



## Experimental Investigation of the Effect of Interface Fiber Angle on the Fracture Toughness of Woven Laminated Composites Under Mode II Loading

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Salamat-Talab M.<sup>1\*</sup> *PhD*,  
Zeinolabedin-Beygi A.<sup>1</sup> *BSc*,  
Seyyed-Nejad S.M.<sup>1</sup> *BSc*

#### How to cite this article

Salamat-Talab M, Zeinolabedin-Beygi A, Seyyed-Nejad S M. BSc Experimental Investigation of the Effect of Interface Fiber Angle on the Fracture Toughness of Woven Laminated Composites Under Mode II Loading. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(4):225-233.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Phone: +98 8633400675

Fax: -

m.salamattalab@gmail.com

#### Article History

Received: August 30, 2020

Accepted: December 16, 2020

ePublished: March 25, 2021

### ABSTRACT

Delamination is one of the most common damage modes in laminated composites that can reduce the stiffness and load-bearing capacity of the composite structure, which highlights the importance of studying this phenomenon. For this purpose, the effect of the interface fiber angles on the mode II fracture toughness of plain-woven laminated composites has been investigated in this study. The end notch flexure specimens (ENF) with 24 layers which have 0//0, 0//30, and 30//−30 interface angles are manufactured using the hand lay-up method, and experimental tests are conducted on them in accordance with ASTM standard under load II mode loading. Experimental results show that the interface fiber angle has a significant effect on the initiation and propagation of delamination toughness, so the load-bearing capacity of the specimens with the non-zero interface fiber angle was the highest value. Moreover, the initiation and propagation value of fracture toughness for specimens with 0//0 interface fiber angle was less than the corresponding values for other samples with non-zero interface angles. In addition, the fracture process zone (FPZ) length was approximately the same for all samples. Taken images of fracture surfaces using scanning electron microscopy (SEM) show that in addition to the separation of fibers from the resin at delamination, other damage mechanisms including fiber breakage and highly deformed matrix play a key role in increasing the fracture toughness of the sample with 0//30 and 30//−30 interface fiber angle.

**Keywords** Fracture Toughness, Resistance Curve (R-Curve), Woven Laminated Composites, Delamination

### CITATION LINKS

[1] The effects of geometry, rate and temperature on the mode I, mode II ... [2] On the calculation of energy release rates for cracked laminates. [3] Delamination fracture toughness of UHMWPE fibers/polyurethane ... [4] Analysis of instability-related growth of a through-width delamination. [5] Effects of friction, geometry, and fixture compliance on the perceived toughness ... [6] Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber ... [7] Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens. [8] Mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy multidirectional laminates. [9] Influence of ply orientation on delamination in composite laminates. [10] Prediction of strain energy release rate of asymmetric double cantilever composite ... [11] Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber/epoxy composites ... [12] R-curve behaviour of the mixed-mode I/II delamination in carbon/epoxy laminates ... [13] The interlaminar fracture of organic-matrix, woven reinforcement composites. [14] On the mixed mode I/II/III inter-laminar fracture toughness of cotton/epoxy ... [15] Analysis of tensile failure mode and the mechanism dominated ... [16] Effect of nanomaterial on mode I and mode II interlaminar fracture toughness ... [17] A new ENF test specimen for the mode II delamination toughness testing of stitched woven CFRP ... [18] Impact response of woven glass-fabric composites—I.: Effect of fibre surface treatment. [19] Effect of variation in fibre volume fraction on modes I and II delamination behaviour ... [20] Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber ... [21] Mode II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates. [22] Experimental investigation of delamination growth in laminated composites made of woven fabric/epoxy ... [23] Mode-II interlaminar fracture and crack-jump phenomenon in CFRP composite ... [24] Mode II interlaminar fracture toughness of woven E-glass/epoxy composites ...

## بررسی تجربی اثر زوایای فصل مشترک تورق بر چقرمگی شکست چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده تحت بارگذاری مود II

مظاهر سلامت طلب\* PhD

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

علی زین‌العابدین بیگی BSc

کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

سید مرتضی سیدنژاد BSc

کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

### چکیده

تورق یکی از شایع‌ترین مدهای تخریب در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده که می‌تواند منجر به کاهش سفتی و قابلیت باربری سازه کامپوزیتی گردد که این موضوع، اهمیت مطالعه این پدیده را مشخص می‌نماید. بدین منظور در تحقیق حاضر، به بررسی اثر زوایای فصل مشترک تورق بر چقرمگی شکست چندلایه‌های کامپوزیتی زمینه‌پلمیری با الیاف بافته شده ساده پرداخته شده است. نمونه با شکاف انتهایی (ENF) با ۲۴ لایه و زوایای فصل مشترک تورق ۰/۱۰، ۳۰/۱۳۰ و ۳۰/۱۳۰- با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شده و مطابق با استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا (ASTM) تحت بارگذاری مود II قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که زاویه فصل مشترک تورق بر چقرمگی شکست شروع و پایا تأثیر محسوس داشته است به گونه‌ای که قابلیت باربری نمونه با زاویه فصل مشترک غیر صفر بیشترین مقدار بوده است. علاوه بر این، مقدار چقرمگی شکست شروع و پایا در نمونه با زاویه فصل مشترک تورق ۰/۱۰ کمتر از مقادیر متناظر آن در نمونه‌های دیگر بوده و طول ناحیه فرآیند شکست در تمامی نمونه‌ها تقریباً یکسان بوده است. تصاویر بدست آمده از سطوح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بیانگر این موضوع است که علاوه بر جدایش الیاف از رزین در ناحیه فصل مشترک تورق، سایر مکانیزم‌های آسیب مانند شکست الیاف و تغییر شکل بالای ماتریس نقشی اساسی در افزایش چقرمگی شکست نمونه با شکاف انتهایی با زوایای فصل مشترک تورق ۳۰/۱۱۰ و ۳۰/۱۳۰- داشته است. **کلیدواژه‌ها:** چقرمگی شکست، منحنی مقاومت، چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده، تورق

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

\* نویسنده مسئول: m.salamattalab@gmail.com

### ۱- مقدمه

گسترده‌ی استفاده روز افزون از کامپوزیت‌ها موجب شده تا اهمیت بررسی مدهای تخریب احتمالی در این مواد به منظور بهبود طراحی و عملکرد این نوع از مواد بیشتر شود. تورق به دلیل کاهش خواص کامپوزیت از جمله سفتی و استحکام، یکی از مهم‌ترین مدهای تخریب مواد مرکب می‌باشد که در بیشتر موارد به شکست‌های ناگهانی و فاجعه آمیز می‌انجامد. به بیان دیگر

تورق، به ترکی اطلاق می‌شود که بین دو لایه از چندلایه کامپوزیتی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند شکل می‌گیرد<sup>[1]</sup>. بررسی تئوری، عددی و آزمایشگاهی تورق در دو دهه اخیر، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. ویلیامز<sup>[2]</sup> با استفاده از مقادیر محلی گشتاور خمشی و نیرو در صفحه‌ی ترک، به محاسبه‌ی نرخ رهایی انرژی کرنشی در چندلایه‌های کامپوزیتی پرداخت. بارهای خمشی یکی از موارد ایجاد آسیب در نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد که منجر به مود II شکست در اینگونه مواد می‌شود که محققان زیادی در این زمینه مطالعه داشته‌اند<sup>[3]</sup>. وایت کامب<sup>[4]</sup> فرضیه ثابت ماندن G در هنگام رشد تورق را مطرح و بیان کرد که معیار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی برای بررسی رشد تورق مناسب می‌باشد. داویدسون و سان<sup>[5]</sup> با استفاده از روش داده‌گاهی کالیبراسیون نرمی، برای تیرهای کامپوزیتی با شکاف انتهایی در دو حالت بارگذاری خمش سه نقطه (End-Notch Flexure) و چهارنقطه ENF۴ ساخته شده از جنس کربن/اپوکسی مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای را محاسبه نمودند. ژانگ و همکاران<sup>[6]</sup> نمونه‌های تیر دو لبه یکسر گیردار (Double Cantilever Beam) و شکاف بارگذاری شده در انتها (End Loaded Split) ساخته شده از الیاف چند جهته را به ترتیب تحت بارگذاری مود اول و دوم قرار داده و با بررسی چقرمگی شکست این نمونه‌ها دریافتند که چقرمگی شکست شروع مود II در چندلایه‌های کامپوزیتی یاد شده از چقرمگی شکست شروع مود I بیشتر می‌باشد. عوامل هندسی و مکانیکی مختلفی چون ضخامت تیر، عرض تیر، طول ترک، لایه‌چینی دوردست ترک، زوایای لایه‌ها در فصل مشترک تورق و غیره می‌تواند بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها تأثیرگذار باشد. ازدیل و همکاران<sup>[7]</sup> به بررسی رفتار تورقی نمونه‌های ENF چندجهته ساخته شده از شیشه/پلی استر با لایه‌چینی ۰/۶ [±۳۰] و ۰/۶ [±۴۵] پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این محققین نشان می‌دهد که نمونه با لایه‌چینی ۰/۶ [±۴۵] بیشترین مقدار چقرمگی شکست را در بین نمونه‌های یاد شده دارا بوده است. پیرا و همکاران<sup>[8]</sup> با بررسی آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های ENF چندجهته با لایه‌چینی‌های مختلف، به مشخصه‌سازی و اندازه‌گیری چقرمگی شکست در این نوع از نمونه‌ها پرداختند. تائو و سان<sup>[9]</sup> با انجام آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های چندجهته تحت بارگذاری مود دوم، این نکته را دریافتند که در نمونه‌های چند جهته با زاویه فصل مشترک تورق ۰/۱۰ با افزایش زاویه فصل مشترک مقدار چقرمگی شکست، کاهش می‌یابد. شکریه و زین‌الدینی<sup>[10]</sup> با به کارگیری مدل سازی عددی به تعیین نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه‌های چندجهته با مشخص بودن مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه‌های تک جهته در مود ترکیبی I/II پرداختند. چویی و همکاران<sup>[11]</sup> رشد تورق در نمونه ELS چندجهته با لایه‌چینی

چندلایه شیشه/اپوکسی با پارچه بافته شده پرداختند. آنها نمونه‌های تیر با شکاف انتهایی را با لایه چینی‌های  $[(0_2/90)_6/0_2//\theta/(0_2/90)_6/0_2]$ ،  $[(0_2/90)_6/0_2//\theta/(0_2/90)_6/0_2]$  و  $[(0_2/90)_6/0_2//\theta/(0_2/90)_6/0_2]$  (منظور از // موقعیت ترک می‌باشد) تحت آزمایش مود II قرار داده و نتایج بدست آمده را با المان محدود مقایسه کردند. آنها افزایش چقرمگی شکست در مود دوم را در مقایسه با نمونه تک جهته مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. خراط زاده و همکاران [22] اثر زاویه الیاف فصل مشترک تورق بر چقرمگی شکست شروع و پایا در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بافته شده ساده با لایه چینی  $[0_{12}/0_{12}]$ ،  $[0_{11}/30//0/0_{11}]$  و  $[0_{11}/45//0/0_{11}]$  را تحت مود I مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تغییر در زاویه الیاف فصل مشترک تورق، اثر چندانی بر روی چقرمگی شکست شروع و پایای کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف بافته شده ساده ندارد. با توجه به مطالب بیان شده در بخش پیشین، بسیاری از تحقیقات گذشته معطوف به بررسی چقرمگی شکست در نمونه‌های تک جهته و یا چندجهته بوده است. همچنین در مواردی که محققین اثر زاویه فصل مشترک تورق را مورد بررسی قرار داده‌اند، علاوه بر تغییر زوایای فصل مشترک تورق، زوایای لایه‌های دور دست نیز تغییر داده شده است. در نتیجه در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن الیاف بافته شده ساده و تغییر زوایای فصل مشترک تورق بدون تغییر زوایای دور دست تورق، به بررسی اثر این زوایا بر منحنی مقاومت این نمونه‌ها پرداخته شده و با نمونه با فصل مشترک ۰//۰ مقایسه شده است؛ همچنین به منظور درک مکانیزم رشد ترک در این نمونه‌ها از سطوح شکست تصاویر ماکرو و میکرو تهیه شده و به تفسیر مکانیزم رشد تورق در این نمونه‌ها پرداخته شده است.

## ۲- مواد و ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های کامپوزیتی با ۲۴ لایه به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند. در ساخت نمونه‌ها از الیاف شیشه بافته شده ۲۰۰ گرم بر متر مربع تهیه شده از شرکت AMP Composite استفاده شده است و هارنس آن ۲ می‌باشد. رزین مورد استفاده در ساخت چندلایه کامپوزیتی EPL 1012 و سخت‌کننده‌ی آن RH 112 بوده است که به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۲ با یکدیگر ترکیب شده‌اند. از نوار تفلون به ضخامت ۱۳ میکرون برای ایجاد پیش ترک استفاده شده است. همچنین به منظور تغییر زوایای فصل مشترک تورق از لایه چینی  $[0]_{24}$ ،  $[0_{11}/30//0_{12}]$  و  $[0_{11}/30//\theta/0_{11}]$  استفاده شده است. با توجه به اینکه الیاف مورد استفاده woven بوده است، لذا نگارش زاویه صفر در لایه‌چینی به معنی استفاده از الیاف تک‌جهته نبوده و این لایه با توجه به داشتن هارنس ۲ (دارای تار و پود برابر) به میزان الیاف در جهت ۰ دارای الیاف در جهت ۹۰ نیز می‌باشد. البته این موضوع در مورد سایر زوایا نیز

$[-45/0/45]_{rs}$  برای هر یک از بازوهای تیر در نظر گرفته و با اندازه‌گیری چقرمگی شکست، مقادیر آن را با نمونه‌های تک جهته مقایسه نمودند. نتایج آزمایشگاهی این محققین نشان می‌دهد که نمونه‌های با فصل مشترک ۴۵//۴۵ دارای چقرمگی شکست بیشتری نسبت به نمونه‌های با فصل مشترک تورق ۰//۰ می‌باشد. گنگ و همکاران [12] به بررسی آزمایشگاهی اثر زوایای لایه‌ها بر روی منحنی مقاومت و اثر پل‌زنی الیاف در چند لایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی پرداختند. آنها از نمونه‌های تک جهته و چند جهته با زوایای  $[0_{12}/0_{12}]$  و  $[0_{12}/0_{12}+22/5]$  (I، مود II و مود ترکیبی I/II استفاده کردند. باسکوم و همکاران [13] به مطالعه رفتار تورقی نمونه‌های تیر دولبه یکسرگیردار با الیاف کربن و شیشه پرداختند و دریافتند که اضافه کردن سخت‌کننده‌های الاستومر به اپوکسی و یا استفاده ماتریس‌های ترموپلاستیک می‌تواند نرخ رهایی انرژی کرنشی این کامپوزیت‌ها را افزایش دهد. مرادی و زین الدینی [14] به بررسی چقرمگی شکست بین لایه‌ای، نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی و خواص مکانیکی در چندلایه‌های کامپوزیتی بافته شده کتان/اپوکسی تحت مودهای ترکیبی I/II، I/III و II/III پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که چقرمگی شکست بین لایه‌ای و نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی تحت بارگذاری مود I خالص و مود ترکیبی II/III کمترین و بیشترین مقدار را در بین مودهای تورق دارند. فریدون و همکاران [15] به بررسی اثر زاویه قرارگیری الیاف شیشه با الیاف بافته شده بر روی چقرمگی شکست بین لایه‌ای پرداختند. آنها نمونه‌هایی با زوایای  $[90/0]_{rs}$ ،  $[0/90]_{rs}$  و  $[0/90]_{rs}$  تحت بارگذاری مود I قرار دادند و دریافتند که با تغییر زاویه قرارگیری الیاف از ۰ به  $\pm 45$  و از  $\pm 45$  به ۹۰ چقرمگی شکست بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. برخی محققان به مقایسه چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیت‌های چندلایه با الیاف بافته شده و تک جهته کربن/اپوکسی پرداختند و نشان دادند که کامپوزیت‌های چندلایه ساخته شده با الیاف بافته شده چقرمگی شکست بالاتری دارند. یکی از مواردی که مورد توجه صنعت و بسیاری از محققین قرار گرفته کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های شیشه بافته شده می‌باشد [16-18]. وود و همکاران [17] به بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر پل زنی الیاف بر روی چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌های چند لایه با الیاف بافته شده کربن/اپوکسی با استفاده از نمونه ENF پرداختند؛ نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که چقرمگی شکست در نمونه‌های مخروطی ENF می‌تواند بطور موثر اندازه گیری شود. علاوه بر مطالعه تورق در چندلایه‌های ساخته شده از الیاف تک‌جهته، برخی از محققین به مطالعه‌ی پدیده یاده شده در مود II چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده پرداخته‌اند [19-21]. پیرا و همکاران [21] به مطالعه‌ی آزمایشگاهی چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II در

که توسط استاندارد یاد شده پیشنهاد شده است، مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای بدست می‌آید:

$$G_{IIC} = \frac{3P^2ma^2}{2b} \quad (1)$$

که در آن P بار اعمال شده در طول ترک a، پارامتر کالیبراسیون و b عرض نمونه می‌باشد. توجه شود که برای هر کدام از زوایا، آزمایش چهار مرتبه تکرار شده است. با رسم نمودار نرمی بر



شکل ۲) تنظیمات آزمایش الف) کشش، ب) خمش سه نقطه

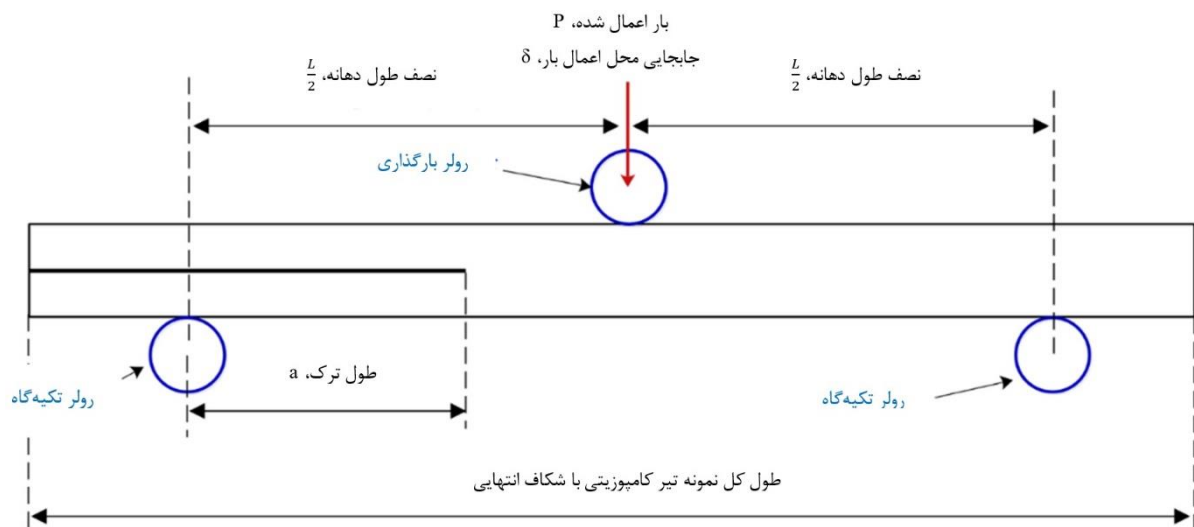
جدول ۱) خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی

مقدار	خواص مکانیکی
۱۹/۵ گیگاپاسکال	مدول الاستیک طولی ( $E_1$ )
۱۹/۵ گیگاپاسکال	مدول الاستیک عرضی ( $E_2$ )
۳/۱ گیگاپاسکال	مدول برشی داخل صفحه‌ای ( $G_{12}$ )
۱۸ گیگاپاسکال	مدول خمشی ( $E_b$ )
۰/۲۹	ضریب پواسون ( $\nu_{12}$ )

برقرار است. به طور مثال لایه با زاویه ۳۰ دارای الیاف در جهت ۶۰- نیز می‌باشد. به منظور بهبود خواص مکانیکی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط به عنوان پخت اولیه و پس از آن مطابق با توصیه ارائه شده توسط سازنده رزین به مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به منظور فرایخت قرار گرفتند. نمونه‌های ENF به طول ۱۴۰ میلی‌متر و عرض ۲۵ میلی‌متر از لمینیت برش داده شدند و برای هر کدام از زوایا ۴ نمونه مشابه ساخته شد که بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین به منظور بهتر دیده شدن ترک در حین رشد آن، لایه‌های نمونه با سنباده نرم پولیش داده شدند. همچنین در جدول ۱ خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی اندازه‌گیری و گزارش شده است که بر این اساس مدول خمشی مطابق با استاندارد ASTM D790، مدول الاستیک طولی و عرضی مطابق با استاندارد ASTM D3039 و مدول برشی داخل صفحه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D3518 بدست آمده است. به این منظور نمونه‌های آزمایش کشش و آزمایش خمش سه نقطه طبق استانداردهای مذکور ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۲).

### ۲-۱-۲ انجام آزمایش شکست و روش داده کاهی

آزمایش شکست نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنتام (STM-150) به همراه لودسل با دقت بالای Bongshin به ظرفیت ۲۰۰۰ kgf انجام شده است. مطابق با استاندارد ASTM D7905 که روش کالیبراسیون نرمی (Compliance calibration method) را به منظور تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود II پیشنهاد می‌نماید، ابتدا نمونه ENF با طول ترک‌های ۲۰، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متر تحت آزمایش خمش قرار گرفته و نرمی نمونه در این طول ترک‌ها استخراج شده است، سپس آزمایش شکست در طول ترک اولیه ۳۰ میلی‌متر انجام گرفته است. با استفاده از رابطه (۱)

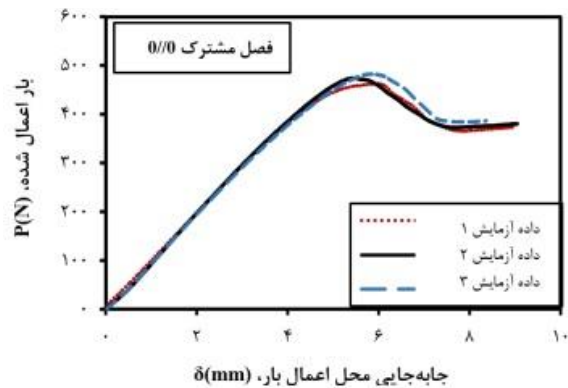


شکل ۱) شماتیک نمونه تیر کامپوزیتی با شکاف انتهایی

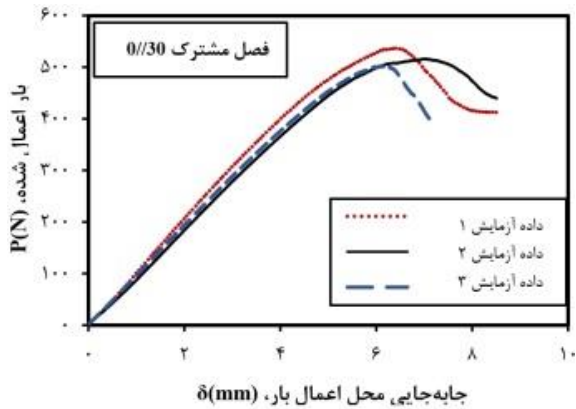
### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن

بعد از انجام آزمایش تورق بر روی نمونه ENF در طول ترک ۳۰ میلی‌متر، نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها ثبت شده و در شکل ۵ برای نمونه‌های مختلف با زوایای فصل مشترک مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. برای هر آزمایش حداقل ۳ مرتبه تکرار انجام شده است و در بعضی از نمونه‌ها ۴ مرتبه تکرار نیز صورت گرفته است. با دقت در نمودار شکل ۵ چند نکته قابل دریافت می‌باشد.

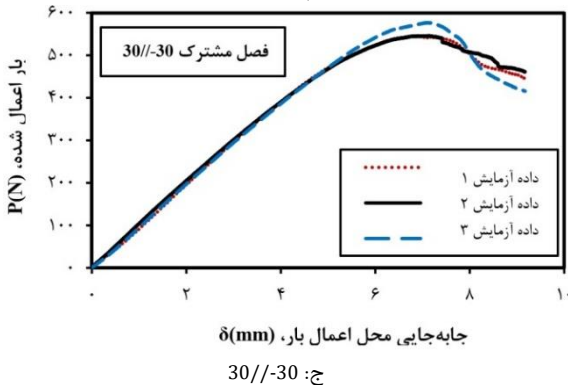
رفتار بین بار-جابجایی در ناحیه ابتدایی به صورت خطی می‌باشد که ناشی از رفتار الاستیک و خطی این نوع از مواد بوده و بعد از ناحیه خطی اولیه، یک ناحیه غیرخطی شروع می‌گردد که



الف: 0//0



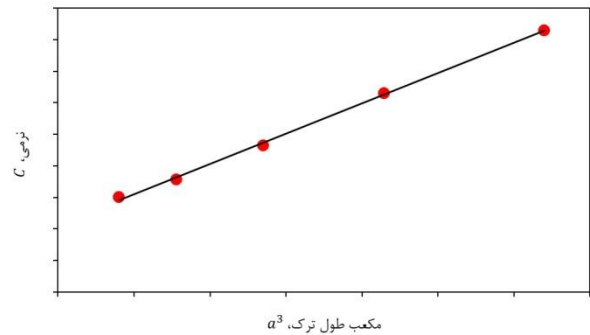
ب: 0//30



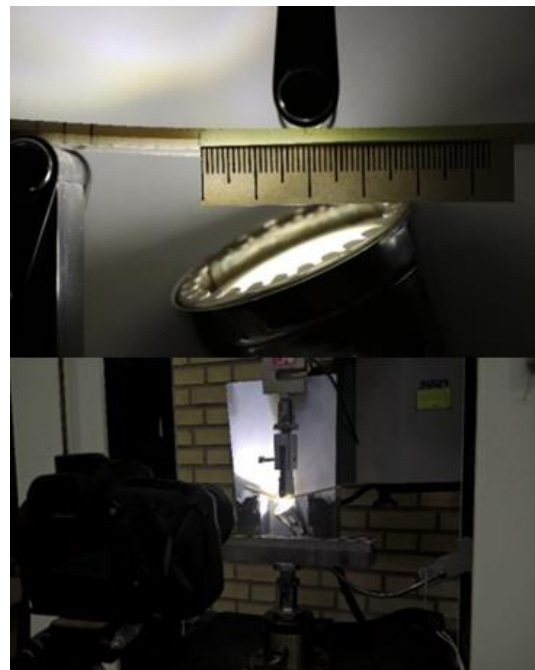
ج: 30//30

**شکل ۵** مقایسه نمودارهای بار-جابجایی بدست آمده از آزمایش‌ها برای نمونه‌های با زاویه فصل مشترک تورق الف) ۰//۰ ب) ۰//۳۰ ج) ۳۰//۳۰- شکست

حساب توان سوم طول ترک و انجام برازش منحنی روی آن، مقدار پارامتر  $m$  مشخص می‌گردد؛  $m$  شیب خط برازش شده بر داده‌ها می‌باشد (نشان داده شده در شکل ۳). در پایان با تعیین پارامتر  $m$ ، مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از رابطه (۱) استخراج می‌گردد؛ لازم به ذکر است که استاندارد ASTM D7905 برای نمونه‌های تک جهته می‌باشد اما به دلیل اینکه برای نمونه‌های بافته شده استاندارد وجود ندارد، تمامی ابعاد نمونه‌ها بر اساس استاندارد مذکور می‌باشد. همچنین طول ترک با تهیه تصاویر از رشد ترک در حین آزمایش و با استفاده از خط کش کاغذی چسبان به نمونه اندازه‌گیری شده است (شکل ۴). این نکته نیز باید ذکر گردد که به منظور استخراج چقرمگی شکست می‌بایست طول ترک، بار و جابه‌جایی محل اعمال بار به صورت همزمان ثبت گردند. بار و جابه‌جایی با استفاده نرم افزار ثبت تصاویر در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه ذخیره شده و از طرفی دیگر دوربین کانون  $d80$  نیز تصاویر با کیفیت مناسب  $6000 \times 4000$  پیکسل را از نمونه در فواصل زمانی یاد شده ثبت نموده است.



شکل ۳) نمودار شماتیک نرمی بر حسب مکعب طول ترک



**شکل ۴** تجهیزات آزمایشگاهی و تنظیم دستگاه جهت انجام آزمایش شکست

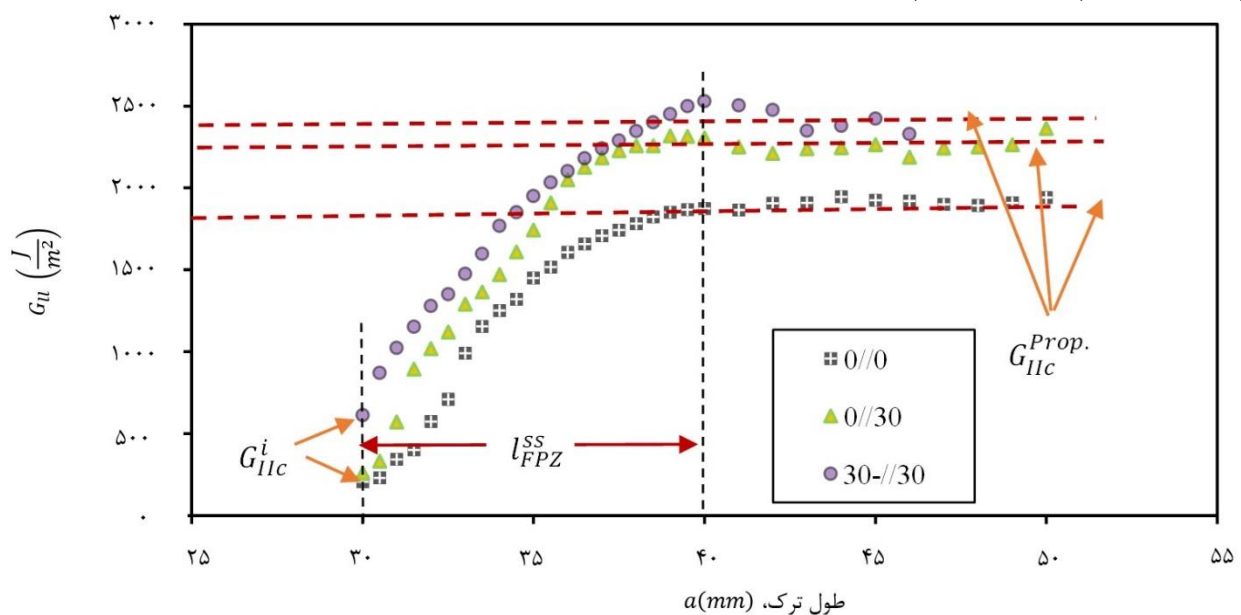


شروع به رشد کرده و چقرمگی شکست به حالت پایا می‌رسد طول ناحیه فرآیند (Fracture Process Zone) نامگذاری می‌گردد که این طول مطابق با شکل ۶ در هر سه نمونه تقریباً یکسان می‌باشد.

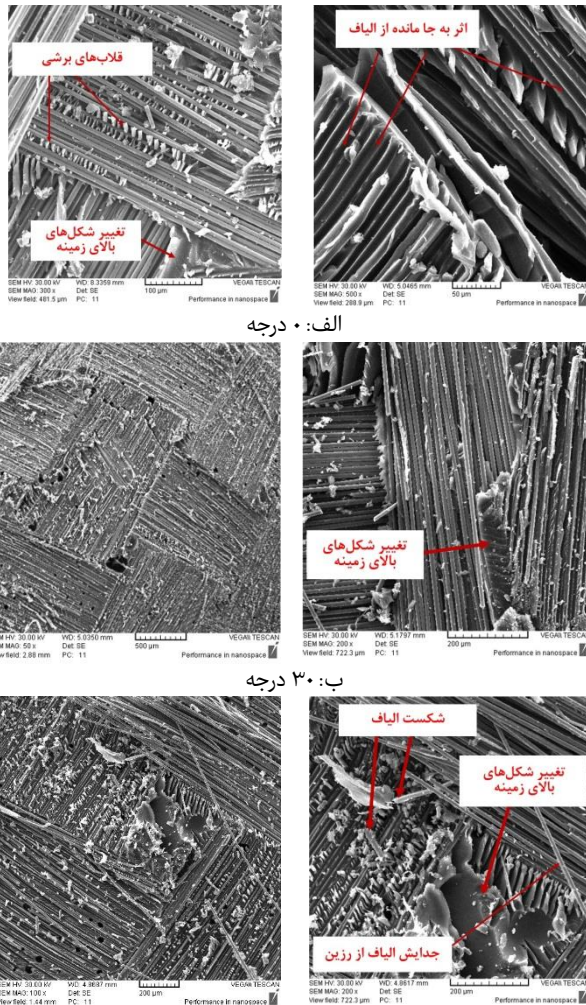
همانطور که در این شکل مشخص است، هر سه نمونه دارای منحنی مقاومت مؤثر بوده به طوری که مقدار چقرمگی شکست پایا در نمونه‌های با زوایای فصل مشترک مختلف به ۶ تا ۸ برابر مقدار چقرمگی شکست شروع در نمونه ۳۰//۳۰- بیشترین مقدار خود را داشته است. علاوه بر این چقرمگی شکست پایا در نمونه با زاویه فصل مشترک تورق ۰//۰ کمترین مقدار را در بین نمونه‌ها دارا می‌باشد. لازم به ذکر است رفتار Stick-slip در مود I چندلایه‌های کامپوزیتی به دلیل پل زنی الیاف اتفاق می‌افتد. این پدیده خود را در نمودار بار-جاب‌جایی به صورت افت و خیزهای ناگهانی در حین رشد تورق نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر با توجه به روند مشاهدات صورت گرفته در حین آزمایش، عدم پل زنی الیاف در ناحیه فصل مشترک تورق و همینطور نمودار بار-جاب‌جایی ارائه شده، رفتار Stick-slip مشاهده نشده است. به منظور درک مکانیزم رشد ترک و دلایل تفاوت در چقرمگی شکست نمونه‌ها از سطوح شکست تورق، تصاویر ماکرو و میکرو تهیه شده است. این تصاویر در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. با دقت در شکل ۷ که تصاویر ماکرو از سطوح شکست نمونه‌ها تهیه شده، می‌توان دریافت که مکانیزم اصلی رشد تورق در نمونه‌های با زاویه الیاف فصل مشترک ۰//۰، رشد ترک در فصل مشترک الیاف و رزین می‌باشد که این نتیجه با رزین برجای مانده بر روی یک سطح ترک و الیاف باقی مانده در سطح متناظر

تا انتهای نمودار ادامه می‌یابد. در این ناحیه نمونه با رشد تورق همراه بوده که در این ناحیه همراه با رشد ترک، مقدار بار در حال افزایش می‌باشد. بعد از رسیدن بار به مقدار بیشینه، با افزایش طول ترک مقدار بار روندی کاهشی به خود گرفته است؛ به عبارت دیگر ابتدا در نمودار بار-جاب‌جایی ناحیه خطی مشاهده می‌گردد که ناشی از پاسخ الاستیک و خطی تیر بوده، سپس با شروع رشد تورق و افزایش طول تورق مقدار سختی تیر کاهش یافته و روندی غیرخطی در نمودار بار-جاب‌جایی مشاهده می‌گردد. همچنین نمونه با فصل مشترک تورق ۳۰//۳۰- دارای بیشترین مقدار بار بیشینه در بین نمونه‌های مختلف بوده است. علاوه بر این، با دقت در نمودار ارائه شده در شکل ۵ و مقایسه داده‌ها با نتایج نمونه با زاویه فصل مشترک الیاف ۰//۰، مشخص می‌گردد که به دلیل تغییر زاویه یک لایه در لمینیت، تغییر چندانی در ناحیه خطی اولیه در منحنی بار-جاب‌جایی دیده نمی‌شود و سختی ابتدایی این دو منحنی تقریباً برابر می‌باشد در صورتیکه مقدار ماکزیمم بار قابل تحمل افزایش می‌یابد که مقدار آن برای نمونه با فصل مشترک ۳۰//۳۰- کمی بیشتر از نمونه مشابه با فصل مشترک ۰//۰ بوده است. از دیگر نتایج مهم در این آزمایش، این بوده است که رشد ترک در این نوع از چندلایه‌های کامپوزیتی (با الیاف بافته شده) در تحقیق حاضر برخلاف برخی از موارد آزمایش شده بر روی چندلایه‌های با الیاف تک‌جهته در تحقیقات دیگر محققین از یک رشد پایدار برخوردار بوده است [23].

شکل ۶ نمودار منحنی‌های مقاومت سه نمونه ۰//۰، ۳۰//۳۰ و ۳۰//۳۰- می‌باشد که مطابق با رابطه (۱) محاسبه شده، نشان داده شده است. به مقدار چقرمگی شکست بدست آمده در ابتدای رشد ترک، مقدار چقرمگی شکست شروع و مقدار نوسانی آن، چقرمگی شکست پایا می‌گویند؛ همچنین طول ناحیه‌ای که ترک



شکل ۶) مقایسه منحنی‌های مقاومت بدست آمده از آزمایش‌ها برای نمونه‌های با زوایای مختلف فصل مشترک تورق



ج: ۳۰- درجه

شکل ۸) میکروگرافی الکترونی روبشی سطوح تورق در لایه با زاویه الیاف (الف) ۰ درجه، (ب) ۳۰ درجه، (ج) ۳۰- درجه

#### ۴- نتیجه گیری

یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر، بررسی شروع و رشد تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده ساده با زوایای مختلف فصل مشترک تورق تحت بارگذاری مود II بوده است. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده ساده با لایه‌چینی  $[0]_{24}$ ،  $[0_{11}/30//0_{12}]$  و  $[0_{11}/30//30/0_{11}]$  با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. با برش نمونه‌های با شکاف انتهایی از چندلایه ساخته شده و تجهیز مناسب آزمایشگاهی مطابق با استاندارد ASTM D7905 تحت آزمایش مود II شکست قرار گرفتند. آنگاه با استفاده از روش کالیبراسیون نرمی، پیشنهاد شده توسط استاندارد یاد شده به محاسبه مقدار چقرمگی شکست بین-لایه‌ای در هر یک از نمونه‌ها پرداخته شد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که رشد ترک در سه نمونه یاد شده به صورت تدریجی و پایدار بوده است و این نتیجه از نمودار بار-جابجایی بدست آمده از آزمایش نیز مشهود می‌باشد. همچنین مقایسه منحنی مقاومت سه نمونه نشان می‌دهد که مقدار چقرمگی شکست شروع در نمونه‌های با

آن در این تصاویر مشهود می‌باشد. این موضوع در سایر فصول مشترک تورق نیز همراه با سایر مکانیزم‌های آسیب قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۷-ج آسیبی مانند شکست الیاف و ماتریس در هر دو سطح شکست (زوایای غیر صفر) مشاهده می‌گردد که این خود موجب می‌گردد تا ترک به منظور رشد در بین این نوع از فصول مشترک تورق نیاز به انرژی بالاتری داشته باشد. همچنین تصاویر برگرفته از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان از تغییر شکل‌های بالای زمینه (Highly deformed matrix)  $[24]$  در نمونه با زاویه فصل مشترک ۰/۱۰ دارد. از طرفی دیگر همانطور که اشاره گردید تصاویر میکروسکوپ روبشی نیز حاکی از این موضوع است که لایه با زاویه غیر صفر در ناحیه فصل مشترک، در حین رشد تورق در این ناحیه متحمل آسیبهایی مانند شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس که این خود موجب مصرف انرژی در ناحیه شکست می‌گردد. آسیب یاد شده در کنار مکانیزم رشد تورق در فصل مشترک الیاف و رزین موجب می‌گردد تا چقرمگی شکست پایا در نمونه با فصل مشترک تورق ۳۰/۱۳۰- بیشتر از مقدار متناظر آن در نمونه با فصل مشترک تورق ۰/۱۰ باشد. ذکر این نکته الزامی است که از آنجائیکه سطوح با زاویه غیر صفر در ناحیه فصل مشترک تحت آسیب قرار می‌گیرد، تصاویر میکرو در دو نمونه ENF با زوایای ۳۰/۱۰ و ۳۰/۱۳۰- از سطوح غیر صفر تهیه شده است.



الف: 0/0



ب: 0/30



ج: 30//30

شکل ۷) تصاویر ماکرو از سطح ترک نمونه‌های (الف) ۰/۱۰، (ب) ۳۰/۱۰، (ج) ۳۰-//۱۳۰

- 5- Davidson BD, Sun X. Effects of friction, geometry, and fixture compliance on the perceived toughness from three-and four-point bend end-notched flexure tests. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2005;24(15):1611-28.
- 6- Shin S, Jang J. Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of materials science*. 1999;34(21):5299-306.
- 7- Ozdil F, Carlsson LA, Davies P. Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens. *Composites Science and Technology*. 1998;58(12):1929-38.
- 8- Pereira AB, De Morais AB, Marques AT, De Castro PT. Mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy multidirectional laminates. *Composites Science and Technology*. 2004;64(10-11):1653-9.
- 9- Tao J, Sun CT. Influence of ply orientation on delamination in composite laminates. *Journal of composite materials*. 1998;32(21):1933-47.
- 10- Shokrieh MM, Zeinedini A. Prediction of strain energy release rate of asymmetric double cantilever composite beam using equivalent lay-up for mixed-mode I/II delamination. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(13):214-25. (in Persian)
- 11- Choi NS, Kinloch AJ, Williams JG. Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber/epoxy composites under mode I, mode II and mixed-mode I/II loading. *Journal of Composite Materials*. 1999;33(1):73-100.
- 12- Gong Y, Zhang B, Zhao L, Zhang J, Hu N, Zhang C. R-curve behaviour of the mixed-mode I/II delamination in carbon/epoxy laminates with unidirectional and multidirectional interfaces. *Composite Structures*. 2019;223:110949.
- 13- Bascom WD, Bitner MJ, Moulton RJ, Siebert AR. The interlaminar fracture of organic-matrix, woven reinforcement composites. *Composites*. 1980;11(1):9-18.
- 14- Moradi E, Zeinedini A. On the mixed mode I/II/III inter-laminar fracture toughness of cotton/epoxy laminated composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020;105:102400.
- 15- Amini M, Kalantari S, Khavandi A. Analysis of tensile failure mode and the mechanism dominated over polymer composite degradation. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2020;6(4):601-8.
- 16- Srivastava VK, Gries T, Veit D, Quadflieg T, Mohr B, Kolloch M. Effect of nanomaterial on mode I and mode II interlaminar fracture toughness of woven carbon fabric reinforced polymer composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;180:73-86.
- 17- Wood MD, Sun X, Tong L, Luo Q, Katzos A, Rispler A. A new ENF test specimen for the mode II delamination toughness testing of stitched woven CFRP laminates. *Journal of composite materials*. 2007;41(14):1743-72.
- 18- Hirai Y, Hamada H, Kim JK. Impact response of woven glass-fabric composites—I.: Effect of fibre surface treatment. *Composites Science and Technology*. 1998;58(1):91-104.

زاویه فصل مشترک تورق ۰/۱۰ و ۳۰/۱۰ تقریباً تفاوت چندانی نداشته و این در حالی است که مقدار چقرمگی شکست پایا در نمونه‌ی ۳۰/۱۰ بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نمونه‌ی ۳۰/۱۰ دارای چقرمگی شکست شروع و پایای بیشتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر است که علت این امر این است که ترک در ابتدا در ناحیه‌ی فصل مشترک حرکت می‌کند و بعد از کمی رشد، سبب آسیب در لایه‌های ۳۰ و ۳۰- می‌گردد که این نوع آسیب ناشی از استحکام پایین لایه‌ی ۳۰ نسبت به صفر می‌باشد. به منظور درک بهتر مکانیزم رشد ترک در نمونه‌های یاد شده، تصاویری از سطوح شکست نمونه‌ها گرفته شده و با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج شکست نگاری از سطوح تورق نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی رشد تورق در نمونه‌های ۰/۱۰ و ۳۰/۱۰، رشد ترک در فصل مشترک رزین-الیاف بوده است در صورتیکه در نمونه‌ی ۳۰/۱۰- ترک به دلیل آسیب پذیر بودن لایه ۳۰ نسبت به صفر باعث آسیب بیشتری شده و می‌توان بیان کرد که آسیب در این نمونه شامل جدایش رزین از الیاف و همچنین شکست الیاف می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** نتایج علمی بیان شده حاصل فعالیت‌های پژوهشگران مقاله بوده و تا کنون در مجله دیگری چاپ نگردیده است؛ همچنین صحت نتایج بر عهده‌ی نویسندگان مقاله می‌باشد.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که مقاله‌ی حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌ها ندارد.

**سه‌م نویسندگان:** مظاهر سلامت طلب (نویسنده اول)، ساخت، تحلیل نتایج و ویرایش مقاله (۴۰ درصد)؛ علی زین‌العابدین بیگی (نویسنده دوم)، تست، استخراج نتایج، نگارش مقاله (۳۰ درصد)؛ سید مرتضی سیدنژاد (نویسنده سوم)، تست و استخراج نتایج آزمایشگاهی (۳۰ درصد)

**منابع مالی:** تأمین تمامی هزینه‌ها بصورت شخصی بوده است.

#### منابع

- 1- Hashemi S, Kinloch AJ, Williams JG. The effects of geometry, rate and temperature on the mode I, mode II and mixed-mode I/II interlaminar fracture of carbon-fibre/poly (ether-ether ketone) composites. *Journal of Composite Materials*. 1990;24(9):918-56.
- 2- Williams JG. On the calculation of energy release rates for cracked laminates. *International Journal of Fracture*. 1988;36(2):101-19.
- 3- Lyashenko-Miller T, Marom G. Delamination fracture toughness of UHMWPE fibers/polyurethane laminates interleaved with carbon nanotube-reinforced polyurethane films. *Polymers for Advanced Technologies*. 2017;28(5):606-12.
- 4- Whitcomb JD. Analysis of instability-related growth of a through-width delamination. *National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center*; 1984.



- 19- Gill AF, Robinson P, Pinho S. Effect of variation in fibre volume fraction on modes I and II delamination behaviour of 5HS woven composites manufactured by RTM. *Composites science and technology*. 2009;69(14):2368-75.
- 20- Shin S, Jang J. Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of materials science*. 1999;34(21):5299-306.
- 21- Pereira AB, De Morais AB. Mode II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2004;35(2):265-72.
- 22- Kharratzadeh-Khorasgani M, Salamat-talab M. Experimental investigation of delamination growth in laminated composites made of woven fabric/epoxy with 0// $\theta$  Interface. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(9):26-32. (in Persian)
- 23- Kolor SS, Tamin MN. Mode-II interlaminar fracture and crack-jump phenomenon in CFRP composite laminate materials. *Composite Structures*. 2018;204:594-606.
- 24- Hosseini MR, Taheri-Behrooz F, Salamat-Talab M. Mode II interlaminar fracture toughness of woven E-glass/epoxy composites in the presence of mat interleaves. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;98:102523.