جلد 7، شماره 1-، بهار 99، ص‌ص 731-739

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیـــت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی رشد تورق در مود I کامپوزیت الیاف شیشه تک‌جهته/ وینیل‌استر تحت پیرشدگی اسیدی

سینا فرهی‌فر[1]، محمود مهرداد شکریه[2*]، مظاهر سلامت‌طلب[3]

1- دانشجو 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

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/06/05

پذیرش: 99/02/13

کلیدواژگان:

پیرشدگی اسیدی

کامپوزیت تک‌جهته شیشه/وینیل‌استر

چقرمگی شکست مود I شروع و پایا

تیر یک‌سر گیردار دولبه

چکیده

در این تحقیق، به بررسی چقرمگی شکست مود I در کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف شیشه نوع E با بافت تک جهته و رزین وینیل‌استر در معرض اسید سولفوریک پرداخته شده است. نمونه‌های مورد استفاده به روش لایه‌چینی دستی با چیدمان لایه‌های $[0]_{18}$ ساخته شدند. به منظور اعمال شرایط محیطی نمونه‌های ساخته شده در ابعاد بیان‌شده در استاندارد، در بازه‌های زمانی 0، 1، 2، 5 و 10 هفته در محلول 20% وزنی تهیه شده از اسید سولفوریک 98% با دمای آزمایشگاه غوطه‌ور شدند. سپس آزمون شکست با استفاده از تیر یک‌سر گیردار دو لبه بر روی نمونه‌ها به منظور بررسی روند تغییرات چقرمگی شکست بین لایه‌ای شروع و پایا در بازه‌های زمانی مختلف صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده کاهش چقرمگی شکست پایا در نمونه‌ها با اعمال شرایط محیطی بودند، درحالی که روند تغییر چقرمگی شکست شروع رشد ترک در 5 هفته اول به‌صورت افزایشی بوده و پس از آن در هفته دهم با کاهش قابل توجهی همراه بوده است. علاوه‌بر این، در این پژوهش مشاهده شد که مقدار نیروی شروع رشد ترک با قرارگیری نمونه در معرض شرایط محیطی کاهش پیدا کرده است.

Experimental investigation of mode I delamination growth in unidirectional E-glass/vinyl ester composites on acid aging

Sina Farahifar [1], Mahmood Mehrdad Shokrieh [1*], Mazaher Salamat-talab [2]

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

Keywords

Acid aging

Glass/vinyl ester unidirectional composite

Initiation and propagation mode I fracture toughness

Double cantilever beam

Abstract

In the present investigation, the mode I fracture toughness of unidirectional E-glass/vinyl ester composites subjected to sulfuric acid was studied. Specimens were manufactured using the hand lay-up method with the $[0]_{18}$ stacking sequence according to standard size. Specimens were exposed to 20 wt.% sulfuric acid (with 98% purity) at the laboratory temperature for 0, 1, 2, 5 and 10 weeks. Subsequent to conditioning for the aforesaid period of times, samples were dried and according to the standard, the double cantilever beam tests were performed to study variations of the initiation and propagation fracture toughness. Results showed that a reduction in the propagation fracture toughness after conditioning, although the variation of the initiation fracture toughness at the first 5 weeks was increasingly and after that at the 10th week had a significant reduction. Moreover, it was observed that the amount of the crack initiation force of samples was decreased after the conditioning.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Farahifar,S., Shokrieh, M. M., Salamat-talab, M. "Experimental investigation of mode I delamination growth in unidirectional E-glass/vinyl ester composites on acid aging", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 731-739, 2020.

1- مقدمه

تورق از شایع‌ترین مودهای تخریب در مواد مرکب لایه‌ای بوده و از دلایل اصلی شکست در سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. پنهان بودن پدیده تورق در بین لایه‌های کامپوزیت، یکی از دلایل بحرانی بودن این مود آسیب می‌باشد. در صورت بروز پدیده تورق، سفتی سازه کامپوزیتی کاهش شدیدی داشته و قابلیت تحمل بار سازه نیز افت محسوسی خواهد داشت. امکان بروز این پدیده در هر لحظه از عمر سازه به دلایل مختلفی همچون ضربه و تغییرات دمایی وجود دارد. درنتیجه مطالعه پدیده تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی از اهمیت بسزایی برخوردار است [1].

کامپوزیت‌ها نیز همانند مواد دیگر در طول دوره استفاده و خدمت، دچار کاهش خواص [1] فیزیکی و مکانیکی خواهند شد. از عوامل تأثیرگذار بر کاهش خواص می‌توان به رطوبت یا اثرات محیطی مانند حرارت و مواد شیمیایی مهاجم اشاره داشت [2]. این عوامل با توجه به ساختار متفاوت رزین‌های مختلفی که به‌عنوان زمینه در ساخت کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند، ممکن است اثرات متفاوتی بر خواص را به همراه داشته باشند؛ بنابراین تنوع کاربرد و عوامل محیطی در انتخاب الیاف و رزین در ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی تأثیر زیادی دارند [3].

مقاومت کامپوزیت در مقابل افت خواص یاد شده، به شرایطی که ممکن است در طول عملیات تعمیر و نگهداری و یا استفاده میدانی در معرضشان باشند، وابسته است و در نتیجه باید در انتخاب مواد، موارد یاد شده را در نظر گرفت. آسیب به‌وجود آمده در کامپوزیت اغلب به دلیل انتخاب مواد با خصوصیات نادرست و یا نادیده انگاشتن محیط خدمت‌دهی در طول مراحل اولیه طراحی است [3]. پیرشدگی محیطی در مواد کامپوزیتی، نیاز به زمان داشته و نرخ آن می‌تواند وابسته به دما و بار اعمالی باشد که موجب می‌گردد پیش‌بینی پیرشدگی به‌طور دقیق، مانند تمرکز تنش، غیربدیهی گردد [4].

زناسنی و همکاران [6, 5] به بررسی پیرشدگی در سه نوع کامپوزیت ساخته شده با پارچه‌های الیاف شیشه (با بافت‌های جناغی 2/2[2] و ساتن قلابی 8[3]) و الیاف کربن با بافت ساتن قلابی 8 و رزین پلی اترآمید[4] پرداختند. در این پژوهش، آن‌ها نمونه‌ها را در معرض شرایط پیرشدگی رطوبتی-حرارتی[5] و رطوبتی-حرارتی-مکانیکی[6] در دمای 70 درجه‌سانتی‌گراد و به مدت 0، 30، 60، 120 و 180 روز قرار دادند. در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه ساتن قلابی 8، چقرمگی شکست شروع رشد تورق در بارگذاری مود I، افزایش داشته است در حالی که چندلایه‌های کامپوزیتی ساخته شده با دو نوع پارچه دیگر کاهش خواص داشته‌اند که این کاهش برای پیرشدگی رطوبتی-حرارتی قابل‌توجه بوده است. در این پژوهش پیرشدگی رطوبتی-حرارتی آسیب‌های جدی در کامپوزیت‌های با چقرمگی شکست شروع بالا را سبب شده‌اند که می‌تواند ناشی از نفوذ آسان‌تر رطوبت در این نوع از بافت‌ها باشد.

سلزر و همکاران [7] به بررسی تأثیر جذب آب در حمام آب با سه دمای 23، 70 و 100 درجه سانتی‌گراد به مدت حدود 8000 ساعت بر خواص شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت ساخته‌شده با الیاف کربن تک‌جهته و چند نوع زمینه پلیمری مختلف پرداختند. آن‌ها دریافتند نمونه‌هایی که به‌طور کامل اشباع‌شده‌اند، دارای نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی (G_{IC}) بالاتری نسبت به نمونه‌های خشک هستند. همچنین در نمونه‌ای که به‌طور کامل اشباع شده بود شاهد این بودند که الیاف در یک منطقه بزرگ در پشت پیشانی ترک پل‌زنی کرده و بلافاصله پس از باز شدن دهانه ترک نشکسته و تحت تنش باقی می‌مانند. در نمونه‌های نیمه‌اشباع با توجه به این‌که مرکز نمونه خشک است و سطح رطوبت دارد، مشاهده شد رفتار رشد ترک در میانه نمونه، بیشتر شبیه به نمونه‌های خشک بوده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[7] نشان‌دهنده شکست ترد زمینه و چسبندگی خوب الیاف-زمینه در نمونه‌های خشک و شکست انعطاف‌پذیر زمینه و چسبندگی ضعیف بین الیاف و زمینه در نمونه‌های مرطوب بوده‌اند.

جان ژائو و همکاران [8] در بررسی کامپوزیت شیشه بافته‌شده نوع E/ بیسملمایید[8] در آب دریا با سه دمای اتاق (نزدیک به 25)، 50 و 80 درجه-سانتی‌گراد به مدت حدود 6000 ساعت، به‌طور کلی شاهد نیروهای بیشینه[9] کمتر و نرمی[10] بیشتری در آزمون مود I بودند. برای نمونه‌هایی که در دمای 50 درجه‌سانتی‌گراد قرار گرفته بودند، مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای شروع یکسان بوده و همچنین افزایش قابل‌توجهی در چقرمگی رشد مشاهده شد. علاوه بر این برای نمونه‌های در معرض دمای 80 درجه‌سانتی‌گراد کاهش عمده در چقرمگی شکست مشاهده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که تضعیف ناحیه بین‌وجهی در طول زمان غوطه‌وری و در دمای بالا اهمیت زیادی داشته و این امر موجب کاهش چقرمگی شکست نمونه موجود در دمای 80 درجه‌سانتی‌گراد شده‌اند. در این تحقیق علی‌رغم سطوح شکست مشابه در نمونه خشک و خیس، نمونه‌های خیس دارای سطوح تمیزتری نسبت به نمونه‌های خشک بودند و الیاف از رزین جدا شده بودند که نشان‌دهنده کاهش خواص ماتریس و تضعیف ناحیه بین‌وجهی به دلیل جذب آب است. کاهش چقرمگی شکست مود I برای نمونه‌ها در دمای80 درجه-سانتی‌گراد نتیجه مستقیم تضعیف بین‌وجهی[11] الیاف/زمینه است.

سیدا و همکاران [9] اثر پیرشدگی بر کامپوزیت الیاف شیشه بافته شده با دو بافت مختلف و دو نوع رزین اپوکسی متفاوت تحت شرایط رطوبتی با دمای 70 درجه‌سانتی‌گراد در مودهای گوناگون بارگذاری به مدت 1300 ساعت را بررسی نمودند. مشاهدات حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و توزیع دامنه نشر آوایی[12] بیانگر تضعیف الیاف در برخی از کامپوزیت‌ها بود. این تضعیف نشان‌دهنده نامناسب بودن رزین انتخاب شده برای ساخت این کامپوزیت برای محافظت از الیاف در برابر شرایط محیطی اعمال شده بود. شکست زودهنگام نمونه‌ها به دلیل فرسودگی ناشی از تضعیف الیاف و ناحیه بین‌وجهی الیاف/زمینه بوده است. در این بررسی حساسیت زیاد الیاف به پیرشدگی شتاب داده شده مشاهده شد. نتایج آزمایشگاهی نشانگر کاهش نرخ رهایی انرژی کرنشی به یک سوم مقدار اولیه بودند.

السی و همکاران [10] نمونه‌های کامپوزیت کربن تک‌جهته/اپوکسی با لایه‌چینی $_6$[0] در آب مقطر با دو دمای 30 و 70 درجه‌سانتی‌گراد را به مدت 4 و 8 هفته بررسی نمودند. نتایج پیرشدگی در دمای 30 درجه‌سانتی‌گراد، افزایش اندک مقادیر چقرمگی شروع و رشد ترک و در مورد دمای 30 درجه-

[1] Degradation
[2] 2/2 Twill
[3] 8 Harness Satin
[4] Polyetherimide (PEI)
[5] Hygrothermal
[6] Hygrothermomechanical
[7] SEM
[8] Bismaleimide
[9] Peak Forces
[10] Compliance
[11] Interface
[12] Acoustic Emission (AE)

سانتی‌گراد کاهش مختصری در مقدار شروع پس از 8 هفته را نشان داد. نتایج این محققین نشانگر عدم تغییر در مقدار چقرمگی شکست رشد در طول زمان بوده است. تصاویر میکروسکوپی، نشانگر مقداری تخریب به‌صورت جدایش اتصال بین الیاف و رزین به خاطر ترد شدن رزین در 70°C بودند. بنابراین می‌توان افت چقرمگی شکست را ناشی از چسبندگی نامناسب الیاف و زمینه دانست.

سریواستاوا و همکاران [11] نمونه‌های شیشه نوع E با بافت چهارمحوره[1]/ وینیل‌استر در حالت بدون پرکننده و با پرکننده‌های مختلف را تا 8 ماه، تحت پیرشدگی حرارتی و آب مورد بررسی قرار دادند. تمامی نمونه‌های غوطه‌ور در آب افزایش چقرمگی شکست مود I را نشان دادند. علاوه براین، مشاهده شد که نوع پرکننده بر چقرمگی تورق مودهای مختلف موثر است، برخی پرکننده‌ها منجر به چقرمگی تورق مود I بیشتری نسبت به پرکننده‌های دیگر و یا کامپوزیت‌های بدون پرکننده بوده است.

نش و همکاران [12] به بررسی برگشت‌پذیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای پس از پیرشدگی رطوبتی-حرارتی در آب یون‌زدوده[2] با دمای 80°C پرداختند که در این نمونه‌ها در فصل مشترک تورق از یک لایه رزین گرمانرم استفاده شده بود. این نمونه‌ها در سه حالت خشک، خیس و خشک‌شده بررسی شدند و نتایج نشانگر این بودند که مومسان‌شدن زمینه به‌عنوان یک پدیده بازگشت‌پذیر است درحالی‌که آسیب بازگشت‌ناپذیر در زمینه و ناحیه بین‌وجهی نمونه به‌وجود آمده بود. استفاده از یک ورق نازک بین‌لایه‌ای گرمانرم موجب کاهش بعضی از آثار مضر ناشی از محیط رطوبتی-حرارتی اعمال شده بر چندلایه‌های این پژوهش شد. در برخی موارد با خشک شدن نمونه، کمی بازگشت در چقرمگی شکست وجود داشت ولی در برخی موارد تغییری مشاهده نشد.

المنصور و همکاران [13] از سه نوع بیوکامپوزیت با وزن کم استفاده کردند. نتایج حاکی از کاهش چقرمگی شکست شروع و رشد در گروهی از کامپوزیت‌های خیس در مقایسه با نمونه‌های خشک بود، درحالی‌که چقرمگی شکست رشد برای گروه دیگری از نمونه‌های پیرشده، افزایش و برای شروع چقرمگی شکست رفتار کاهشی داشته است. دلیل کاهش در شروع ترک به دلیل جذب رطوبت بالای گروهی از الیاف بود که منجر به تضعیف ناحیه بین‌وجهی الیاف/زمینه می‌شود. در این مطالعه مشاهده شد که استفاده از الیاف بازالت (به‌عنوان لایه خارجی بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با کتان) می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر برای افزودن خواص مکانیکی، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای، چکش‌خواری و مقاومت به رطوبت در کامپوزیت‌های طبیعی باشد.

کوتسوکس و همکاران [14] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر غوطه‌وری نمونه‌های کامپوزیتی در آب دریا بر روی استحکام و چقرمگی شکست مود I این نمونه‌ها پرداختند. این محققین از دو نوع فاز تقویت کننده، الیاف‌های کربن و شیشه و از دو زمینه، پلی استر و وینیل استر برای ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده نمودند. نتایج آزمایشگاهی این محققین نشان می‌دهد که کاهش خواص مکانیکی در نمونه‌ها بعد از اشباع کامل در آب دریا، تحت تأثیر عواملی چون آسیب در ناحیه بین‌وجهی الیاف/زمینه، بسیار مشهود بوده است.

امینی و همکاران [15] به بررسی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تک جهته غوطه‌ور در آب مقطر با دمای اتاق پرداختند. نتایج بیانگر این بود که میزان رطوبت بر خواص مکانیکی و الکتریکی این مواد تاثیر ویژه‌ای داشته و با افزایش زمان غوطه‌وری، استحکام کششی و مدول یانگ چندلایه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد.

چنگ و همکاران [16] به بررسی رفتار مکانیکی و رشد ترک در نمونه‌های کامپوزیت/چسب با استفاده از نمونه‌های تیر یکسرگیردار دولبه و تیر با شکاف انتهایی در محیط‌های شیمیایی مختلف پرداختند. همچنین این محققین با بررسی شروع و رشد ترک در ناحیه فصل مشترک کامپوزیت/چسب در شرایط مختلف، مدل‌های ناحیه چسبناک به‌منظور شبیه‌سازی رفتار یاد شده، ارائه نمودند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر همبستگی مناسب داده‌های آزمایشگاهی و عددی بوده است. ویانا و همکاران [17] با ساخت اتصال چسبی از نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دولبه و قرار دادن آن در شرایط محیطی مختلف به بررسی چقرمگی شکست و نفوذ آب در این نوع از اتصالات پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که نفوذ آب در اتصال چسبی سریعتر از نفوذ آن در یک نمونه چسب خالص می‌باشد. همچنین این محققین مدلی برای نفوذ آب در ناحیه اتصال بین‌وجهی ارائه نمودند. ژو و همکاران [18] با انجام آزمایش‌های تجربی به اثرات پیرشدگی حرارتی-رطوبتی بر رفتار آسیب در اتصالات چسبی کامپوزیتی با استفاده از روش نشر آوایی پرداختند. در تحقیقی دیگر [19] به بررسی رفتار مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی ساخته شده از ترکیب الیاف بافته شده و الیاف کوتاه تحت شرایط رطوبتی-حرارتی پرداخته شده است.

با بررسی مطالعات صورت گرفته پیشین، مشاهده می‌شود که به ندرت از نمونه‌های ساخته شده از الیاف تک جهته در در معرض شرایط محیطی استفاده شده است. بر اساس بهترین اطلاعات نگارندگان مقاله حاضر، در هیچ یک از مراجع موجود از الیاف شیشه و شرایط محیطی اسیدی برای بررسی تاثیر آن بر چقرمگی شکست مود I استفاده نشده است. از این رو با توجه به کاربرد زیاد و خواص مکانیکی مناسب این نوع از چندلایه‌های کامپوزیتی، در این پژوهش از کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف تک جهته شیشه نوع E با زمینه وینیل استر استفاده شده و برای اعمال شرایط محیطی، از محلول اسید سولفوریک در دمای اتاق استفاده شده است.

2- روش ساخت و آزمایش

2-1- ساخت نمونه‌های تیر یک‌سرگیردار دولبه

برای ساخت نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش از الیاف تک‌جهته شیشه نوع E با چگالی سطحی $220\ g/m^2$ و رزین هترون 922 (ونیل‌استر) به همراه سه جزء سخت‌کننده کبالت، دی‌متیل‌آنیلین[3] و اسید به ترتیب با درصدهای وزنی 0.3، 0.075 و 1.25 درصد استفاده شدند. نمونه‌ها به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند و لایه‌چینی مورد استفاده در این نمونه‌ها $[0]_{18}$ است. در بین لایه‌های 9 و 10 از نوار چسب تفلون به ضخامت 13 میکرون به‌عنوان پیش‌ترک استفاده شده است. نمونه‌ها پس از قرارگیری به مدت 72 ساعت در دمای محیطی آزمایشگاه، به مدت 2 ساعت در دمای 80 و سپس به مدت 2 ساعت در دمای 100 درجه‌سانتی‌گراد فراپخت شدند تا فرآیند پخت تکمیل شود. برای اطمینان از پخت کامل رزین از روش‌های

[1] Quadriaxial Fabric
[2] Deionised Water
[3] Dimethylaniline (DMA)

سختی بارکول[1] و چسبندگی استون مطابق با کالانما[2] مربوط به شرکت سازنده رزین [21, 20] استفاده شد و کامل بودن پخت نمونه‌ها مورد تایید واقع شد. نمونه‌ها با طول 160 میلی‌متر و با عرض 25 میلی‌متر از صفحه ساخته شده بریده شده و در شرایط محیطی قرار گیرند.

2-2- شرایط محیطی مورد استفاده

برای اعمال شرایط محیطی بر نمونه‌ها، پس از قرارگیری در محیط آزمایشگاه برای خروج رطوبت سطحی ناشی از برش نمونه، آن‌ها با مدت زمان‌های مختلفی در شرایط مورد نظر قرار گرفتند. نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک با غلظت وزنی 20% تهیه شده از اسید با غلظت 98% فوق خالص قرار گرفتند. برای در معرض قرار گرفتن تمامی نمونه‌ها، در ابتدا و انتهای آن‌ها نوار شیشه‌ای با پهنای کمی قرار گرفت و مطابق با استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 543[3] [22] محلول در طی زمان قرارگیری در شرایط محیطی به طور مرتب هم زده می‌شد. نحوه چیدمان نمونه‌ها در محلول مطابق شکل 1 است. برای اعمال شرایط محیطی ظرف شامل نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه -این دما طبق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 618[4] [23]، 23°C است- قرار گرفت. بازه‌های زمانی مورد استفاده جهت انجام آزمایش پس از اعمال این شرایط شامل 0، 1، 2، 5 و 10 هفته است.

3-2- روش آزمایش

تمامی نمونه‌ها به اندازه 1 میلی‌متر بیشتر از ابعاد پیشنهادی استاندارد بریده شدند تا پس از سمباده زدن از دو طرف نمونه به مقدار تقریبا یکسان بعد از اعمال شرایط محیطی، مقدار طول ترک قابل خواندن باشد. پس از خروج نمونه‌ها از شرایط محیطی، به مدت 15 دقیقه در محلول تازه 20% وزنی اسید سولفوریک تهیه شده از مواد مشابه، در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند تا به شرایط ثابتی برسند و سپس از محلول خارج شده و پس از شسته‌شدن با آب مقطر، با دستمال بدون پرز خشک‌شدند. دو طرف نمونه به مقدار تقریبا برابر تا رسیدن به عرض تعریف شده در استاندارد برای این آزمون سمباده زده شدند و پس از گذشت چند ساعت و خشک شدن سطح نمونه، لولاها در دو سمت نمونه متصل شدند تا قابلیت انجام آزمایش را داشته باشند. سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش سنتام[5] مورد آزمایش قرار گرفتند.

آزمون‌های نمونه‌های تیر یک‌سرگیردار دولبه مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528[6] [24] انجام شده و داده‌های آن‌ها در ادامه بررسی شده‌اند.

نمونه‌ها در دستگاه کشش سنتام با نیروسنج به ظرفیت 50 kgf و با دقت بالا آزمایش شدند. نرخ بارگذاری برای رشد پایدار ترک 0.5 میلیمتر بر دقیقه انتخاب شده است. یکی از نکات مهم در این آزمایش هم‌راستایی محورهای بارگذاری بوده که با استفاده از اتصال لولاهایی به بازوهای بالا و پایین تیر کنترل می‌گردد. علاوه بر این، به‌منظور مشخص شدن طول ترک، از یک سیستم نورپردازی استفاده شده است. این سیستم نورپردازی، به دلیل مزیت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و زمینه پلیمری در عبور نور از خود به‌دلیل شفافیت نسبی آن، انتخاب شده است. در این سیستم نورپردازی، نور از پایین به نمونه تیر یکسرگیردار دولبه تابانده می‌شود و بخشی از نمونه که نور از آن عبور کرده، روشن دیده می‌شود و بدون سایه می‌باشد؛ در این بخش از نمونه، رشد ترک صورت نگرفته است و بخش ترک‌دار آن، به‌دلیل ناپیوستگی ایجاد شده در اثر وجود ترک و عدم عبور نور، تیره‌تر از سایر قسمت‌ها دیده می‌شود. همچنین در این روش برای اندازه‌گیری طول ترک، از چسبان یک خط‌کش با دقت 1 میلیمتر که به لبه نمونه اتصال می‌یابد، استفاده شده است. علاوه بر این، به‌منظور ثبت دقیق تصاویر در حین رشد ترک، از یک دوربین کانن با لنز ماکرو استفاده شده است. در شکل 2 تجهیزات آزمایشگاهی و تصویر نمونه تیر یکسرگیردار دولبه نشان داده شده است.

3- نتایج آزمایشگاهی

1-3- تغییرات در نتایج آزمون شکست

آزمون شکست بر روی نمونه‌های ساخته‌شده انجام شد و منحنی‌های بار-جابجایی به‌دست آمده برای یکی از نمونه‌های آزمایش شده پس از اعمال محیط اسیدی مذکور با دمای 23 درجه‌سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف قرارگیری در معرض شرایط محیطی 0، 1، 2، 5 و 10 هفته در یک نمودار در شکل 3 آورده شده است.

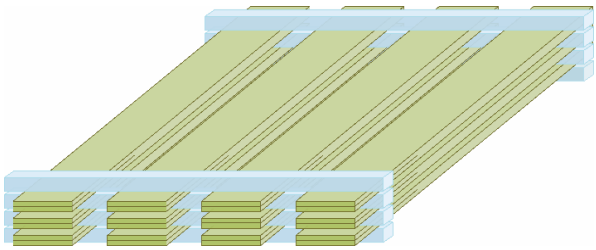

Fig. 1 A schematic of the arrangement of specimens in the soluble

شکل 1 طرحی از چیدمان نمونه‌ها در محلول

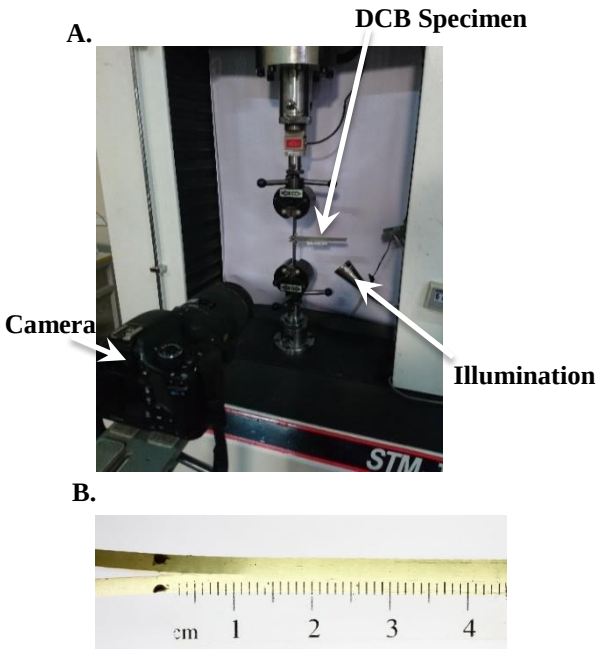

Fig. 2 A. Laboratory Equipments, B. DCB Sample

شکل 2 A. تجهیزات آزمایشگاهی، B. نمونه تیر یکسرگیردار دولبه

[1] Barcol Hardness
[2] Catalog
[3] ASTM D5528
[4] ASTM D618
[5] Santam STM-150
[6] ASTM D5528

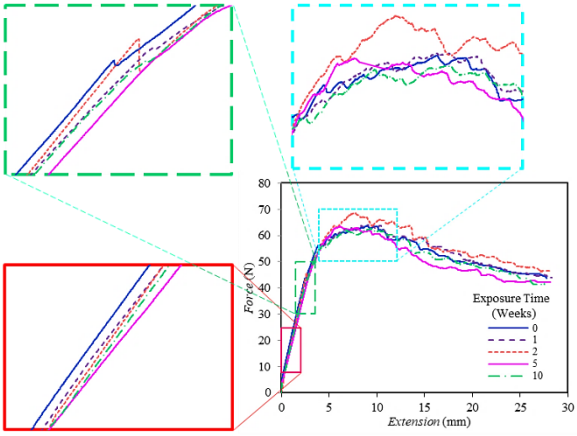

Fig. 3 Load–displacement curves of DCB specimens with varies exposure times in 23°C (with zooming in different locations)

شکل 3 نمودار بار–جابجایی برای نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دولبه با زمان‌های مختلف قرارگیری در شرایط در دمای 23 درجه‌سانتی‌گراد (با بزرگمایی بخش‌های مختلف)

در واقع شکل منحنی بار–جابجایی برای تمامی نمونه‌ها به‌طور کلی دارای روند مشابهی است. در ابتدا منحنی بصورت خطی است که شیب این خط بیانگر سفتی خمشی بازوهای نمونه است که در این بخش هنوز ترک شروع به رشد نکرده است. بعد از ناحیه خطی اولیه، تورق شروع شده و منحنی روند غیر خطی خواهد یافت که این روند با رشد ترک تا رسیدن به مقدار بیشینه بار ادامه پیدا می‌کند. در واقع این بازه به‌طور تقریبی مربوط به ناحیه فرآیند شکست در نوک ترک است که وجود تنش‌های کششی سطح ترک[1] منجر به صعودی شدن نمودار به‌طور غیرخطی می‌شود. در ادامه به دلیل رشد ترک، کاهش سفتی نمونه و افزایش نیافتن طول ناحیه‌ی فرآیند شکست روندی نزولی در منحنی مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در نمودارهای شکل 3 دیده می‌شود، برای دمای 23°C تفاوت‌های چندانی در منحنی بار–جابجایی به‌وجود نیامده است. با بررسی این نمودار می‌توان مشاهده نمود که در دمای محیط آزمایشگاهی افزایش زمان قرارگیری در شرایط محیطی به مقدار ناچیزی بر سفتی، بیشینه نیرو و روند افت نمودار پس از بیشینه نیرو اثر دارد. در واقع سفتی مقدار اندکی افت داشته است که در 5 هفته این افت بیشترین مقدار بوده است. در نمونه‌های با دو هفته اعمال شرایط، قله منحنی (بیشینه نیرو) و روند کاهشی بار در منحنی پس از رشد ترک اندکی افزایش داشته است و پس از آن افت نمودار (حتی به زیر مقدار اولیه) در زمان‌های بیشتر مشهود است. در این نمونه‌ها به‌طور کلی مقداری افت نیرو در نقطه غیرخطی‌شدن وجود دارد (ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش). تمامی این تغییرات در بزرگنمایی بخش‌های مختلف نمودار در شکل 3 نشان‌داده شده است.

طبق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528 [24] از نقطه غیرخطی شدن نمودار بار–جابجایی به عنوان معیاری برای بدست آوردن چقرمگی شکست شروع تورق استفاده شده است. برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از روش تئوری تیر اصلاح‌شده[2] استفاده شده است. مطابق با این استاندارد، رابطه (1) برای بدست آوردن چقرمگی شکست ارائه شده است:

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

[1] Traction
[2] Modified Beam Theory

که در این رابطه P مقدار بار در لحظه شروع رشد ترک، δ مقدار بازشدگی دهانه ترک، a طول ترک، b عرض قطعه و Δ ضریب اصلاح طول ترک می‌باشد. ضریب Δ برابر با طول از مبدا خط برازش شده بر نمودار ریشه سوم نرمی ($C^{1/3}$) بر حسب طول ترک است. تقاطع خط برازش شده بر این نمودار، با محور افقی برابر با مقدار پارامتر Δ می‌باشد. در شکل 4 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک حاصل از داده‌های آزمایش نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دولبه پیش از قرارگیری در معرض شرایط محیطی برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است.

منحنی مقاومت[3] با استفاده از رابطه 1 ترسیم می‌شود. این منحنی بیان‌گر مقاومت ترک در برابر رشد است که بعد از تورق اولیه مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی به دلیل پل‌زنی الیاف در ناحیه فصل مشترک تورق، افزایش می‌یابد تا به مقدار پایای خود برسد. طول بین طول ترک اولیه و طول ترک متناظر با چقرمگی شکست پایا به عنوان طول ناحیه‌ی فرآیند شکست پایا[4] می‌باشد.

همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، برای این دما به‌طورکلی می‌توان کاهش در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی شروع رشد ترک و نرخ رهایی انرژی کرنشی رشد ترک پایا را مشاهده نمود. مطابق شکل 5 چقرمگی شکست شروع رشد ترک برای 10 هفته قرارگیری نمونه در شرایط محیطی با کاهش همراه است که در بازه‌های زمانی دیگر تغییرات روند یکسانی را ندارند. این در حالیست که پس از 5 هفته، افت در چقرمگی شکست پایای رشد ترک دیده می‌شود ولی در زمان 10 هفته مقدار آن تغییرات چندانی نسبت به 5 هفته نداشته است. همچنین به‌طور کلی انتقال منحنی به سمت پایین مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده نیاز به انرژی کمتر برای رشد ترک و تخریب در نمونه است. باید توجه داشت که مقدار چقرمگی شکست پایای ترک مربوط به اولین بخشی از منحنی است که به حالت نسبتا پایا رسیده است.

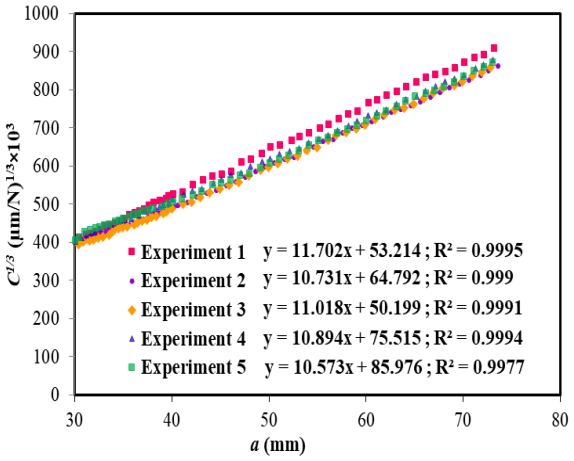

Fig. 4 The cubic root of the compliance vs. delamination length for specimens without aging

شکل 4 ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک برای نمونه‌های بدون پیرشدگی

[3] Resistance Curve (R-curve)
[4] Steady-state fracture process zone

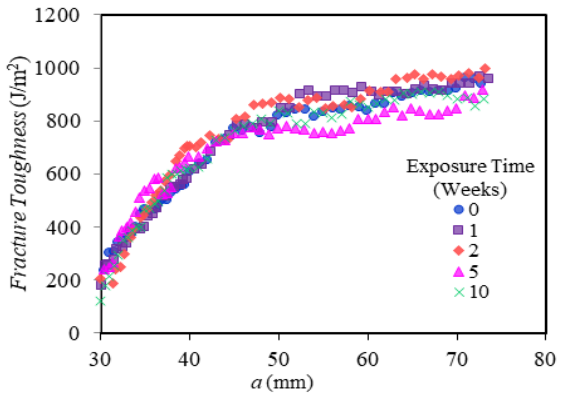

Fig. 5 The R-curve behavior of the DCB specimen after aging

شکل 5 رفتار منحنی مقاومت نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه پس از پیرشدگی

مقادیر بار و جابجایی در نقطه غیرخطی شدن و مقدار چقرمگی شکست شروع تورق در این نقطه، با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح‌شده برای نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دولبه مطابق با رابطه 1 محاسبه شد. برای زمان‌های متفاوت قرارگیری در معرض شرایط محیطی مورد بررسی در این پژوهش، این داده‌ها در جدول 1 ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده مقداری افزایش در نیروی مورد نیاز برای شروع رشد ترک در 2 هفته اول بوده که پس از آن، در 5 هفته روند کاهشی نیرو شروع شده و این مقدار در 10 هفته به کمتر از مقدار اولیه خود رسیده‌است.

در شکل 6 روند تغییر چقرمگی شکست مود I برای 10 هفته اعمال شرایط مذکور به نمونه‌ها مشاهده می‌شود و می‌توان دید که با گذر زمان پراکندگی داده‌ها بیشتر شده و در 5 هفته ابتدایی مقدار این پارامتر افزایش یافته و این افزایش با گذر زمان با نرخ کمتری رخ می‌دهد و مقدار آن بعد از 5 هفته کاهش پیدا می‌کند که این مقدار از مقدار اولیه نیز کمتر است.

درواقع علت بهبود چقرمگی شکست شروع در ابتدای اعمال شرایط محیطی، می‌تواند ناشی از این باشد که مولکول‌های محلول با پر شدن حفره‌ها منجر به داشتن نمونه با یکپارچگی بهتر می‌شوند [25]. یا این تغییرات می‌تواند ناشی از جذب آب در حفره‌ها باشد که در ادامه آب می‌تواند به‌عنوان یک مومسان‌کننده[1] عمل کند یا گروه هیدروکسیل در مولکول آب می‌تواند با الیاف و رزین پیوند برقرار کرده و در برابر جدایی لایه‌ها مقاومت کند و مقدار تنش مورد نیاز را افزایش دهد و در ادامه به دلیل تخریب بین‌وجهی، افت چقرمگی شکست مشاهده می‌شود همچنین آبکافت[2] ناحیه بین‌فازی، رزین و الیاف و خروج مونومرهای ریز آن منجر به پدیده فوق می‌گردد [22-20, 13, 10,9].

جدول 1 مقادیر بار و جابجایی در نقطه غیر خطی شدن و چقرمگی شکست شروع تورق در نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه

Table 1 Values of the load and displacement in the nonlinear point and the initiation fracture toughness of DCB specimens

زمان اعمال شرایط محیطی (هفته)	بار بحرانی در نقطه غیرخطی شدن (N) (±SDV)	جابجایی بحرانی در نقطه غیرخطی شدن (mm) (±SDV)	چقرمگی شکست اولیه (J/m^2) (±SDV)	تغییرات چقرمگی شکست اولیه نسبت به حالت اولیه (%)
0	41.23±1.61	2.63±0.13	180.67±7.08	0.00
1	44.09±1.68	2.53±0.05	194.11±8.34	7.44
2	45.07±1.05	2.70±0.11	211.04±11.25	16.81
5	43.70±2.16	2.78±0.11	211.91±20.15	17.29
10	32.61±4.44	2.16±0.44	126.45±38.23	-30.01

[1] Plasticizer
[2] hydrolysis

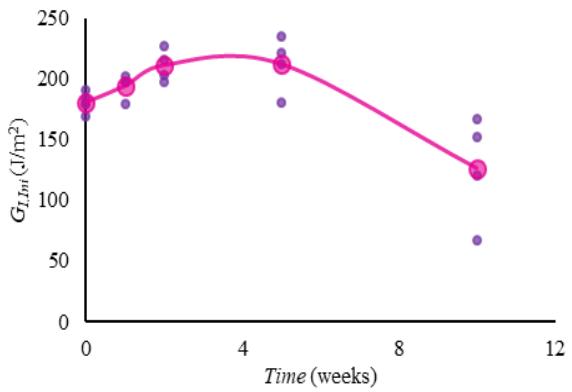

Fig. 6 G_I initiation after aging

شکل 6 G_I شروع بعد از پیرشدگی

همانطور که در شکل 7 در نوک ترک اولیه مشهود است، پس از قرارگیری نمونه در معرض شرایط محیطی، برای شروع رشد ترک در ابتدا بخشی از رزین به همراه الیاف از سطح جدا شده است که موجب افزایش چقرمگی شروع رشد ترک می‌شود و در نمونه 10 هفته تنها مقدار کمی الیاف نسبت به هفته‌های گذشته مشاهده می‌شود که با توجه به آسیب وارد شده به الیاف بخاطر شسته شدن[3] ترکیبات الیاف [14, 28] و سطح بین‌فازی، افت در مقدار این پارامتر به کمتر از مقدار اولیه را نتیجه خواهد داد.

برای مقدار بازشدگی دهانه نمونه که در آن ترک شروع به رشد می‌کند، علیرغم کاهش اولیه در یک هفته اعمال شرایط محیطی، در ادامه تا 5 هفته افزایش یافته و سپس در 10 هفته کاهش می‌یابد و در نهایت همانند نیروی

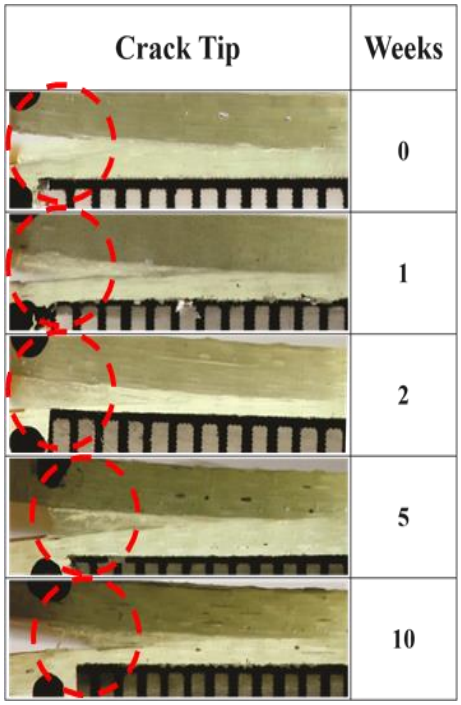

Fig. 7 The crack tip for specimens exposed to environmental condition for various periods for equal crack length

شکل 7 نوک ترک برای مقادیر برابر رشد ترک برای نمونه‌های قرار گرفته در شرایط محیطی در زمان‌های مختلف

[3] Leach

مورد نیاز برای رشد ترک به مقداری پایین‌تر از مقدار اولیه خود می‌رسد. روند تغییرات مشاهده شده برای مقدار چقرمگی شروع ترک مشابه با روند تغییرات نیروی نقطه غیرخطی شدن است که این پارامتر در ابتدا تا 5 هفته افزایش پیدا کرده و سپس در 10 هفته به مقدار پایین‌تر از مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

در جدول 2 مقادیر مربوط به چقرمگی شکست پایا و طول پل زنی الیاف برای نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دو لبه با زمان مختلف قرارگیری در معرض شرایط محیطی آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار چقرمگی رشد ترک همواره در حال کاهش است و این می‌تواند ناشی از تخریب در دو طرف نمونه که در معرض شرایط محیطی هستند باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار طول ناحیه فرآیند شکست همواره در حال کاهش است. تغییرات چقرمگی شکست پایا برحسب زمان اعمال شرایط محیطی در شکل 8 مشاهده می‌شود. می‌توان دید مقدار چقرمگی شکست پایا از 2 تا 5 هفته افت شدیدی داشته است و با گذر زمان پراکندگی داده‌ها بیشتر شده است.

3-2- بررسی سازوکار رشد تورق

در این بخش برای درک بهتر عوامل موثر بر رشد ترک، تصاویری از سطح فصل مشترک نمونه‌ای که در معرض شرایط محیطی نبوده و نمونه‌ای که به مدت 10 هفته در دمای 23°C در شرایط محیطی بوده است آورده شده‌اند تا به‌وسیله آن تغییرات به‌وجود آمده در چقرمگی شکست شروع رشد ترک و چقرمگی شکست رشد پایای ترک توجیه شوند. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، در نمونه‌ای که در شرایط محیطی قرار داشته‌است در لبه نمونه الیاف بیرون کشیده شده به مقدار ناچیزی بیشتر است که می‌تواند بخاطر تخریب بین‌فازی الیاف و رزین باشد که منجر به کاهش چقرمگی شکست رشد ترک می‌شود.

جدول 2 مقادیر طول ناحیه‌ی فرآیند شکست و چقرمگی شکست پایا در نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه

Table 2 Values of the fracture process zone and steady-state fracture toughness in DCB specimen

زمان اعمال شرایط محیطی (هفته)	طول ناحیه فرآیند شکست (mm) (±SDV)	تغییرات طول ناحیه فرآیند شکست نسبت به حالت اولیه (%)	چقرمگی شکست حالت پایا (J/m^2) (±SDV)	تغییرات چقرمگی شکست پایا نسبت به حالت اولیه (%)
0	24.74±1.49	0.00	896.40±17.67	0.00
1	20.85±3.19	-15.72	878.54±19.98	-1.99
2	18.88±2.23	-23.69	865.88±11.30	-3.40
5	16.77±2.03	-32.22	781.02±33.92	-12.87
10	12.54±1.51	-49.31	775.58±69.35	-13.48

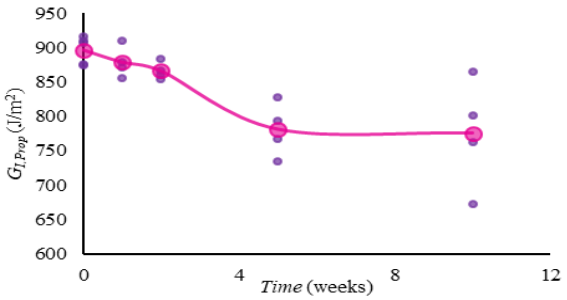

Fig. 8 G_I propagation after aging

شکل 8 G_I پایا بعد از پیرشدگی

در شکل 9 مشاهده می‌شود که در حین انجام آزمایش الیاف در نمونه‌هایی که در معرض شرایط محیطی نبودند در پشت ترک با طول بیشتری در نمونه درگیر هستند ولی در نمونه‌هایی که به مدت 10 هفته در معرض شرایط محیطی بودند الیاف کمتر و با اندازه‌های کوچکتری درگیر هستند و این مورد منجر به کاهش چقرمگی شکست رشد ترک پس از اعمال شرایط محیطی می‌شود.

در شکل 10 تغییرات ظاهر و رنگ نمونه‌های در مقاطع عمود بر راستای الیاف و در امتداد الیاف در نزدیکی انتهای نمونه نشان داده‌شده است. مشاهده می‌شود در راستای الیاف مقدار نفوذ بیشتری نسبت به راستای عمود بر الیاف رخ داده است که این مورد با تغییر رنگ و مقداری تورم همراه است. این تصاویر از برش‌دادن نمونه‌های سمباده زده شده جهت انجام آزمایش گرفته شده‌اند و به همین دلیل در راستای عمود بر الیاف تقریبا تغییراتی مشاهده نمی‌شود. در واقع مقدار نفوذ و تاثیرات تغییر رنگی در این نمونه در راستای عمود بر جهت الیاف کمتر از 0.5 میلی‌متر بوده است و این مورد برای راستای ضخامت نیز مشاهده می‌شود؛ در حالی که در امتداد الیاف این نفوذ مقدار بیشتری را دارد و با توجه به شکل 10 این مقدار بیش از 2 میلی‌متر نیز خواهد بود.

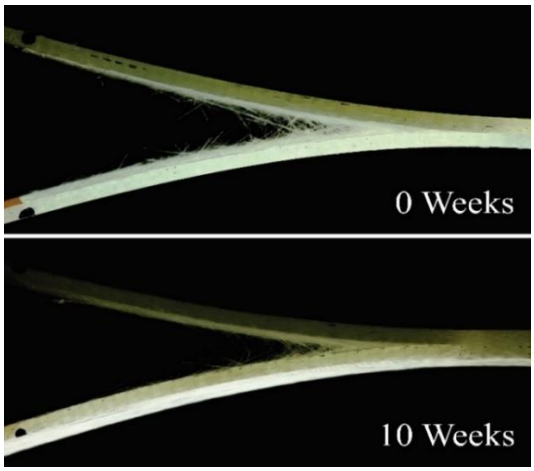

Fig. 9 DCB specimens without conditioning and after 10 weeks of exposure time at 23 ºC

شکل 9 نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دولبه بدون اعمال شرایط و پس از 10 هفته اعمال شرایط با دمای 23°C

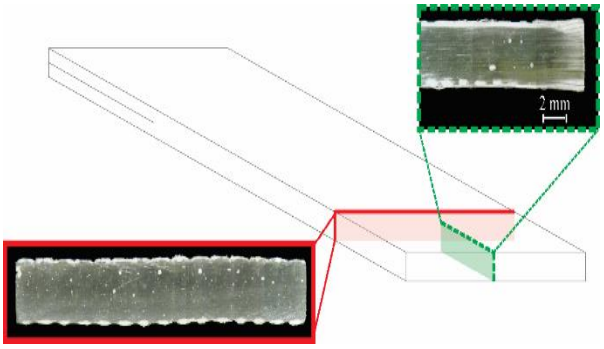

Fig. 10 Absorption and apparent changes after 10 weeks of environmental conditioning

شکل 10 جذب و تغییرات ظاهری پس از 10 هفته اعمال شرایط محیطی

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه نوع E تک‌جهته/رزین وینیل‌استر پس از اعمال شرایط محیطی مورد بررسی شکست مود I قرار گرفتند. نمونه‌های مورد بررسی با لایه‌چینی $[0]_{18}$ بودند و به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. از حمام محلول 20% وزنی سولفوریک اسید تهیه شده از اسید با خلوص 98% با دمای 23°C برای اعمال شرایط محیطی استفاده شد. از آزمون مربوط به نمونه تیر یک‌سرگیردار دولبه مطابق استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا 5528 استفاده شد که نقطه غیرخطی شدن منحنی بار-جابجایی به عنوان نقطه شروع رشد ترک و چقرمگی مربوط به این نقطه به‌عنوان چقرمگی شروع رشد ترک در نظر گرفته شد و برای محاسبه چقرمگی از روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است.

از نتایج به‌دست آمده می‌توان به روند غیرثابت تغییرات در چقرمگی شکست شروع رشد ترک اشاره کرد. این تغییرات در ابتدا بصورت افزایشی و در ادامه بصورت کاهشی است. در ابتدا مقدار چقرمگی شکست شروع رشد ترک تا مدت 5 هفته افزایش می‌یابد که این مقدار برای 5 هفته به مقدار 17.29% است و در ادامه پس از 10 هفته، 30.01% کاهش پیدا کرده است که این کاهش ناشی از تخریب الیاف و ناحیه بین فازی در پیشانی ترک و دو لبه نمونه است. چقرمگی شکست رشد پایای ترک با کاهش مداوم همراه بوده است که این کاهش برای 10 هفته تا 13.48% ادامه دارد. مشاهده می‌شود که طول ناحیه فرآیند شکست نیز همواره کاهش پیدا می‌کند که این مقدار در 10 هفته اعمال شرایط محیطی برابر 49.31% نسبت به حالت اولیه است. همچنین مشاهده می‌شود مقدار نفوذ در راستای الیاف بصورت قابل توجهی بیشتر از راستای عمود بر الیاف است که بیانگر غالب بودن نفوذ و تغییرات در این راستا نسبت به راستای دیگر است.

5- فهرست علایم

P مقدار بار در لحظه شروع رشد ترک (N)

a طول ترک (m)

b عرض قطعه (m)

G نرخ رهایی انرژی کرنشی، چقرمگی شکست (J / m^2)

C نرمی

علایم یونانی

δ مقدار بازشدگی دهانه ترک (m)

Δ ضریب اصلاح طول ترک (m)

زیرنویس‌ها

I مود اول

c بحرانی

S متقارن

6- مراجع

[1] Pagano, N.J. and Schoeppner, G.A., "Delamination of Polymer Matrix Composites : Problems and Assessment," . In: Comprehensive Composite Materials. pp. 433–528, 2000.

[2] Piggott, M.R., "Mechanical Aging," . In: Wiley Encyclopedia of Composites. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2012.

[3] Pochiraju, K.V. Tandon, G.P. and Schoeppner, G.A., "Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites," Springer US, Boston, MA, 2012.

[4] Martin, R., "Ageing of Composites," Elsevier Science, 2008.

[5] Zenasni, R. Bachir, A.S. Garcia, M.A. Argüelles, A. and Viña, J., "Hygrothermal Aging Effect on the Interlaminar Fracture of Woven Fabric Fibre/ PEI Composite Material," Sci. Eng. Compos. Mater., Vol. 11, No. 4, pp. 225–230, 2004.

[6] Zenasni, R. Bachir, A.S. Viña, I. Arguelles, A. and Viña, J., "Effect of Hygrothermomechanical Aging on the Interlaminar Fracture Behavior of Woven Fabric Fiber/PEI Composite Materials," J. Thermoplast. Compos. Mater., Vol. 19, No. 4, pp. 385–398, 2006.

[7] Selzer, R. and Friedrich, K., "Influence of Water Up-Take on Interlaminar Fracture Properties of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composites," J. Mater. Sci., Vol. 30, No. 2, pp. 334–338, 1995.

[8] Zhao, Y. Liu, W. Seah, L.K. and Chai, G.B., "Delamination growth behavior of a woven E-glass/bismaleimide composite in seawater environment," Compos. Part B Eng., Vol. 106, No. 20, pp. 332–343, 2016.

[9] Scida, D. Aboura, Z. and Benzeggagh, M.L., "The Effect of Ageing on the Damage Events in Woven-Fibre Composite Materials under Different Loading Conditions," Compos. Sci. Technol., Vol. 62, No. 4, pp. 551–557, 2002.

[10] Alessi, S. Pitarresi, G. and Spadaro, G., "Effect of Hydrothermal Ageing on the Thermal and Delamination Fracture Behaviour of CFRP Composites," Compos. Part B Eng., Vol. 67, pp. 145–153, 2014.

[11] Srivastava, V.K. and Hogg, P.J., "Moisture Effects on the Toughness, Mode-I and Mode-II of Particles Filled Quasi-Isotropic Glass-Fibre Reinforced Polyester Resin Composites," J. Mater. Sci., Vol. 33, No. 5, pp. 1129–1136, 1998.

[12] Nash, N.H. Young, T.M. and Stanley, W.F., "The Reversibility of Mode-I and -II Interlaminar Fracture Toughness after Hydrothermal Aging of Carbon/Benzoxazine Composites with a Thermoplastic Toughening Interlayer," Compos. Struct., Vol. 152, pp. 558–567, 2016.

[13] Almansour, F.A. Dhakal, H.N. and Zhang, Z.Y., "Effect of Water Absorption on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Flax/Basalt Reinforced Vinyl Ester Hybrid Composites," Compos. Struct., Vol. 168, pp. 813–825, 2017.

[14] Kootsookos, A. and Mouritz, A.P., "Seawater Durability of Glass- and Carbon-Polymer Composites," Compos. Sci. Technol., Vol. 64, No. 10–11, pp. 1503–1511, 2004.

[15] Amini, M. and Khavandi, A., "Evaluation of the water absorption content effect on the dielectric properties and tensile strength of polymer composites," J. Sci. Technol. Compos., 2019.

[16] Cheng, X. Zhang, Q. Zhang, J. Guo, X. and Niu, Z., "Parameters prediction of cohesive zone model for simulating composite/adhesive delamination in hygrothermal environments," Compos. Part B Eng., Vol. 166, No. January, pp. 710–721, 2019.

[17] Viana, G. Costa, M. Banea, M.D. and da Silva, L.F.M., "Water Diffusion in Double Cantilever Beam Adhesive Joints," Lat. Am. J. Solids Struct., Vol. 14, No. 2, pp. 188–201, 2017.

[18] Xu, D. Liu, P.F. Li, J.G. and Chen, Z.P., "Damage mode identification of adhesive composite joints under hygrothermal environment using acoustic emission and machine learning," Compos. Struct., Vol. 211, No. July 2018, pp. 351–363, 2019.

[19] Mansouri, L. Djebbar, A. Khatir, S. and Abdel Wahab, M., "Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites," Compos. Struct., Vol. 207, pp. 816–825, 2019.

[20] Resin Selection Guide For Corrosion Resistant FRP Applications,, 2007.

[21] Nuplex ® composites, Technical Data Sheet.

[22] ASTM International, Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents,, 2014.

[23] ASTM International, Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing,, 2013.

[24] ASTM International, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional, ASTM Standard D5528-94a,, 2013.

[25] Huang, G. and Sun, H., "Effect of Water Absorption on the Mechanical Properties of Glass/Polyester Composites," Mater. Des., Vol. 28, No. 5, pp. 1647–1650, 2007.

[26] Gu, H. and Hongxia, S., "Delamination Behaviour of Glass/Polyester Composites after Water Absorption," Mater. Des., Vol. 29, No. 1, pp. 262–264, 2008.

[27] Fraga, A.N. Alvarez, V.A. Vazquez, A. and de la Osa, O., "Relationship between Dynamic Mechanical Properties and Water

Absorption of Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Glass Fiber Composites," J. Compos. Mater., Vol. 37, No. 17, pp. 1553–1574, 2003.

[28]Maxwell, A.S. Broughton, W.R. Dean, G. and Sims, G.D., Review of Accelerated Ageing Methods and Lifetime Prediction Techniques for Polymeric Materials,, 2005.