasında vakum destekli reçine transfer yöntemi (VARTM) yöntemi kullanılarak sekiz tabakalı kompozit plakalar üretilmiştir (Şekil 1) [16]. Reçine emdirilen yarı mamul kompozit plaka, oda sıcaklığında 24 saat ön kürlenme işleminden sonra, 5 saat süresince 80°C sıcaklıkta etüv fırınında ikincil kürlenme işlemine tabi tutulmuştur

Çizelge 1. S-2 cam fiber malzemenin mekanik özellikleri [15]
(The mechanical properties of S-2 glass fiber material)

| Malzeme Özelliği | Mekanik Özellik | |
|-------------------------|-----------------|--|
| | Değeri | |
| Elastisite Modülü (GPa) | 86-93 | |
| Kayma Modülü (GPa) | 35-39 | |
| Poission's Oranı | 0,21 | |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 4700-4800 | |
| Basma Dayanımı (MPa) | 4000-5000 | |



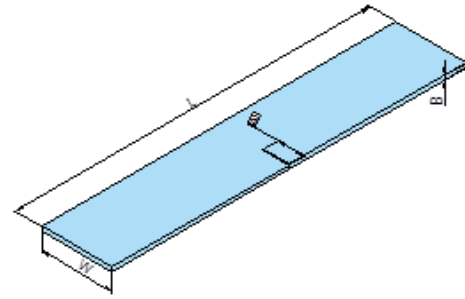
Şekil 1. VARTM yöntemiyle S-2 cam kumaşa reçine emdirilmesi (Resin impregnation on S-2 glass fabric by VARTM method)

Üretilen S-2 cam/epoksi kompozit plakalar elmas uçlu düz dairesel testere ile fiber yönünde L=150 mm ve W=30 mm ölçülerinde kesilmiştir. Deney numunelerinin hepsi özdeş üretim şartları altında üretilmiş plakalardan kesilmiştir. Daha sonra kırılma test numuneleri üzerine a=5mm, a=10mm ve a=15mm uzunlukta çatlaklar, numunenin tek kenarından Şekil 2'de gösterildiği yer düzlemine göre 0° ve 45° açılarda dekupaj testere ile açılmıştır. Her bir çatlak kalınlığı 0,5 mm'dir [12–14,17–19].

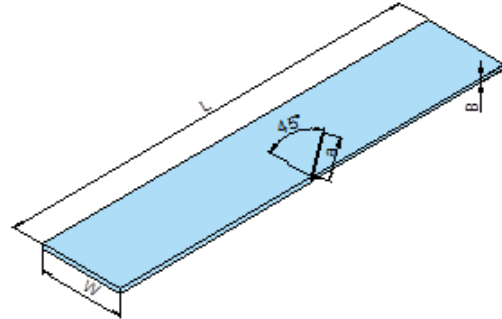
2.2. Kırılma Tokluğunun Hesaplanması (Determination of Fracture Toughness)

Kırılma mekaniğinin ana konusu bir yapı elemanında mevcut bir çatlakın hangi koşullar altında yayılmaya başlayacağı ve kırılma hasarını oluşturacağını saptamaktır. Klasik malzeme dayanım teorilerine kıyasla

kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme yoğunlaşmalarını artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Kırılma testleri çekme yüklemesi Shimadzu marka AG-X model 100 kN kapasiteli çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a). Çekme yüklemesi altında gerçekleştirilen testler sırasında $8,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $8,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ve $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ olmak üzere üç farklı deformasyon hızı kullanılmıştır. Kırılma numunelerini $8,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $8,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ve $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında teste tabi tutmak için, test numuneleri sırasıyla 50 mm/dk, 5 mm/dk ve 0,5 mm/dk tutucu çene ilerleme hızında çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sırasında her bir numune için kuvvet-uzama grafikleri elde edilmiştir. Her bir deney üçer tekrarlı olarak yapılmış ve bu üç deneyin ortalama kırılma tokluğu değeri esas alınmıştır (Şekil 3b).



(a)



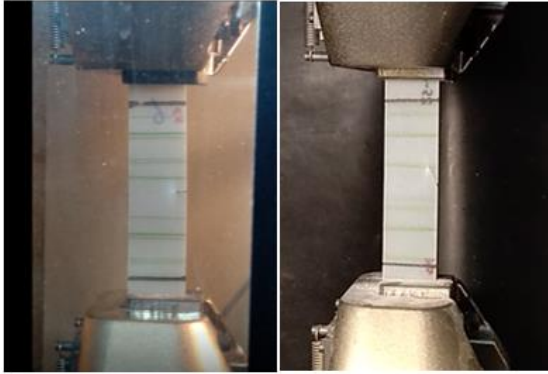
(b)

Şekil 2. Tek kenardan çatlaklı test numunesi (a) Mod I numunesi (b) Mod I/II numunesi (Single-edge crack test sample (a) Mod I sample (b) Mod I/II sample)

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırılma davranışlarını incelemek için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kullanılmaktadır [20,21]. Kırılma testinin amacı malzemenin kritik gerilme şiddeti faktörünü belirlemektir. Mod I deformasyon tipinde, gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olarak y eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Mod II deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Kalın numunelerde de numune yüzeyinde yine düzlem gerilme hali vardır ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Kalınlık yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar [22].



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Shimadzu AG-X 100 kN üniversal test cihazı ve (b) kırılma test numuneleri ((a) Shimadzu AG-X 100 kN universal tester and (b) fracture test samples)

Mode III deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlğa z eksenine doğrultusunda, çatlğın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Bunlardan farklı olarak yükleme veya çatlak geometrisine göre çatlak ucunda, birden çok etki aynı anda oluşabilir. Açılma ve kayma etkilerinin aynı anda oluştuğu açılma/kayma veya karma mod (Mod I/II) hasar durumu da çatlak ucunda oluşabilir. Tek kenar çatlğına sahip test numunesi için kritik gerilme şiddet faktörü (K_c) aşağıdaki Eşitlik 1'e göre hesaplanmaktadır.

$$K_c = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} f(a/W) \quad (1)$$

Bu formülde P uygulanan kuvvet, a çatlak uzunluğu, W numune genişliği, B numune kalınlığı, $f(a/W)$ geometrik faktörü ifade etmektedir [18, 23-24]. Çatlak açısı $\alpha=0^\circ$ olduğunda çatlak ucu açılmaya zorlanır (Mod I) ve bu durumda gerilme şiddeti faktörü kritik değere ulaştığında Kırılma Tokluğu (K_{Ic}) olarak adlandırılır. K_{Ic} değeri Eşitlik 2'deki gibi ifade edilir.

$$K_{Ic} = \frac{P_{cr}\sqrt{\pi a}}{WB} f_I(a/W) \quad (2)$$

Formülde Eşitlik 1'den farklı olarak P_{cr} test numunesinin hasara uğradığı kırılma yükünü ve $f_I(a/W)$ açılma modu için geometrik faktörü ifade etmektedir.

Çatlak açısı $\alpha=45^\circ$ olduğunda çatlak ucu hem açılmaya hem kaymaya zorlanır (Mod I/II) ve bu durumda çatlak ucunda iki gerilme şiddet faktörü bileşeni oluşur. Gerilme şiddet faktörü değeri numunenin kırıldığı anda kritik değere ulaşır ve efektif kırılma tokluğu değeri (K_{eff}) ile ifade edilir [11,25,26]. Eşitlik 4 ve 5'de verilen K_I ve K_{II} tokluk değerleri Eşitlik 3'de verilen K_{eff} tokluk değerinin açılma ve kayma bileşenleridir [23].

$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (3)$$

$$K_I = \frac{P_{cr} \cos 45^\circ \sqrt{\pi a}}{Wt} f_{mI}(a/W) \quad (4)$$

$$K_{II} = \frac{P_{cr} \sin 45^\circ \sqrt{\pi a}}{Wt} f_{mII}(a/W) \quad (5)$$

Mod I için $f_I(a/W)$, ve Mod I/II için $f_{mI}(a/W)$ ve $f_{mII}(a/W)$, geometrik faktör değerleri, çatlak uzunluğu (a), çatlak açısı (α), deformasyon hızının bir fonksiyonudur. Çatlak geometrisine ve her bir deney parametresine bağlı olan bu üç sabit sonlu elemanlar modeli kullanılarak hesaplanmıştır. ANSYS sonlu elemanlar paket programında çatlaklı deney numunelerinin modelleri oluşturulmuştur. Her bir deney şartı için oluşturulan modellere rasgele seçilen 1000N'luk bir kuvvet uygulanarak programdan elde edilen Mod I için K_I değeri, Eşitlik 2'de yerine konulmuştur. 45° açılı çentiğe sahip deney numuneleri için de oluşturulan modellere aynı şiddetteki kuvvet uygulanarak, K_I ve K_{II} toklukları programdan elde edilir. Eşitlik 4-5'de tokluk değerleri yerine yazılarak ModI/II durumu için $f_{mI}(a/W)$ ve $f_{mII}(a/W)$ boyut faktörleri benzer şekilde hesaplanmıştır [24,27]. Her bir deneysel parametre için Mod I durumunda $f_I(a/W)$ ve ModI/II durumu için $f_{mI}(a/W)$ ve $f_{mII}(a/W)$ boyut faktörleri değerleri Çizelge 1'de ifade edilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü üzere geometrik faktör değeri malzemenin mekanik özellikleri, ortam sıcaklığı ve deformasyon oranı değerlerinden etkilenmektedir. Geometrik faktör değerleri deneysel olarak incelenen kırılma tokluğu ve gerilim enerjisi serbest bırakma oranını doğrudan değiştiren bir kavramdır. Bu nedenle tabakalı kompozitlerin kırılma davranışlarını incelerken her bir test parametresi için geometrik faktör değeri ayrı ayrı hesaplanmalıdır.

Çizelge 2. Mod I ve Mod I/II durumları için SEY ile elde edilen geometrik boyut faktörü değerleri (Geometric dimension factor values obtained with FEM for Mod I and Mode I/II cases)

| Çatlak Uzunluğu (mm) | Deformasyon Hızı (s ⁻¹) | Geometrik Faktör Değerleri | | |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| | | Mod I | Mod I/II | |
| | | f _i (a/W) | f _m (a/W) | f _{mn} (a/W) |
| 5 | 8,3×10 ⁻³ | 1,5350 | 1,2222 | 0,7263 |
| | 8,3×10 ⁻⁴ | 1,5320 | 1,1872 | 0,7064 |
| | 8,3×10 ⁻⁵ | 1,4522 | 1,1607 | 0,6717 |
| 10 | 8,3×10 ⁻³ | 2,1144 | 1,4264 | 0,8099 |
| | 8,3×10 ⁻⁴ | 2,1099 | 1,4216 | 0,8080 |
| | 8,3×10 ⁻⁵ | 1,9980 | 1,3237 | 0,7350 |
| 15 | 8,3×10 ⁻³ | 3,3535 | 1,9274 | 1,0681 |
| | 8,3×10 ⁻⁴ | 3,3456 | 1,9539 | 1,0836 |
| | 8,3×10 ⁻⁵ | 3,1591 | 1,8724 | 1,0100 |

2.3. Gerinim Enerjisi Boşalma Oranının Hesaplanması (Determination of Strain Energy Release Rate)

Çatlak ucunda gerinim enerjisi boşalma oranı (G) çatlak ucu büyümesine karşılık gelen potansiyel enerji değişimini ifade eder. Gerinim enerjisi boşalma oranı, gerilme yoğunluk faktörü ile yakından ilişkilidir. Matematiksel olarak, enerji salım hızı, kırık yüzey alanındaki artış başına toplam potansiyel enerjideki azalma olarak ifade edilir. Enerji boşalım oranı, kırılma problemlerini çözerken, kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı ile ilgili malzeme özelliklerini tahmin ederken kırılma mekaniği teorilerinde sık sık kullanılmaktadır. Ortotropik malzeme için düzlem gerilme durumundaki fiber yönü ve fibere dik yöndeki gerinim enerjisi boşalma oranı Eşitlik 6-7 ile hesaplanır [28,29].

$$G_{ic} = \frac{K_{ic}^2}{E_1} \quad (6)$$

$$G_{uc} = \frac{K_{uc}^2}{E_2} \quad (7)$$

Eşitlikte yer alan, K_{ic} ve K_{uc} tokluk değerleri, karma mod durumunda kırılma tokluğunun yatay ve düşey bileşenleridir. Ayrıca E₁ ve E₂ elastisite modül değeri sırasıyla S-2 Cam/Epoksi kompozitin fiber yönü ve fibere dik yöndeki modül değerleridir. Karma mod (Mod I/II) için toplam gerinim enerjisi boşalma oranı (G_t) Eşitlik 8 kullanılarak hesaplanır.

$$G_t = G_{ic} + G_{uc} \quad (8)$$

Burada efektif kırılma tokluk formülüne benzer olarak G_{ic} ve G_{uc} karma mod gerinim enerjisi boşalma oranı değerinin açma ve kayma yönündeki bileşenleridir [30].

2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kırılma Analizi (Fracture Analyze with Finite Element Method)

Sonlu elemanlar çalışması için ANSYS Workbench programı kullanılarak her bir deney koşulu için farklı modeller oluşturulmuş ve sonlu elemanlar analizi ile nümerik kırılma tokluğu ve J İntegral değerleri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde, deneysel test prosedürünü uygulamak için geometrik model alt kısımdan sabitlenmiş ve üst kısımdan çekme kuvveti ile yüklenmiştir. Model 6981 düğüm ve 3346 üçgen eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Çatlak ucu etrafında ağ yapısındaki en küçük eleman boyutu 0,05 mm olarak boyutlandırılmıştır.

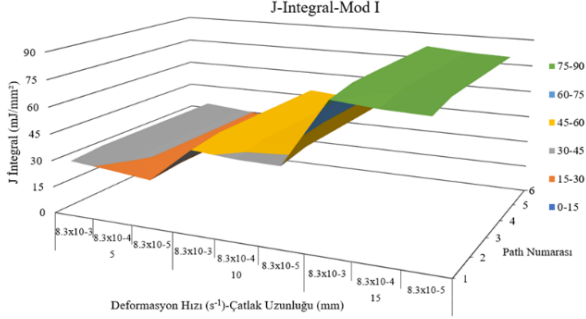
Sonlu elemanlar analizinde test numunelerinin sayısal modellerini oluşturabilmek için her bir deney koşulunda S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri ASTM D3039 ve ASTM D3410 standartlarına göre belirlenmiştir. Mekanik testler ile fiber yönü elastisite modülü (E₁), fibere dik yön elastisite modülü (E₂), kayma modülü (G₁₂), fiber yönü çekme dayanımı (X_t), fiber yönüne dik çekme dayanımı (Y_t), fiber yönü basma dayanımı (X_c) ve fiber yönüne dik basma dayanımı (Y_c) bulunmuştur. Bulunan mekanik özellikler Çizelge 3'de verilmiştir. Ayrıca Poisson oranları ν₁₂=0,11, ν₁₃=0,18 ve ν₂₃=0,18 olarak kabul edilmiştir [31]

Çizelge 3. S-2 cam/epoksi tabakalı kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of S-2 glass/epoxy laminated composite material)

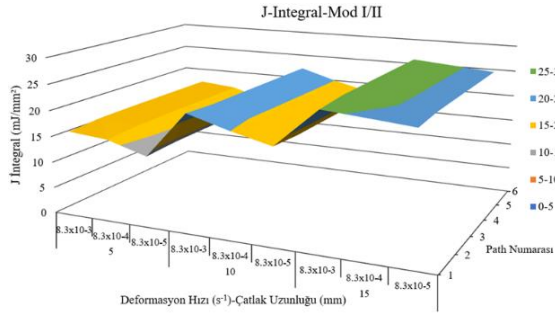
| Mekanik Özellikler | 8,3×10 ⁻³ s ⁻¹ | 8,3×10 ⁻⁴ s ⁻¹ | 8,3×10 ⁻⁵ s ⁻¹ |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| E ₁ (MPa) | 16850 | 16920 | 17000 |
| E ₂ (MPa) | 17190 | 17390 | 17920 |
| G ₁₂ (MPa) | 2500 | 2510 | 3120 |
| X _t (MPa) | 351,03 | 376,06 | 388,14 |
| Y _t (MPa) | 300,11 | 353,55 | 359,44 |
| X _c (MPa) | 278,35 | 301,81 | 310,69 |
| Y _c (MPa) | 270,45 | 275,67 | 283,16 |

Sonlu elemanlar analizinde, farklı geometride çatlakla sahip tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğu değerleri ve J integral değeri hesaplanmıştır. J integral kompozit malzemenin çatlak ucundaki birim açılma başına düşen enerji miktarını temsil eder. J integralin teorik konsepti J.R. Rice tarafından geliştirilmiştir. J integral değeri

statik yüklemeye tabi tutulan, çatlaklı bir numune için gerilme enerjisi boşalma oranına eşittir. Bu durum statik koşullar altında hem doğrusal elastik yapıya ve çatlak ucunda küçük ölçekli deformasyona sahip malzemeler için geçerlidir [32].



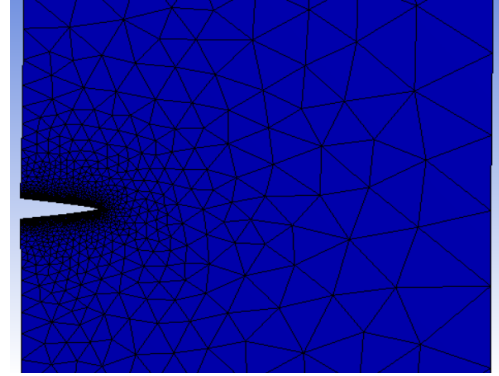
(a)



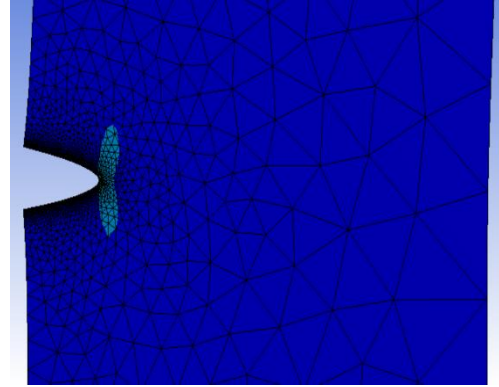
(b)

Şekil 4. Çatlak ucundan itibaren J integralin deformasyon hızı ve çatlak uzunluğuna göre değişimi (The change of J integral from the crack tip according to the deformation rate and crack length)

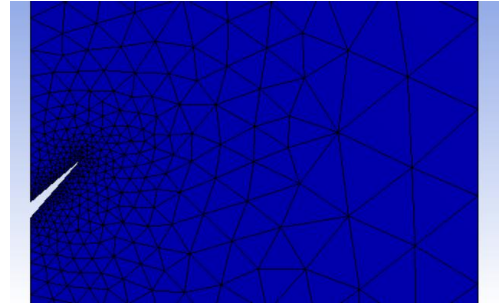
Şekil 4'de çatlak ucundan deplasman vektörü doğrultusunda ilerledikçe J integral değerinin çatlak uzunluğu ve deformasyon hızına bağlı olarak değişimi ifade edilmiştir. Şekil 4(a)'da açılma modu (Mod I) için verilen J integral değişim eğrileri incelendiğinde deformasyon hızı arttıkça J integral değeri de azalmaktadır. Buna karşın çatlak uzunluğu arttıkça J integral değeri şiddetli bir şekilde artmaktadır. Şekil 4(b)'deki karma mod (Mod I/II) durumunda ise J integral değerinin deformasyon hızından daha fazla etkilediği, hız artışı ile J integral değerindeki düşüşün Mod I durumuna göre daha net gözlemlendiği söylenebilir. Mod I durumuna benzer olarak karma modda da, çatlak uzunluğu arttıkça J integral değeri şiddetli bir şekilde artmıştır. Her iki çatlak ucu açılma durumu için, aynı deformasyon hızı ve çatlak uzunluğuna sahip numunelerde çatlak ucundan itibaren x-yer değiştirme vektörü doğrultusunda gidildikçe (Path numarası bu doğrultuda artar) J integral değerinde gözle görülmeyecek bir artış olduğu söylenebilir [33,34]. Kuvvet artışı ile çatlak ucunda meydana gelen lokal delaminasyonları oluşturan ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen çatlak öncesi ve çatlak sonrası gerilme durum Şekil 5'de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. SEY elde edilen şekiller (a), (c) analiz öncesi çatlak durumu, ve (b), (d) analiz sonrası çatlak durumu (Figures obtained from FEM (a), (c) crack condition before analysis, and (b), (d) crack condition after analysis)

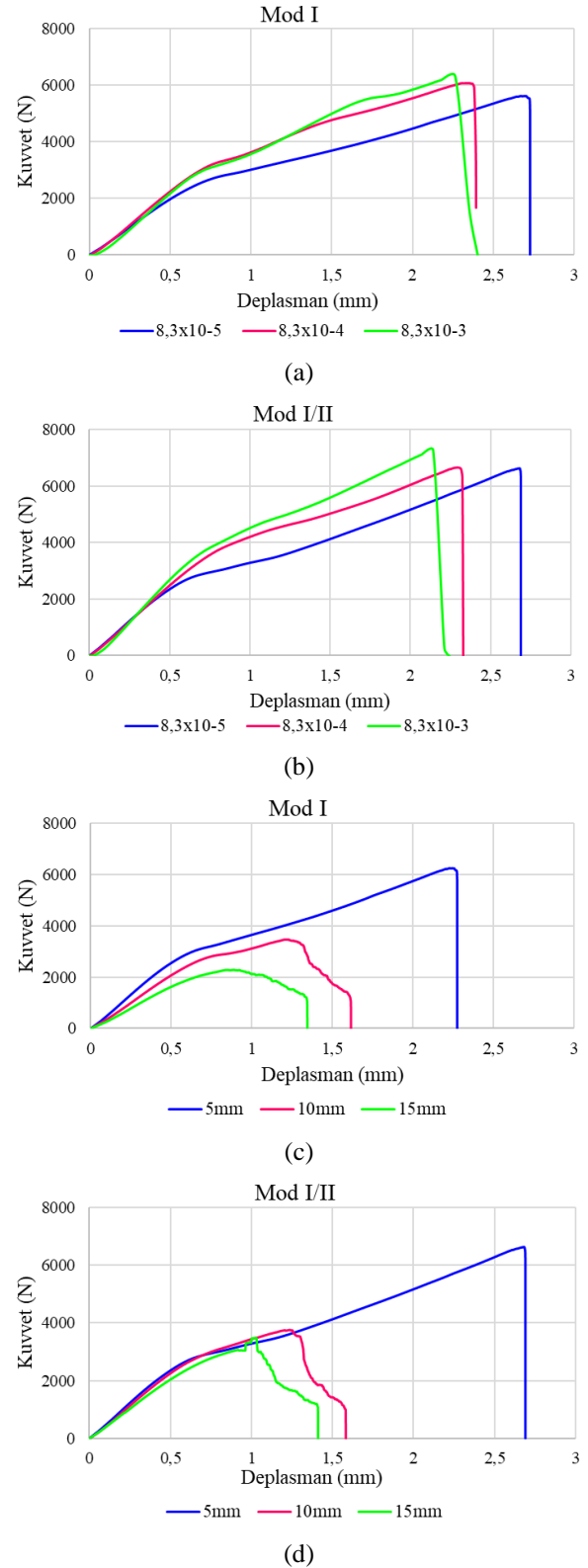
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, altı farklı geometride çatlağa sahip S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitlerin farklı deformasyon hızlarındaki kırılma davranışları, açılma ve karma mod kırılma tokluğu, gerinim enerjisi boşalma oranı değerleri deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar metodu kullanılarak nümerik kırılma tokluğu değerleri ve J integral değerleri analiz edilmiştir.

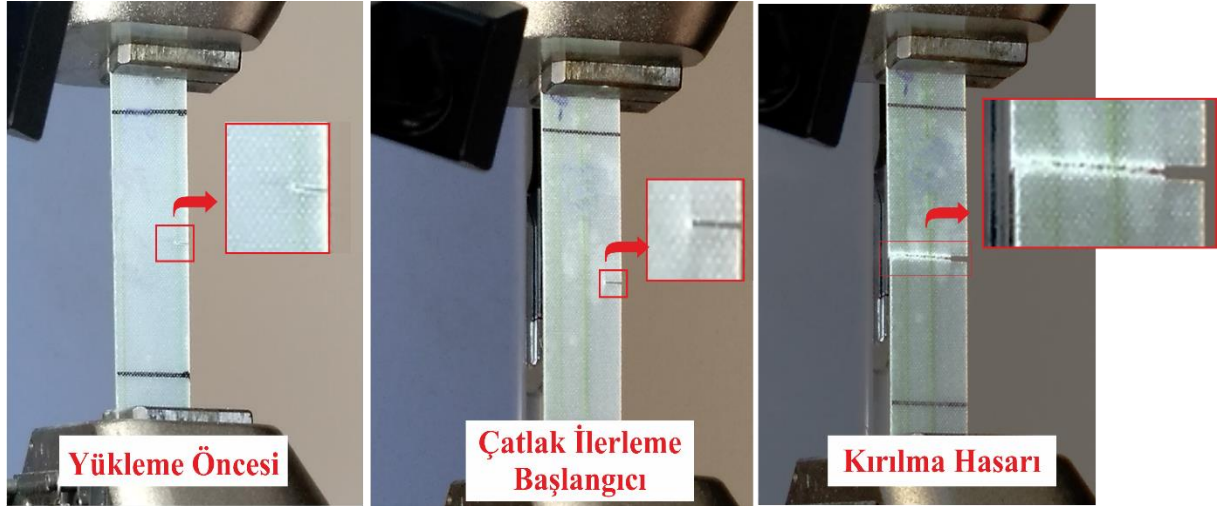
3.1. Kırılma Tokluğu Sonuçları (Results of Fracture Toughness)

S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğu değerlerini belirlemek için üç farklı çatlak uzunluğuna ve iki farklı çatlak açısına sahip test numuneleri çekme yüklemesi altında üç farklı deformasyon hızında test edilmiştir. Testler sırasında her bir numuneye ait kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6(a)(b)'de 5 mm çatlak uzunluğuna sahip numunelerin Mod I ve Mod I/II durumlarındaki farklı deformasyon hızlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır. Buna göre sabit çatlak uzunluğu altında deformasyon hızı arttıkça numuneler daha gevrek bir davranış göstermiştir. Öyle ki; hız arttıkça kırılma hasar yükü atmış buna karşın test numunesinin deformasyon kabiliyeti azalmıştır. Şekil 6(c)(d)'de ise $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızından test edilmiş numunelerin Mod I ve Mod I/II için çatlak uzunluğunun kuvvet-deplasman eğrisi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Aynı deformasyon hızında test numunesinin çatlak boyu artarsa S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozit malzemenin hem yük taşıma hemde deformasyon kabiliyeti şiddetli bir şekilde azalmaktadır. Bu durum çatlak boyunun malzemenin servis ömrünü belirlemede en etkili faktör olduğunu göstermektedir. Diğer çatlak ve hız parametreleri altında gerçekleştirilen deneylerin sonucunda da benzer kuvvet-uzama grafikleri elde edildiğinden bu dört grafik örnek olarak verilmiştir. Genel olarak aynı çatlak uzunluğu için Mod I/II durumundaki kırılma hasar yükü (P_{cr}) Mod I durumuna göre daha yüksektir. Bunun nedeni Mod I/II durumunda kayma etkilerinin çatlak ucunu farklı yönlerde açmaya zorlamasıdır. Bu durum literatürle de benzerlik göstermektedir [35,36].

Şekil 7'de S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitler için tipik kırılma hasar mekanizması görsel olarak ifade edilmiştir. Yükün artışıyla beraber test numunesinin deformasyonu doğrusal bir davranış göstermektedir. Kuvvet değeri arttıkça bu doğrusal ilişki bozulur bu durumda çatlak ucunda deformasyonlar başlar. Kuvvet (P_{cr}) belli bir değere ulaştığında çatlak ucunda lokal delaminasyonlar meydana gelir. Ardından hızlı bir şekilde çatlakın ilerlemesiyle test numunesi yük taşıma kapasitesini yitirir ve kırılma hasarı meydana gelir. Kırılma bölgesinde fiber ve matris kırıkları ile kırılan yüzeyde delaminasyonlar görülür.



Şekil 6. Kırılma testlerinden elde edilen (a-b) 5mm çatlak uzunluğu ve (c-d) $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızı için kuvvet-uzama grafikleri (Load-displacement curves for (a-b) 5mm crack length and (c-d) $8,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ deformation rate obtained from fracture tests)



Şekil 7. Mod I çatlak ucu açılma durumu için hasar mekanizması (Damage mechanism for Mod I crack tip opening condition)

Çizelge 4. Mod I ve Mod I/II durumlarında deneysel ve SEY ile elde edilen kırılma tokluğu değerleri (Experimental and FEM fracture toughness values for Mod I and Mode I/II status)

| | | $8,3 \times 10^{-5}$ | | | 643,84 | | | 666,07 | | | 3,3 | | |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|---|--|--|--------|--|--|-----|--|--|
| Çatlak Uzunluğu (mm) | Deformasyon Hızı (s^{-1}) | Mod I | | | Hata (%) | Kuvvet-uzama grafiklerinden elde edilen kırılma hasar yükü deneysel ve SEY analizinden elde edilen tokluk değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Çizelge 4’de Mod I ve Mod I/II açılma durumları için deneysel ve SEY ile elde edilen kırılma tokluğu değerleri karşılaştırılmıştır. | | | | | | | |
| | | $K_{IC(den)}$ (MPam $^{1/2}$) | $K_{IC(num)}$ (MPam $^{1/2}$) | | | | | | | | | | |
| 5 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 755,15 | 760,52 | 0,7 | Mod I durumundaki deneysel kırılma tokluğu değerleri incelendiğinde maksimum kırılma tokluğunun 1197,80 MPam $^{1/2}$ ile en uzun çatlak boyu ve en yüksek deformasyon hızı şartlarında olduğu görülmektedir. Minimum deneysel kırılma tokluğu ise 703,24 MPam $^{1/2}$ ile en düşük çatlak boyu ve en düşük deformasyon hızı şartlarındaki deneyler sonucunda meydana gelmiştir. Aynı çatlak uzunluğuna sahip numunelerin farklı deformasyon hızlarından elde edilen deneysel kırılma tokluğu değerleri birbiri ile kıyaslandığında, deformasyon hızı arttıkça kırılma tokluğu değerinde maksimum %7,38 artış olduğu görülmüştür. Benzer olarak, aynı deformasyon hızında farklı çatlak uzunluğuna sahip numunelerin kırılma testlerinden elde edilen tokluk değerleri kıyaslandığında, çatlak uzunluğu arttıkça kırılma tokluğu değeri %68,34 oranında artmıştır. Bu iki kıyaslama çatlakça sahip numuneler için kırılma tokluğu bakımından çatlak uzunluğunun deformasyon hızına göre daha kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Mod I çatlak ucu açılma durumu için deneysel ve SEY elde edilen kırılma tokluğu değerleri kıyaslandığında maksimum hatanın yaklaşık %1 civarında olduğu görülmektedir. Mod I/II çatlak ucu açılma durumu için maksimum kırılma tokluğu 672,81 MPam $^{1/2}$ olarak 15mm çatlak boyuna sahip numunelerin $8,3 \times 10^{-3} s^{-1}$ deformasyon hızında test edilmesi ile elde edilmiştir. Aynı çatlak durumu, minimum kırılma tokluğu değeri ise 489,58 MPam $^{1/2}$ olarak 5mm çatlak uzunluğuna ve $8,3 \times 10^{-5} s^{-1}$ deformasyon hızında test edilen numunelerden bulunmuştur. Buna göre Mod I/II | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 737,45 | 740,70 | 0,4 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 703,24 | 707,94 | 0,7 | | | | | | | | | |
| 10 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 913,38 | 920,46 | 0,8 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 900,17 | 906,52 | 0,7 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 895,24 | 900,01 | 0,5 | | | | | | | | | |
| 15 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 1197,80 | 1205,70 | 0,7 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 1193,07 | 1201,30 | 0,7 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 1183,89 | 1192,50 | 0,7 | | | | | | | | | |
| Çatlak Uzunluğu (mm) | Deformasyon Hızı (s^{-1}) | Mod I/II | | | | Hata (%) | | | | | | | |
| | | $K_{eff(den)}$ (MPam $^{1/2}$) | $K_{eff(num)}$ (MPam $^{1/2}$) | | | | | | | | | | |
| 5 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 537,61 | 544,75 | 1,3 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 515,92 | 534,95 | 3,6 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 489,58 | 494,42 | 1,0 | | | | | | | | | |
| 10 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 577,03 | 619,92 | 6,9 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 558,51 | 589,72 | 5,3 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 530,76 | 560,11 | 5,2 | | | | | | | | | |
| 15 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 672,81 | 678,25 | 0,8 | | | | | | | | | |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 663,08 | 676,77 | 2,0 | | | | | | | | | |

çatlak ucu açılma durumu için çatlak uzunluğu ve deformasyon hızı üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Öyle ki, aynı çatlak uzunluğuna sahip numuneler için deformasyon hızı arttıkça kırılma tokluğu %9,81'e kadar artış göstermiştir. Benzer olarak, aynı hızda test edilen numuneler için çatlak uzunluğu arttıkça kırılma tokluğu değeri %31,5'e kadar artış gösterdiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre Mod I/II çatlak ucu açılma durumu için de çatlak uzunluğu deformasyon hızına göre kırılma tokluğu değeri bakımından daha kritik bir test parametresidir. Deneysel ve SEY'den elde edilen kırılma tokluğu değerleri kıyaslandığında maksimum hata değerinin %6,9 olduğu görülmüştür. Aynı çatlak uzunluğuna sahip ve aynı deformasyon hızında test edilen numunelerin kırılma tokluğu değerleri çatlak ucu açılma durumuna göre kıyaslandığında Mod I durumundan elde edilen tokluk değerleri Mod I/II'ye kıyasla %83,9'a kadar daha yüksek bulunmuştur. Bu durum S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitlerde bulunan çatlakın açılma modunun açma/kayma moduna göre daha kritik olduğunu göstermektedir.

3.2. Gerinim Enerjisi Boşalma Oranı Sonuçları (Results of Strain Energy Release Rate)

Linear elastik kırılma mekaniğinde kırılmayı ifade eden bir diğer parametre de enerjidir. J integral değeri, çatlak cephesi boyunca her noktada bir sanal çatlak uzatması için potansiyel enerji salım hızına eşittir [37]. Deneysel olarak hesaplanan gerinim enerjisi boşalma oranı değerinin SEY analizindeki karşılığı J integral değeridir. Çizelge 5'de Mod I ve Mod I/II çatlak ucu açılma durumları için deneysel ve SEY ile elde edilen gerilme enerjisi salınım oranı ve J integral değerleri verilmiştir.

Çizelge 5 incelendiğinde Mod I çatlak ucu açılma durumu için, maksimum gerilme enerjisi boşalma oranı (G_{IC}) $84,4 \text{ mJ/mm}^2$ olarak 15 mm çatlakla sahip numunelerin $8,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında test edilmesiyle bulunmuştur. En düşük deneysel gerilim enerjisi salınım oranı $28,3 \text{ mJ/mm}^2$ en düşük deformasyon hızında test edilen ve 5 mm çatlakla sahip numunelerden hesaplanmıştır. Mod I/II durumunda aynı hızda test edilen numuneler için çatlak uzunluğu arttıkça gerilim enerjisi boşalma oranı da %183,95'e kadar artış göstermiştir. Benzeggagh ile arkadaşları [38] ve Alizadeh ile arkadaşları [39] da tabakalı kompozitlerin kırılma davranışları üzerine yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Aynı çatlak uzunluğuna sahip numuneler için deformasyon hızının gerilim enerjisi boşalma oranı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deformasyon hızı arttıkça gerilim enerjisi boşalma oranı %14,33'e kadar daha fazla olduğu görülmüştür. Deneysel olarak hesaplanan G_{IC} ve SEY'den hesaplanan J integral değerleri kıyaslandığında aralarında maksimum %4,7 hata olduğu görülmüştür.

Karma mod (Mod I/II) çatlak ucu açılma durumunda maksimum gerinim enerjisi boşalma oranı $26,3 \text{ mJ/mm}^2$ olarak en uzun çatlak boyutuna ve en yüksek deformasyon hızında yapılan testlerde gözlenmiştir.

Minimum gerinim enerjisi boşalma oranı ise en kısa çatlak boyutuna ve en düşük deformasyon hızındaki deney koşullarında $14,1 \text{ mJ/mm}^2$ olarak bulunmuştur. En kısa çatlak boyuna sahip numunelerin enerji değerleri referans alındığında, çatlak boyundaki artış, gerinim enerjisi boşalma oranı değerini %72,53'e kadar arttırmıştır. Benzer olarak, aynı boyda çatlakla sahip numuneler için, en yavaş hızda deforme olan numunelerin enerji değerlerine bakıldığında, deformasyon hızı arttıkça gerinim enerjisi boşalma oranı değerinde %18,31'a kadar artış meydana geldiği görülmüştür. Aynı boyda çatlakla sahip ve aynı deformasyon hızında teste tabi tutulan numunelerin gerinim enerjisi boşalma oran değerleri çatlak ucu açılma durumuna göre kıyaslandığında, Mod I durumundaki enerji değerleri Mod I/II durumuna göre %239,59 daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 5. Mod I ve Mod I/II durumu için gerinim enerjisi boşalma oranı ve J integral değerleri karşılaştırması (Comparison of strain energy release rate and J integral values for Mode I and Mode I / II status)

| Çatlak Uzunluğu (mm) | Deformasyon Hızı (s^{-1}) | Mod I | | |
|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|
| | | G_{IC} (mJ/mm^2) | J_{int} (mJ/mm^2) | Hata (%) |
| 5 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 33,5 | 32,8 | 2,1 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 32,1 | 30,8 | 4,1 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 29,3 | 28,3 | 3,6 |
| 10 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 49,1 | 48,5 | 1,1 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 47,9 | 46,6 | 2,7 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 47,6 | 46,1 | 3 |
| 15 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 84,4 | 82,1 | 2,7 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 84,1 | 80,1 | 4,7 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 83,2 | 79,3 | 4,7 |
| Çatlak Uzunluğu (mm) | Deformasyon Hızı (s^{-1}) | Mod I/II | | |
| | | G_I (mJ/mm^2) | J_{int} (mJ/mm^2) | Hata (%) |
| 5 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 16,8 | 17,1 | 1,9 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 15,6 | 16,4 | 4,8 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 14,2 | 14,1 | 0,7 |
| 10 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 19,3 | 22,1 | 14,1 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 18,3 | 19,8 | 8,1 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 16,6 | 17,9 | 7,7 |
| 15 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 26,3 | 25,9 | 1,8 |
| | $8,3 \times 10^{-4}$ | 25,8 | 25,2 | 2,4 |
| | $8,3 \times 10^{-5}$ | 24,5 | 24,5 | 0 |

4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada farklı boylarda çatlakla sahip S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozit plakaların farklı deformasyon hızlarındaki kırılma davranışları deneysel

ve nümerik olarak incelenmiştir. Kırılma tokluğu ve enerji salınım oranının iki farklı çatlak açılma moduna göre değişiminin incelendiği bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Çatlaklı numunelerin çekme yüklemesi altında önce matris çatlaması sonrasında fiber kırılması şekilde hasara uğradığı görülmüştür. Çatlak boyu arttıkça S-2 Cam/Epoksi tabakalı kompozitlerin yük taşıma ve deformasyon kabiliyetinin, azaldığı görülmüştür. Buna karşın aynı çatlak boyutuna sahip numunelerin test sonuçları deformasyon hızı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığını buna karşın deformasyon kabiliyetinin azaldığını göstermiştir.
- Her iki çatlak açılma durumu için (Mod I, Mod I/II) aynı çatlak boyuna sahip olan numunelerin kırılma testleri, deformasyon hızının artmasıyla kırılma tokluğunun maksimum %9,81 oranında arttığını göstermiştir.
- Mod I ve Mod I/II çatlak ucu açılma durumunda, aynı deformasyon hızı için, çatlak boyu artarsa, kırılma tokluğu değeri %83,89'a kadar artış gösterdiği görülmüştür.
- Her iki çatlak ucu açılma durumu için, aynı çatlak boyutuna sahip numunelerde deformasyon hızı arttıkça, gerinim enerjisi boşalma oranı değerleri %18,31'e kadar artış göstermiştir. Benzer olarak aynı hızda test edilen numunelerde çatlak boyunun artması enerji değerlerinde %183,95'e kadar artış sağlamıştır.
- S-2 Cam fiber takviye malzemesi özellikle havacılık sanayiinde kullanılan bir malzeme türüdür. Deneysel ve nümerik olarak incelenen bu çalışmanın sonuçları, farklı sıcaklık ve farklı deformasyon oranlarında zorlanan özellikle hava araçlarının tasarımlarında, kırılma hasar mekanizmalarının öngörüsü için başvuru kaynağı olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından 2018/MF003 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Zafer KAYA: Deneyle yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hüseyin Ersen BALCIOĞLU: Deneyle yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Halit GÜN: Deneyle yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Emin M, Çelik YH, Kiliçkap E. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin , yükün , kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi. *J Polytech*; 22: 811–817, (2019).
- [2] Balcioglu HE. Fracture Behaviors of SiC Particle Filled and Jute Fiber Reinforced Natural Composites. *J Nat Fibers* 00: 1–18, (2020).
- [3] Balcioglu HE, Yalcin D. The Determination of Fracture Characterization of Knitted Fabric Reinforced Composites Using Arcan Test. *Fibers Polym* ;21:849–863, (2020)
- [4] Tiber B, Balcioglu HE. Flexural and fracture behavior of natural fiber knitted fabric reinforced composites. *Polym Compos* ; 40, (2019)
- [5] Kopietz M, Wetzel B, Friedrich K. Flexural and fracture mechanical properties of in situ particulate reinforced organomineral hybrid resins modified by organofunctional silanes. *Compos Sci Technol*; 174: 169–175 (2019).
- [6] Aktas M, Balcioglu HE, Külahlı G. Strain rate effects on tensile and compressive behaviour of woven-knitting glass/epoxy composites. *Adv Compos Lett*; 22:13–9. (2013)
- [7] Junjia Cui , Shaolu Wang, Shuhao Wang, Guangyao Li PW and, Liang C. The Effects of Strain Rates on Mechanical Properties and Failure Behavior of Long Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites :1–18. (2019)
- [8] Jia Z, Yuan G, Hui D, Feng X, Zou Y. Effect of high loading rate and low temperature on mode I fracture toughness of ductile polyurethane adhesive. *J Adhes Sci Technol*; 33:79–92. (2019)
- [9] Rojas-sanchez JF, Schmack T, Boesl B, Bjekovic R. Strain rate-dependent characterization of carbon fibre-reinforced composite laminates using four-point bending tests (2019).
- [10] Zhang M, Jiang B, Chen C, Drummer D, Zhai Z. The Effect of Temperature and Strain Rate on the Interfacial Behavior of Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites: A Molecular Dynamics Study. *Polymers (Basel)*;11:1–18. (2019)
- [11] Arasan Ş, Aktaş M, Balcioglu HE. Fracture toughness of woven glass and carbon reinforced hybrid and non-hybrid composite plates. *Polym Compos*;39:783–93. (2018).
- [12] Meng Q, Wang T. An improved crack-bridging model for rigid particle-polymer composites. *Eng Fract Mech*;211:291–302. (2019)
- [13] Satyanarayana A, Gattu M. Effect of displacement loading rates on mode-I fracture toughness of fiber

- glass-epoxy composite laminates. *Eng Fract Mech* 218:106535. (2019)
- [14] Siddique A, Abid S, Shafiq F, Nawab Y, Wang H, Shi B, et al. Mode I fracture toughness of fiber-reinforced polymer composites: A review. *J Ind Text* (2019).
- [15] Kaya Z, Ersen H, Halit B. The strain rate and temperature effects on the static and dynamic properties of S2 glass / epoxy composites. *Appl Phys A*;126:1–15. (2020)
- [16] Yildirim F, Aydın M, Avci A. Mechanical properties of nano-SiO₂ reinforced 3D glass fiber / epoxy composites;108, (2017)
- [17] Sorucu A. Orthotropic malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Mek Anabilim Dalı, (2007)
- [18] Vieille B, Gonzalez JD, Bouvet C. Fracture mechanics of hybrid composites with ductile matrix and brittle fibers: Influence of temperature and constraint effect. *J Compos Mater*;53:1361–76, (2019).
- [19] Rahmani A, Choupani N. Experimental and numerical analysis of fracture parameters of adhesively bonded joints at low temperatures. *Eng Fract Mech*;207:222–36. (2019)
- [20] Torabi AR, Pirhadi E. Failure analysis of round-tip V-notched laminated composite plates under mixed mode I/II loading. *Theor Appl Fract Mech*;104:102342. (2019)
- [21] Shahani AR, Abolfathitabar R, Shooshtar H. On the validity of LEFM methods to investigate the fracture behavior of angle-ply laminates. *Compos Part B Eng*;160:249–53. (2019)
- [22] Koçyiğit K, Akbaş ŞD. Çatlak içeren bir çerçeve taşıyıcı sistemin zorlanmış titreşim analizi. *J Polytech*:1–13. (2020).
- [23] Jamali J, Fan Y, Wood JT. The mixed-mode fracture behavior of epoxy by the compact tension shear test. *Int J Adhes Adhes*; 63:79–86. (2015)
- [24] Choupani N. Experimental and numerical investigation of the mixed-mode delamination in Arcan laminated specimens. *Mater Sci Eng A*; 478: 229–242 (2008).
- [25] Kaman MO. Stress Intensity Factor Analysis of Antisymmetrically Carbon / Epoxy Laminated Composite Plates with Different. *Turkish J Sci Technol*; 6:61–74, (2011)
- [26] Kaman MO. Effect of fiber orientation on fracture toughness of laminated composite plates [0°/θ°]s. *Eng Fract Mech* 78: 2521–2525, (2011)
- [27] Aliha MRM, Shaker S, Keymanesh MR. Low temperature fracture toughness study for bitumen under mixed mode I+II loading condition. *Eng Fract Mech*; 206: 297–309, (2019)
- [28] Poon CY, Ruiz C. Hybrid experimental-numerical approach for determining strain energy release rates. *Theor Appl Fract Mech*; 20: 123–131, (1994).
- [29] Gautham S, Sasmal S. Determination of fracture toughness of nano-scale cement composites using simulated nanoindentation technique. *Theor Appl Fract Mech*; 103: 102275, (2019).
- [30] Kim HB, Naito K, Oguma H. Mode II fracture toughness of two-part acrylic-based adhesive in an adhesively bonded joint: end-notched flexure tests under static loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*; 40: 1795–808, (2017).
- [31] Manzella AF, Gama BA, Gillespie JW. Effect of punch and specimen dimensions on the confined compression behavior of S-2 glass/epoxy composites. *Compos Struct*; 93: 1726–1737, (2011).
- [32] J.R.Rice. “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks.” *J Appl Mech*; 35: 379-386, (1968).
- [33] Kim JH, Paulino GH. Mixed-mode J-integral formulation and implementation using graded elements for fracture analysis of nonhomogeneous orthotropic materials. *Mech Mater*;35: 107–128, (2003) .
- [34] Zou G, Chen H. Path-dependent J-integrals under mixed-mode loads of mode I and mode II. *Theor Appl Fract Mech* ;96: 380–386, (2018).
- [35] Rocha AVM, Akhavan-Safar A, Carbas R, Marques EAS, Goyal R, El-zein M, et al. Fatigue crack growth analysis of different adhesive systems: Effects of mode mixity and load level. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*; 43: 330–341, (2020)..
- [36] Zeinedini A. A novel fixture for mixed mode I/II/III fracture testing of brittle materials. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*; 42: 838–853, (2019).
- [37] Hein J, Kuna M. A generalized J-integral for thermal shock analyses of 3D surface cracks in spatially and temperature dependent materials. *Theor Appl Fract Mech* (2017) ;92:318–30.
- [38] Benzeggagh ML, Kenane M. Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/ epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus. *Compos Sci Technol*; 56: 439–449, (1996).
- [39] Alizadeh F, Soares CG. European Journal of Mechanics / A Solids Experimental and numerical investigation of the fracture toughness of Glass / Vinylester composite laminates. *Eur J Mech / A Solids*; 73: 204–211, (2019).