



بررسی آزمایشگاهی رشد تورق در مود I چندلایه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف بافته شده ساده/اپوکسی با فصل مشترک 0//θ

مجید خراطزاده خوراسگانی¹، محمود مهرداد شکریه^{2*}، مظاهر سلامت طلب³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

*تهران، صندوق پستی 16846-13114، shokrieh@iust.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اثر زاویه الیاف فصل مشترک 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 $[0_{11}/45/0/0_{11}]$ تحت مود I تورق مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نوع لایه‌چینی به منظور حذف اثرات لایه‌های دور دست فصل مشترک تورق بر چقرمگی شکست نمونه تیر دولبه یکسرگیردار انتخاب شده است. نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند و آزمایش شکست نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه تست کشش ستام انجام گرفته است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که تغییر در زاویه بین وجهی صفحه ترک، تأثیر ناچیزی بر چقرمگی شکست شروع و پایای کامپوزیت‌های بافته شده با بافت ساده دارد. بررسی‌های آزمایشگاهی از سطوح شکست نشان از تأثیر ساز و کارهای مختلف بر روند رشد تورق در این نمونه‌ها داشته است که در این بین رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف یکی از ساز و کارهای اصلی افزایش چقرمگی شکست در این نمونه‌هاست، همچنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که برخلاف کامپوزیت‌های تک‌جهته در نمونه‌های تیر دو سرگیردار بافته شده، پل‌زنی الیاف ساز و کار غالب در افزایش چقرمگی شکست در طول فرایند رشد تورق نیست.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 بهمن 1396
پذیرش: 14 فروردین 1397
ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
زاویه الیاف فصل مشترک
کامپوزیت تقویت شده با الیاف بافته شده ساده
چقرمگی شکست شروع و پایا
تیر یکسرگیردار دولبه

Experimental investigation of delamination growth in laminated composites made of plain woven fabric/epoxy with 0//θ Interface

Majid Kharratzadeh Khorasgani¹, Mahmood Mehrdad Shokrieh^{1*}, Mazaher Salamt talab²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 February 2018
Accepted 03 April 2018
Available Online 17 May 2018

Keywords:

Interface fiber angle
plain woven composites
Initiation and propagation fracture toughness
Double cantilever beam

ABSTRACT

In this study, the effect of delamination interface fiber angle orientation on the initiation and propagation fracture toughness of plain woven composites with stacking sequences of $[0_{12}/0_{12}]$, $[0_{11}/30/0/0_{11}]$ and $[0_{11}/45/0/0_{11}]$ under mode I loading were investigated. These stacking sequences are chosen in order to eliminate the effect of the remote ply orientation on the delamination behavior of the double cantilever beam (DCB) specimens. Samples were manufactured by the wet hand lay-up method and fracture tests were conducted on specimens using the universal testing machine (SANTAM STM-150). The experimental results showed that the interface ply orientation had a negligible effect on magnitudes of the initiation and propagation fracture toughness of plain woven composites due to delamination propagation in the resin-fiber interface of delamination interface. Experimental investigations of the fracture surface have shown the effect of different mechanisms on the delamination propagation, which crack propagation in the resin-fiber interface is one of the main mechanisms for increasing the fracture toughness in these specimens. In addition, the experimental evidence revealed that the fiber bridging was not the main mechanism of increasing fracture toughness during the delamination propagation, unlike the unidirectional DCB specimens.

1- مقدمه

کامپوزیتی کمک مفید خواهد بود. فانک و دیتون [2,1] چقرمگی شکست بین لایه‌های مود اول تورق برای کامپوزیت پارچه‌ای از جنس کربن/اپوکسی را آزمایش و با کامپوزیت تک‌جهته از همان جنس مقایسه کردند. نتایج نشان می‌داد چقرمگی شکست مود اول تورق برای کامپوزیت پارچه‌ای از دو تا

تورق یکی از مهم‌ترین ساز و کارهای تخریب در مواد کامپوزیتی لایه‌ای است. تورق در کامپوزیت‌ها به دلیل وجود بار ضربه‌ای خستگی و غیره رخ می‌دهد؛ بنابراین بررسی و پیش‌بینی این نوع تخریب در طراحی و ساخت سازه‌های

هشت برابر بزرگ‌تر از کامپوزیت تک‌جهته با زاویه صفر درجه است، همچنین این دو محقق اثر چهار نوع بافت ساده¹، آکسفورد²، ساتن 5 قلابی³ و ساتن 8 قلابی⁴ را بر چقرمگی شکست مود اول مورد بررسی قرار دادند. چقرمگی شکست مربوط به بافت آکسفورد و در جهت پود به دلیل قرار گرفتن بیشتر الیاف‌ها در جهت عمود بر جهت رشد ترک، بیشترین مقدار را در بین انواع بافت دارا بود.

ارتون و فراسر [4,3] با مطالعات میکروسکوپی از سطوح شکست به بیان دلایل بزرگ‌تر بودن چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های بافته شده نسبت به کامپوزیت‌های تک‌جهته پرداخته‌اند. آن‌ها با بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های بافته شده نشان دادند تورق در چندلایه‌های بافته شده دارای چند جبهه (پیشانی) ترک بوده و رشد ترک از الگوی موج‌دار تار⁵ و پود⁶ پیروی می‌کند. در طول رشد ترک پایدار، نخ‌هایی که در راستای رشد ترک قرار دارند برخلاف نخ‌های عمود بر آن بیشتر رشد می‌کنند که نتیجه آن جبهه ترک ناپیوسته است. با ادامه این روند رشد ترک ناپایدار شده که باعث افت بار ناگهانی می‌گردد و تمامی جبهه ترک به جلو جهش می‌کند و جبهه ترک در راستای عرض نمونه در یک‌راستا قرار می‌گیرد. با تکرار این روند رشد ترک کامل می‌گردد. تغییرات پیوسته و ناپیوسته شدن جبهه ترک به صورت دوره‌ای به دلیل اثر جهت رشته نخ‌ها بر میدان تنش نوک ترک و در نتیجه چقرمگی شکست بین لایه‌ای است.

باسکام و همکاران [5] تحقیقی بر شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های پارچه‌ای از جنس شیشه و کربن در مود اول تورق انجام داده‌اند. طی این تحقیق دریافتند که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با افزودن عوامل تقویت‌کننده الاستومری به رزین اپوکسی یا جایگزینی رزین ترموپلاستیک به جای رزین اپوکسی افزایش قابل توجهی خواهد داشت. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که بیشترین افزایش چقرمگی شکست در کامپوزیت پارچه‌ای از جنس کربن با اضافه کردن مواد الاستومری به رزین است. کیم و شام [6] طی تحقیقی که انجام دادند ویژگی ذاتی پارچه که تار و پود به صورت تناوبی به یکدیگر بافته شده‌اند را عاملی برای افزایش چقرمگی شکست در حین رشد تورق در بین لایه‌ها در پارچه‌ها بیان کردند.

از دیگر دلایل بزرگ‌تر بودن چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های بافته شده نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک‌جهته، سطح پارچه است که به دلیل نوع بافت و موج‌دار بودن آن محل مناسبی برای تجمع رزین‌ها بین تار و پود است. این نوع بافت باعث می‌گردد رزین کمتر درون الیاف نفوذ کند و ضخامت بزرگ‌تری از رزین بین دو لایه شکل بگیرد. از این‌رو اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک در کامپوزیت‌های بافته شده بزرگ‌تر از کامپوزیت‌های غیربافته شده می‌شود که عاملی برای افزایش چقرمگی شکست است [8,7,4].

بریسکو و همکاران [7] به بررسی اثرات سطح بافت و نوع بافت ساده و ساتن بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای چندلایه‌های کامپوزیتی آرامید/اپوکسی پرداختند. نتایج این محققین نشان می‌دهد که زبری سطح پارچه تأثیر بیشتری نسبت به نوع بافت بر افزایش چقرمگی شکست دارد. به این صورت که الیاف‌های زبرتر و ضخیم‌تر بیشتر درون رزین بین لایه‌ای نفوذ کرده و کنده شده آن‌ها از رزین سخت‌تر می‌شود که باعث افزایش چقرمگی

شکست می‌گردد. وانگ و زائو [9] با استفاده از آزمایش تأثیر دو عامل الگوی بافت و اضافه کردن ریزالیاف⁷ به رزین را بر چقرمگی شکست مود اول تیر دولبه یکسرگیردار از جنس شیشه و کولار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی این محققین نشان داد که در پارچه‌های بافته شده با بافت مختلف، ولی با نسبت حجمی برابر، نوع الگوی بافت تأثیر زیادی بر رفتار چقرمگی شکست دارد و اضافه کردن ریزالیاف به رزین باعث بهبود چقرمگی شکست بین لایه‌ای می‌شود. الیف و همکاران [10] به بررسی تأثیر الگوهای مختلف بافت و جهت رشد ترک (جهت تار یا پود) بر چقرمگی شکست در مود اول برای بافت‌هایی از جنس کربن و شیشه پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که پل‌زنی الیاف در بافت‌های جناغی و ساتن رخ می‌دهد، ولی در بافت‌های ساده و ساتن 5 قلابی پل‌زنی الیاف رخ نمی‌دهد. سوپاکول و باندیوپادای [11] به بررسی تأثیر انواع بافت بر چقرمگی شکست مود اول تورق پرداخته‌اند. این دو طی آزمایش‌هایی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بیشترین چقرمگی شکست شروع مربوط به پارچه ساتن 8 قلابی و بیشترین چقرمگی شکست در حالت رشد ترک مربوط به چندلایه‌ای جناغی است.

ناوارو و همکاران [12] به بررسی اثر عواملی مانند جنس لایه‌ها، سرعت رشد ترک و ترتیب لایه‌چینی بر چقرمگی شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بافته شده ساتن در مود اول تورق پرداختند. آن‌ها سه نمونه با لایه‌چینی [0₆/0₆]، [0₅/45//0/45/0₄] و [0₅/45//45/0₅] برای بررسی اثر لایه چینی بر چقرمگی شکست در نظر گرفتند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد، اگر زاویه الیاف در دو لایه‌ای که در سطح ترک قرار دارند هم‌جهت با راستای رشد ترک نباشد چقرمگی شکست نسبت به حالتی افزایش می‌یابد که زوایای سطح مشترک تورق در یک‌راستا هستند. در تحقیقی دیگر تریکی و همکاران [13] اثر تغییر زاویه‌های فصل مشترک با در نظر گرفتن لایه چینی الیاف به صورت [0]₁₂، [30]₁₂، [45]₁₂ و [70]₁₂ را مورد بررسی قرار دادند. با افزایش زاویه فصل مشترک از صفر تا زاویه 30 درجه، چقرمگی شکست افزایش پیدا می‌کند، ولی از این زاویه تا زاویه 90 درجه چقرمگی شکست روند کاهشی دارد. از مشکلات تحقیق آن‌ها می‌توان به در نظر نگرفتن اثر زوایای دوردست بر چقرمگی شکست همراه با اثر زوایای مختلف الیاف در فصل مشترک و میزان انحراف معیار بالا در مقدار چقرمگی شکست اولیه و پایا اشاره کرد. یکی دیگر از عواملی که در این تحقیق می‌تواند تأثیرگذار باشد، وجود آسیب در لایه‌های دور دست با افزایش زاویه الیاف است که این خود می‌تواند مقدار چقرمگی شکست به دست آمده را تحت تأثیر قرار دهد.

فانتیریا و همکاران [14] به بررسی تفاوت در خواص چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در مود اول و دوم و مود ترکیبی اول و دوم در مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی موجود در دو نوع الیاف تک‌جهته و پارچه بافته شده ساتن پنج قلابی پرداختند. هدف آن‌ها در این تحقیق بررسی عمیق‌تر تفاوت‌ها در ساز و کار شکست کامپوزیت‌های تک‌جهته و بافته شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت پارچه‌ای بزرگ‌تر از نوع تک‌جهته است. طی این تحقیق شکسته شدن و تخریب الیاف‌ها در هر دو جهت تار و پود، تشکیل حوضچه‌های رزین بین تار و پود، کنده شدن الیاف‌های پود به صورت دسته‌ای از سطح شکست عواملی هستند که باعث افزایش جذب انرژی و در نتیجه افزایش چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های پارچه‌ای می‌شوند.

¹ Plain

² Oxford

³ 5-harness satin

⁴ 8-harness satin

⁵ Warp

⁶ Weft or Fill

⁷ Microfiber

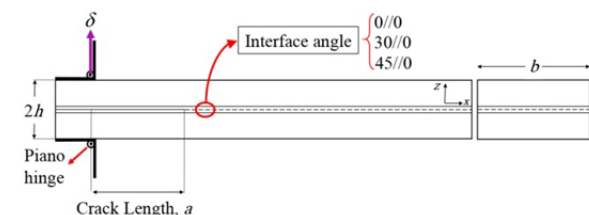


Fig. 1 Schematic of DCB specimen with varies stacking sequences with piano hinge

شکل 1 پارامترهای هندسی و زاویه صفحه ترک در نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه همراه با لولا

mm150 و عرض mm25 به منظور انجام آزمایش برش داده می‌شوند.

2-2- روش آزمایش

بر اساس شکل 2 تمامی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش سنتام³ مورد آزمایش قرار گرفته است. برای تعیین مدول الاستیک، مدول برشی و مدول خمشی آزمایش‌هایی مطابق استانداردهای موجود طراحی شد. با توجه به این که الیاف بافته شده و از نوع ساده است مدول الاستیک در راستای 1 و 2 برابر هستند. از این رو تعیین مدول الاستیک در یک راستا (راستای 1 یا 2) کفایت می‌کند. برای تعیین مدول الاستیک سه نمونه مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا⁴ 3039 [21] ساخته شده است. برای اندازه‌گیری مدول الاستیک از یک اکستنسومتر با طول سنجه 50 mm و بیشترین بازشدگی دهانه mm10 استفاده شده است. برای به دست آوردن مدول خمشی مؤثر از استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا⁵ 790 [22] استفاده شده است. تعداد سه نمونه مطابق این استاندارد ساخته شد و تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفت. نتایج میانگین خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف بافته شده از نوع شیشه در جدول 1 آمده است.



Fig. 2 DCB specimen is being tested

شکل 2 نمونه تیر یکسرگیردار در حال آزمایش

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت با بافت ساده

Table 1 Mechanical properties of plain woven E-glass/Jana 1100

E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{33} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	E_{fx} (GPa)
21.3 ± 1.3	21.3 ± 1.3	9 ± 1.2	3.8 ± 0.9	0.1 ± 0.01	20.3 ± 0.4

³ Santam STM-150

⁴ ASTM D3039

⁵ ASTM D790

یکی از عواملی که می‌تواند بر منحنی مقاومت اثرگذار باشد ضخامت لایه‌ها است که از دو منظر ضخامت کل چند لایه و یا ضخامت تک لایه قابل بررسی است. در بحث ضخامت کل چند لایه تحقیقاتی در زمینه مود I چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف تک‌جهته شیشه و کربن انجام شده است. در این زمینه محققان مختلفی [15-17] نشان داده‌اند که افزایش ضخامت چندلایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته موجب افزایش چقرمگی شکست پایا در این نمونه‌ها شده است. از سوی دیگر شکریه و همکاران [18] نشان داده‌اند که می‌توان محدوده‌ای برای نسبت طول ترک اولیه به ضخامت نمونه ($8.5 < a_0/h < 17$) در نظر گرفت که در این بازه مقدار چقرمگی شکست شروع، پایا و طول پل‌زنی الیاف تغییر نمی‌نماید. در بحث ضخامت هر لایه، فراسارد و همکاران [19] تأثیر استفاده از لایه‌های تک‌جهته با چگالی سطحی کمتر بر چقرمگی شکست فرالایه‌ای را مورد بررسی قرار دادند.

عاملی دیگر که می‌تواند بر چقرمگی شکست و منحنی مقاومت اثرگذار باشد، لایه چینی دور دست نمونه است. شکریه و همکاران [20] به بررسی تأثیر لایه چینی دور دست بر منحنی مقاومت در نمونه‌های چند جهته با زاویه فصل مشترک 0/0 پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مقادیر اولیه و پایای چقرمگی شکست و شکل منحنی مقاومت در این نمونه‌ها تحت تأثیر لایه چینی دور دست قرار می‌گیرد. در حالتی که لایه چینی صفر درجه برای دسته‌های بالا و پایین فصل مشترک در نمونه تیر یکسر گیردار دو لبه در نظر گرفته شود، مقدار آسیب رخ داده در لایه‌های دور دست و در نتیجه انرژی آن بر منحنی مقاومت بسیار کاهش می‌یابد.

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق مشاهده می‌شود که در پژوهش‌های انجام شده در زمینه رشد تورق در کامپوزیت‌های بافته شده، تأثیر زاویه الیاف بین‌وجهی بر چقرمگی شکست بدون در نظر گرفتن اثر لایه‌های دور دست در حین رشد تورق، در کامپوزیت‌های بافته شده مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق نمونه‌های تیر یک سرگیردار دو لبه¹ با لایه چینی‌های $[0_{12}/0_{12}]$ ، $[0_{11}/30/0/0_{11}]$ و $[0_{11}/45/0/0_{11}]$ تحت مود I تورق قرار گرفته و روند رشد تورق در این نمونه‌ها مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. این نوع لایه چینی به دلیل حذف اثر لایه‌های دور دست بر چقرمگی شکست مود اول تورق انتخاب شده است.

2- روش ساخت و آزمایش

2-1- ساخت نمونه‌های تیر دو سر گیردار

نمونه‌های مورد آزمایش از الیاف شیشه بافته شده از نوع E با نوع بافت ساده با چگالی سطحی 200 g/m^2 و رزین اپوکسی جانا² همراه سخت‌کننده تنا با درصد ترکیب 13% ساخته شده است. نمونه‌های تیر دو سر گیردار مورد آزمایش نشان داده شده در شکل 1 دارای 24 لایه است. این نمونه‌ها به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. این نکته قابل بیان است که نتایج به دست آمده محدود به روش لایه‌گذاری دستی است و لزوماً قابل تعمیم به روش‌های دیگر ساخت نیست. چگالی الیاف شیشه و رزین اپوکسی به ترتیب برابر 2.5 g/cm^3 و 1.13 g/cm^3 است، به منظور ایجاد پیش ترک به طول 30 mm از نوار چسب تفلون به ضخامت 17 میکرون استفاده شده است. برای پخت قطعه نمونه‌ها را به مدت هفت روز در دمای محیط 25°C و سپس به مدت دو ساعت در دمای 80°C و یک ساعت در دمای 110°C نگه‌داشته می‌شود تا فرآیند پخت قطعه تکمیل شود. نمونه‌ها با طول

¹ Double Cantilever Beam (DCB)

² Jana

3- نتایج آزمایشگاهی

طول ناحیه فرآیند شکست ثابت باقی می‌ماند. به این صورت که هم‌زمان با افزایش رشد ترک و ایجاد شدن ناحیه بدون کشش بین دو وجه ترک در نوک اولیه آن ناحیه‌ای با تنش کششی بین دو وجه جدید ترک به وجود می‌آید. مقادیر میانگین چقرمگی شکست اولیه و پایا و طول ناحیه شکست متناظر آن در شکل 3-c-a5 نشان داده شده است.

در جدول 2 مقادیر بار و جابه‌جایی در نقطه غیرخطی شدن و مقادیر چقرمگی شکست شروع تورق با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده برای نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در زاویه فصل مشترک با حذف اثر لایه‌های دور دست به دلیل رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف تأثیر چندانی در مقدار بار و جابه‌جایی در نقطه غیرخطی شدن ندارد. همچنین با توجه به وابسته بودن مقدار چقرمگی شکست شروع به مقادیر بار و جابه‌جایی و از طرف دیگر ثابت بودن این مقادیر، چقرمگی شکست شروع در تمامی نمونه‌ها با زوایای فصل مشترک مختلف تقریباً برابر است.

چقرمگی شکست پایا و طول ناحیه فرآیند شکست برای نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف با حذف اثر لایه‌های دور دست در جدول 3 ارائه شده است. برای محاسبه این دو پارامتر از روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است. با توجه به نتایج جدول 3 تغییر در زاویه الیاف فصل مشترک نمی‌تواند تأثیری بر طول ناحیه فرآیند شکست و چقرمگی شکست پایا داشته باشد. رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف دلیل این نداشتن اثرگذاری و در نتیجه آن عدم تغییر در ساز و کار شکست است.

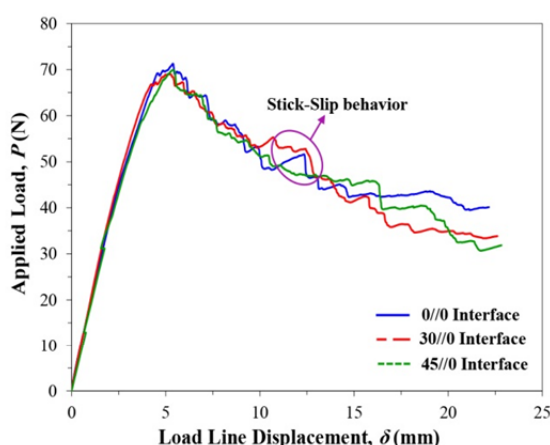


Fig. 3 Load-displacement curves of DCB specimens with varies stacking sequences

شکل 3 نمودار بار-جابه‌جایی برای نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف

جدول 2 مقادیر بار و جابه‌جایی در نقطه غیرخطی شدن و چقرمگی شکست شروع تورق در نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه

Table 2 Values of load and displacement in NL point and initiation fracture toughness in DCB specimen

$$2h=4.39\pm0.075, b=24.99\pm0.004, a_0=30.29\pm0.06$$

چقرمگی شکست اولیه (J/m ²) (±SDV)	مقادیر بحرانی در نقطه غیرخطی شدن جابه‌جایی (mm) (±SDV)	بار (N) (±SDV)	فصل مشترک تورق
142.5±7.1	1.978±0.064	37.48±0.53	0//0
141.4±5.3	2.015±0.052	38.13±0.79	30//0
133.26±2.6	2.034±0.091	36.36±0.44	45//0

پس از انجام آزمایش شکست بر نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه، منحنی بار-جابه‌جایی توسط دستگاه ذخیره شده است. این نمودار برای نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌توان مشاهده کرد در تمامی نمودارهای بار-جابه‌جایی به دست آمده در ابتدای نمودار و پیش از رشد تورق، رابطه خطی بین بار و جابه‌جایی برقرار است. قسمت خطی نمودار بار-جابه‌جایی بیان‌کننده سفتی خمشی بازوهای بالا و پایین نمونه تیر یکسر گیردار دو لبه است. پس از ناحیه خطی اولیه و شروع تورق، منحنی بار-جابه‌جایی روند غیرخطی به خود گرفته و این روند با ادامه رشد ترک ادامه یافته تا به مقدار بیشینه بار می‌رسد. بازه بین نقطه غیرخطی شدن و بیشینه نمودار را می‌توان به صورت تقریبی مرتبط با ناحیه فرآیند شکست در نوک ترک دانست که در این ناحیه وجود تنش‌های کششی سطح ترک¹ باعث صعودی شدن نمودار به صورت غیرخطی می‌شوند. پس از بیشینه بار به دلیل رشد ترک و کاهش سفتی نمونه و همین‌طور افزایش نیافتن طول ناحیه فرآیند شکست منحنی بار-جابه‌جایی روندی نزولی به خود می‌گیرد. در ناحیه گسترش پایدار ترک، رفتاری مانند درگیر و رها شدن مشاهده می‌شود. در نمونه‌های بافته شده این پدیده به دلیل نفوذ بهتر رزین در تار و بود رخ می‌دهد که سبب متوقف شدن رشد ترک و در نتیجه افزایش نیرو می‌شود. در این صورت با افزایش جابه‌جایی الیاف به صورت ناگهانی از سطح رزین کنده شده و مقدار نیرو افت محسوس می‌کند. نمودار بار-جابه‌جایی و پدیده‌های تأثیرگذار بر این نمودار در شکل 3 نشان داده شده است.

از نقطه غیرخطی شدن نمودار بار-جابه‌جایی مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528² [23] به عنوان معیاری برای به دست آوردن چقرمگی شکست شروع تورق استفاده شده است. برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است. مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528، رابطه (1) برای به دست آوردن چقرمگی شکست ارائه شده است.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (1)$$

در این رابطه b عرض قطعه و Δ ضریب اصلاح طول ترک است. ضریب Δ برابر با طول از مبدأ خط برازش شده بر نمودار ریشه سوم برحسب طول ترک است. برای این منظور نمودار ریشه سوم نرمی $(C^{1/3})$ برحسب طول ترک (a) رسم می‌گردد. تقاطع خط برازش شده بر این نمودار با محور افقی برابر با مقدار پارامتر Δ است. در شکل 4 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک حاصل از داده‌های آزمایش نمونه تیر یک سر گیردار با زاویه فصل مشترک 0//0 نشان داده شده است.

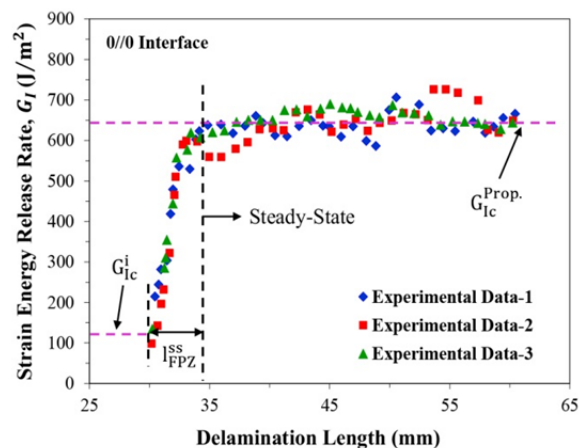
رفتار منحنی مقاومت³ برای لایه‌چینی بین‌وجهی مختلف در شکل 3-c-a5 نشان داده شده است. این منحنی بیانگر مقاومت ترک در برابر رشد است. همان‌طور که در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌گردد، پس از تورق اولیه مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی به دلیل وجود تنش‌های کششی سطح ترک افزایش می‌یابد تا به مقدار پایای خود برسد. طول بین طول ترک اولیه و طول ترک متناظر با چقرمگی شکست پایا به عنوان طول ناحیه فرآیند شکست پایا⁴ است. در نمونه‌های بافته شده با گذار از ناحیه انتقالی با افزایش طول ترک

¹ Traction

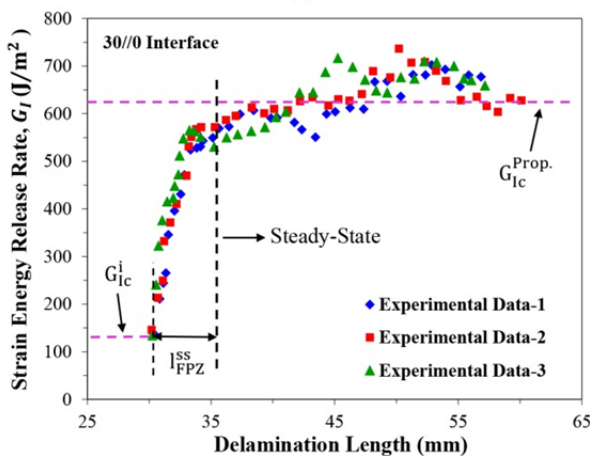
² ASTM D5528

³ Resistance Curve (R-curve)

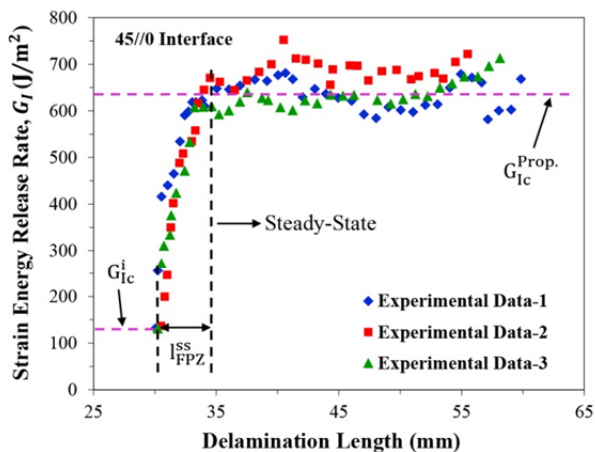
⁴ Steady-state Fracture Processes Zone



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 The R-curve behavior of the DCB specimen with varies stacking sequences

شکل 5 رفتار منحنی مقاومت نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف

تورق بسیار ناچیز است و ترک در صفحه بین رزین و الیاف رشد می‌کند. از این رو ساز و کار غالب در رشد ترک در این نوع کامپوزیت‌ها برخلاف کامپوزیت‌های تک‌چپته که پل‌زنی است [24]، رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف است. وجود ساز و کار رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف باعث عدم تأثیرگذاری تغییر در زوایای فصل مشترک بر منحنی مقاومت نمونه‌ها می‌گردد.

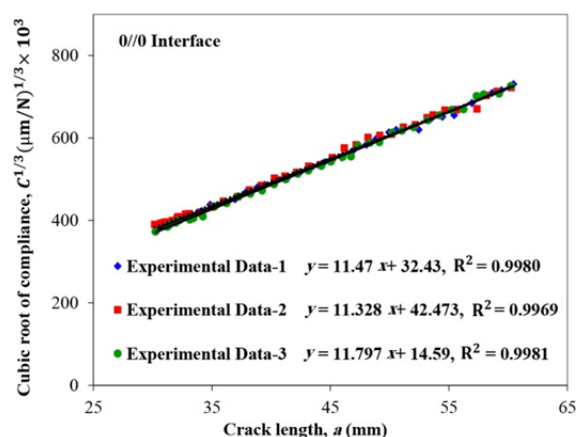


Fig. 4 Cubic root of compliance vs. delamination length with 0//0 interface angle

شکل 4 ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک برای زاویه فصل مشترک 0//0

جدول 3 مقادیر طول ناحیه‌ی فرآیند شکست و چقرمگی شکست پایا در نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه

Table 3 Values of fracture process zone and steady-state fracture toughness in DCB specimen

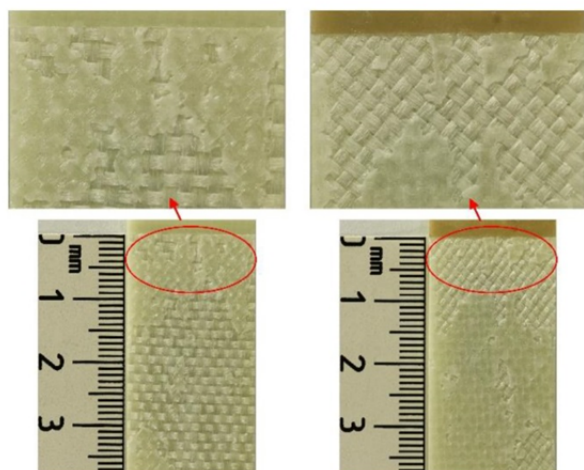
$2h=4.39\pm0.075$, $b=24.99\pm0.004$, $a_0=30.29\pm0.06$		
فصل مشترک	طول ناحیه فرآیند شکست (mm) ($\pm$ SDV)	چقرمگی شکست حالت پایا (J/m ²) ($\pm$ SDV)
0//0	3.42 $\pm$ 0.39	644.18 $\pm$ 7.3
30//0	3.8 $\pm$ 0.62	629.1 $\pm$ 6
45//0	3.87 $\pm$ 0.13	634.4 $\pm$ 1.03

3-1- بررسی سطح تورق و سازو کار رشد آن

به منظور رسیدن به درک عمیقی از ساز و کارهای درگیر در رشد ترک و عوامل افزایش چقرمگی شکست، سطح شکست نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک تورق متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. پس از شروع ترک رشد آن همراه با چندین ساز و کار آسیب در صفحه ترک است. این ساز و کارها شامل وجود ناحیه پلاستیک محلی در جبهه تورق، رشد تورق در صفحه بین رزین و الیاف یا کنده شدن الیاف از رزین حین رشد تورق و پل‌زنی الیاف است. الیاف استفاده شده در این تحقیق بافته شده از نوع ساده است که تار و پود به صورت اعوجاجی مطابق با شکل 6 از زیر و روی یکدیگر عبور کرده‌اند. دو عامل سبب شکل‌گیری ناحیه پلاستیک محلی در جبهه تورق به دلیل نوع الیاف به صورت بافته شده می‌شود. عامل اول تجمع رزین در نقاط بین تار و پود است که به اصطلاح نقاط غنی از رزین¹ می‌گویند. در شکل 6 نقاط مستعد برای تجمع رزین در بین تار و پود مشاهده می‌گردد. عامل دوم در افزایش ناحیه پلاستیک، نفوذ رزین کمتر بین تار و پود و تجمع آن در بین دو لایه است. وجود این نقاط در راستای رشد ترک باعث کندتر شدن رشد ترک می‌گردد.

رشد تورق در صفحه بین رزین و الیاف از دلایل دیگر افزایش چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های بافته شده است. با توجه به رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف، نفوذ مناسب رزین در تار و پود باعث افزایش مقاومت الیاف در برابر کنده شدن از سطح بالا یا پایین رزین در مسیر رشد تورق می‌شود. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌گردد که برای تمامی نمونه‌ها با زوایای فصل مشترک متفاوت رزین به یکی از سطوح سطح ترک چسبیده است. در این تصاویر مشاهده می‌شود که الیاف‌های پل‌زنی شده در ناحیه فصل مشترک

¹ Resin Rich



(c) 45//0 Interface

Fig. 7 Delamination surfaces of DCB specimens with different interface fiber angles

شکل 7 سطح صفحه تورق در نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه با زاویه‌های فصل مشترک متفاوت

شکست محاسبه شد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که تغییر یکی از زوایای فصل مشترک تورق بر مقادیر چقرمگی شکست شروع، پایا و همین‌طور طول ناحیه فرآیند شکست تأثیر بسیار اندکی داشته و از منحنی مقاومت به دست آمده برای نمونه‌های با فصل مشترک 0//0 می‌توان برای سایر فصول مشترک نیز استفاده نمود. نکته اخیر در بحث طراحی کامپوزیت‌ها برای لایه‌چینی‌های مختلف که سازه مورد نظر تحت بارگذاری مود اول قرار دارد از اهمیت به سزایی برخوردار است، همچنین شکست‌نگاری از سطوح ترک در نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه با زوایای فصل مشترک مختلف نشان می‌دهد که یکی از ساز و کارهای اصلی و غالب در افزایش چقرمگی شکست در حین رشد ترک در این نمونه‌ها، رشد ترک در صفحه بین رزین و الیاف است.

5- مراجع

- [1] J. G. Funk, J. W. Deaton, *The Interlaminar Fracture Toughness of Woven Graphite/Epoxy Composites*, NASA Langley Research Center, Hampton, Report No. NASA TP-2950, 1989.
- [2] J. G. Funk, G. F. Sykes, The effects of radiation on the interlaminar fracture toughness of a graphite/epoxy composite, *Composites, Technology and Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 92-97, 1986.
- [3] T. Ebeling, A. Hiltner, E. Baer, I. Fraser, M. Orton, Delamination failure of a woven glass fiber composite, *Composite Materials*, Vol. 31, No. 13, pp. 1318-1333, 1997.
- [4] T. Ebeling, A. Hiltner, E. Baer, I. Fraser, M. Orton, Delamination failure of a single yarn glass fiber composite, *Composite Materials*, Vol. 31, No. 13, pp. 1302-1317, 1997.
- [5] W. Bascom, J. Bitner, R. Moulton, A. Siebert, The interlaminar fracture of organic-matrix, woven reinforcement composites, *Composites*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-18, 1980.
- [6] J.-K. Kim, M.-L. Sham, Impact and delamination failure of woven-fabric composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 5, pp. 745-761, 2000.
- [7] B. Briscoe, R. Court, D. Williams, The effects of fabric weave and surface texture on the interlaminar fracture toughness of aramid/epoxy laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 47, No. 3, pp. 261-270, 1993.
- [8] S. Bazhenov, Strong bending in the DCB interlaminar test of thin, E-glass woven-fabric-reinforced laminates, *Composites*, Vol. 22, No. 4, pp. 275-280, 1991.
- [9] Y. Wang, D. Zhao, Characterization of interlaminar fracture behaviour of woven fabric reinforced polymeric composites, *Composites*, Vol. 26, No. 2, pp. 115-124, 1995.
- [10] N. Alif, L. A. Carlsson, L. Boogh, The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 603-611, 1998.
- [11] P. Suppakul, S. Bandyopadhyay, The effect of weave pattern on the mode-I interlaminar fracture energy of E-glass/vinyl ester composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 5, pp. 709-717, 2002.

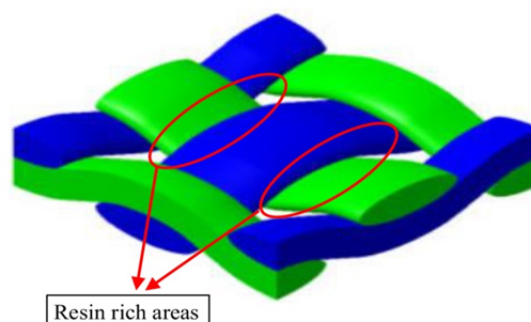
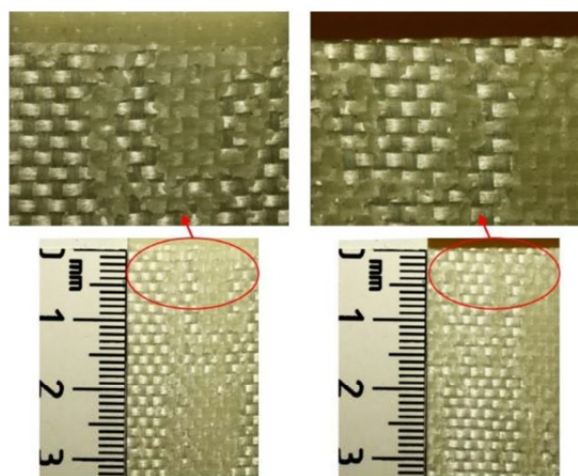


Fig. 6 Resin rich areas

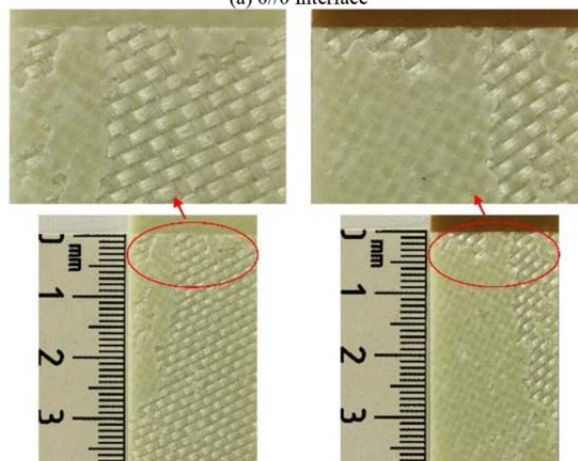
شکل 6 نواحی غنی از رزین

4- نتیجه گیری

هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی اثر زوایای فصل مشترک تورق بر رفتار تورقی نمونه تیر دولبه یکسرگیردار ساخته شده از کامپوزیت با الیاف بافته شده ساده بوده است. بدین منظور نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شده و مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528، آزمایش شکست بر آن‌ها انجام شده است. به منظور استخراج مقدار چقرمگی شکست از معیار غیرخطی شدن منحنی بار- جابه‌جایی به همراه روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است. با استفاده از داده‌های آزمایش و روش‌های بیان شده برای به دست آوردن چقرمگی شکست، چقرمگی شکست اولیه، پایا و همچنین طول فرآیند



(a) 0//0 Interface



(b) 30//0 Interface

- Structures, Vol. 85, pp. 114-124, 2016.
- [18] M. Shokrieh, M. Heidari-Rarani, M. Ayatollahi, Delamination R-curve as a material property of unidirectional glass/epoxy composites, *Materials & Design*, Vol. 34, No. 1, pp. 211-218, 2012.
- [19] G. Frossard, J. Cugnoni, T. Gmür, J. Botsis, Ply thickness dependence of the intralaminar fracture in thin-ply carbon-epoxy laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 109, No. 1, pp. 95-104, 2018.
- [20] M. Shokrieh, M. Heidari-Rarani, Effect of stacking sequence on R-curve behavior of glass/epoxy DCB laminates with 0/0 crack interface, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 529, No. 1, pp. 265-269, 2011.
- [21] ASTM D3039, *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*, ASTM international, 2008.
- [22] ASTM D790, *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*, Annual book of ASTM standards, 2007.
- [23] ASTM D5528-94a, *Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites*, Annual book of ASTM standards, Vol. 15, No. 1, pp. 1-12, 1994.
- [24] M. Shokrieh, M. Salamat-talab, M. Heidari-Rarani, Dependency of bridging traction of DCB composite specimen on interface fiber angle, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 90, No. 1, pp. 22-32, 2017.
- [12] P. Navarro, J. Aubry, F. Pascal, S. Marguet, J. Ferrero, O. Dorival, Influence of the stacking sequence and crack velocity on fracture toughness of woven composite laminates in mode I, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 131, No. 1, pp. 340-348, 2014.
- [13] E. Triki, B. Zouari, F. Dammak, Dependence of the interlaminar fracture toughness of E-Glass/Polyester woven fabric composites laminates on ply orientation, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 159, No. 1, pp. 63-78, 2016.
- [14] D. Fanteria, L. Lazzeri, E. Panettieri, U. Mariani, M. Rigamonti, Experimental characterization of the interlaminar fracture toughness of a woven and a unidirectional carbon/epoxy composite, *Composites Science and Technology*, Vol. 142, No. 1, pp. 20-29, 2017.
- [15] E. Farmand-Ashtiani, J. Cugnoni, J. Botsis, Specimen thickness dependence of large scale fiber bridging in mode I interlaminar fracture of carbon epoxy composite, *Solids and Structures*, Vol. 55, No. 1, pp. 58-65, 2015.
- [16] B. Manshadi, E. Farmand-Ashtiani, J. Botsis, A. Vassilopoulos, An iterative analytical/experimental study of bridging in delamination of the double cantilever beam specimen, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 61, No. 1, pp. 43-50, 2014.
- [17] G. Pappas, J. Botsis, Intralaminar fracture of unidirectional carbon/epoxy composite: experimental results and numerical analysis, *Solids and*