

بررسی مقاومت به نوع اول تورق در کامپوزیت‌های هیبرید بین لایه‌ای و درون لایه‌ای تقویت شده با پارچه بازالت / نایلون

مجید طهرانی^{۱*}، هوشنگ نصرتی^۱ و علی لاک^۲

۱. دانشکده فرش، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۳/۲۹)

چکیده- کاربردهای عملی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با پارچه به دلیل حساس بودن آنها به تورق ناشی از بارگذاری ضربه‌ای، محدود است. یک راه حل برای این مشکل، هیبرید کردن کامپوزیت‌های پلیمری است. در این پژوهش، تأثیر نوع الیاف تقویت کننده، نحوه هیبرید کردن، نحوه چینش لایه‌ها و نرخ بارگذاری بر رفتار تورق در نوع اول کامپوزیت‌های بازالت خالص، نایلون خالص و هیبرید (بازالت/ نایلون) بین لایه‌ای و درون لایه‌ای بررسی شده است. کامپوزیت‌ها به روش لایه‌گذاری دستی (چهار لایه برای هر نمونه) و با استفاده از پارچه‌های بازالت/نایلون و رزین اپوکسی تولید شدند. طول ترک در حال رشد در نمونه‌های کامپوزیتی با آزمون نوع اول تورق اندازه‌گیری شد. مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها بر مبنای تئوری اصلاح شده باریکه تیر یک‌سر گیردار دو لبه اندازه‌گیری و پس از تحلیل آماری با هم مقایسه شد. چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای ۳۰ تا ۸۰ درصد نسبت به نمونه‌های خالص بهبود یافت. همچنین با افزایش نرخ بارگذاری نیروی شروع تورق به مقدار قابل توجهی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تورق - چقرمگی شکست - هیبرید بین لایه‌ای - هیبرید درون لایه‌ای - بازالت - نایلون.

Investigation of Mode I Delamination Resistance in Inter-ply and Intra-ply Hybrid Composites Reinforced with Basalt/Nylon Woven Fabrics

M. Tehrani^{1*}, H. Nosrati² and A. Lorak²

1. Department of Carpet, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2. Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract: Due to their sensitivity to impact-induced delamination, woven fabric reinforced polymer composites have limited practical applications. Hybridization of polymer composites has been proposed as a solution to this problem. In this study, the effects of fiber reinforcement type, hybridization method, plies stacking sequence and loading rate on mode I delamination behavior of pure basalt, pure nylon, inter-ply and intra-ply hybrid (basalt/nylon) composites were investigated. Composites were

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mtehrani@sku.ac.ir

prepared by the hand lay-up method (four layers for each sample) using basalt/nylon woven fabrics and epoxy resin. Crack length during its propagation in composite samples was measured by mode I delamination test. The inter-laminar fracture toughness of composite specimens was calculated using modified double-cantilever beam theory and the results were compared by statistical methods. A 30 to 80% improvement in the critical fracture toughness of intra-ply hybrid composite compared to pure ones was recorded. Moreover, the delamination initiation load decreased significantly by increasing the loading rate.

Keywords: Delamination, Fracture toughness, Inter-ply hybrid, Intra-ply hybrid, Basalt, Nylon.

فهرست علائم

عرض نمونه (mm)	b	چقرمگی شکست (KJ/mm^2)	G_I
مقدار جابه‌جایی دو فک (mm)	δ	چقرمگی شکست بحرانی (KJ/mm^2)	G_{Ic}
اصلاحیه طول ترک (mm)	Δ	نیروی کششی (N)	P
		طول ترک (mm)	a

۱- مقدمه

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون سبکی و استحکام کششی زیاد به‌عنوان جایگزین مناسب فلزات در صنایع گوناگون همچون صنایع دریایی، فضایی و نظامی مطرح است [۱]. مواد کامپوزیتی با وجود داشتن مزایا، مشکل‌هایی نیز در مقایسه با فلزات دارند. از معایب کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان به حساس بودن آنها نسبت به عیوب ناشی از بارگذاری ضربه‌ای و جدایش بین لایه‌ای^۱ اشاره کرد [۳-۱].

جدایش بین لایه‌ای یا تورق یکی از معمول‌ترین پدیده‌های تخریب است که دلیل کلی آن فقدان تقویت‌کننده^۲ در راستای ضخامت و وجود تنش‌های بین لایه‌ای^۳ است. در فرایند لایه‌چینی کامپوزیت‌ها ممکن است به علت وجود آلودگی یا به دام افتادن حباب‌های هوا^۴ در برخی نواحی سطحی لایه‌ها، اتصال ناقصی بین آنها ایجاد شود و ممکن است تحت اثر بارگذاری مکانیکی یا حرارتی، لایه‌ها در این نواحی از یکدیگر جدا شوند. گاهی اعمال نیروی بیش از حد، موجب ترک در ناحیه اتصال و جدایش بین لایه‌ها می‌شود. با توجه به گستردگی مسائل تورق، از دیدگاه‌های مختلفی به بررسی تورق در کامپوزیت‌ها پرداخته شده است. محققان تورق را با توجه به شرایط ترک، ویژگی‌های روش حل، نحوه بارگذاری و

فرضیات در نظر گرفته شده در حل مسئله تقسیم‌بندی کرده‌اند [۴ و ۵]. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد مطالعات جدی در زمینه پدیده تورق در مواد مرکب توسط پاگانو [۶] در سال ۱۹۶۷ شروع شد و بعد از آن در سال ۱۹۷۰ توسط پوپو و ایونس [۷] ادامه یافت. در این تحقیقات مدل‌هایی ابتدایی ارائه شد که بسیار خام بودند ولی کارهای آنها انگیزه‌های زیادی را برای تحقیقات سخت و کامل درباره پدیده تورق به وجود آورد که در سال‌های بعد باعث شد از تورق به‌عنوان تهدیدآمیزترین نوع شکست در سازه‌های کامپوزیتی یاد شود. در سال‌های اخیر تورق از جنبه‌های گوناگون همچون روش‌های مختلف آزمایش کردن در نوع‌های مختلف، اثر نوع مواد، اثر شرایط محیطی و پارامترهای مؤثر بر آزمایش، جهت گیری الیاف و چینش لایه‌ها^۵ بررسی شده است. گوکتاس و همکاران [۸] تأثیر نوع دوخت لایه‌های کامپوزیتی را بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای^۶ کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نوع دوخت تأثیر قابل توجهی بر افزایش چقرمگی شکست دارد. زمسیک [۹] چقرمگی شکست بین لایه‌ای تحت بارگذاری نوع I را بررسی کرد و دریافت مشکل اصلی در انجام آزمایش، غیریکنواخت بودن ناحیه ترک و پل‌زنی الیاف است. زاباج [۱۰] چقرمگی

شکست بین لایه‌های تحت بارگذاری نوع I و نوع II را در کامپوزیت‌های گرافیت- پلی‌آیمید بررسی کردند. آنها دریافتند با افزایش دما، چقرمگی شکست در بارگذاری نوع I، افزایش و در بارگذاری نوع II کاهش می‌یابد. چارالاموس و همکاران [۱۱] رفتار برشی نوع I را در دماها و شرایط بارگذاری مختلف و در حالت خستگی^۷ بررسی کردند. آنها دریافتند چگونگی تأثیر دما بر چقرمگی شکست، به نحوه اعمال بار وابسته است. پیرا و همکاران [۱۲ و ۱۳] استحکام برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌های چندلایه را در نمونه‌های کربن/اپوکسی بررسی کردند. آنها نشان دادند رفتار تورق درحالتی که ترک ایجاد شده در بین لایه‌های صفر درجه حرکت می‌کند، با حالتی که در بین لایه‌ها با جهت الیاف ۹۰ درجه حرکت می‌کند، در زمان رشد تورق متفاوت است. رهان و همکاران [۱۴] تأثیر آرایش الیاف را روی نوع I تورق بررسی کردند. نتایج نشان داد اثر تغییر زاویه لایه‌های مجاور ترک نسبت به سایر لایه‌ها بر نرخ رهایی انرژی کرنشی بیشتر است. جولياس و همکاران [۱۵] چقرمگی شکست نوع I کامپوزیت‌های هیبرید بین لایه-ای تقویت‌شده با الیاف کولار و کربن در لایه‌های بیرونی و الیاف شیشه در لایه‌های درونی را بررسی کردند. آنها دریافتند نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند. شکریه و حیدری [۱۶] اثر لایه‌چینی بر مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای و شروع و رشد تورق را بررسی کردند. آنها دریافتند مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای و شروع و رشد تورق برای تمام نمونه‌ها به‌عنوان یکی از پارامترهای ماده است. شکریه و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر طول اولیه ترک بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای پرداختند. آنها دریافتند با افزایش طول ترک چقرمگی شکست کاهش می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد یکی از مشکل‌های کامپوزیت‌های پلیمری به‌خصوص کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف ترد همچون بازالت حساس بودن آنها نسبت به عیوب ناشی از بارگذاری ضربه‌ای است [۲ و ۱۸]. برای رفع این مشکل،

پژوهشگران راه حل‌های مختلف از جمله هیبرید کردن کامپوزیت‌ها با الیاف انعطاف‌پذیر^۹ مانند نایلون را ارائه کرده‌اند. کامپوزیت‌های هیبرید تقویت شده با پارچه، بر اساس آرایش الیاف، به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، هیبریدهای بین لایه‌ای^{۱۰} هستند. در این هیبریدها جنس لایه‌های مختلف در کامپوزیت گوناگون است. در دسته دوم هر لایه ترکیبی از نخ‌ها با طرح مشخص است که به آنها هیبرید درون‌لایه‌ای^{۱۱} می‌گویند [۱۸ و ۱۹].

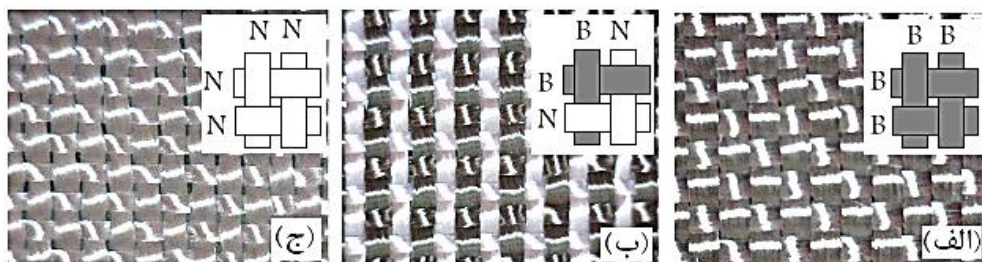
بررسی تحقیق‌های انجام شده در زمینه تورق نشان می‌دهد تاکنون مطالعه‌ای روی استحکام برش بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های هیبرید درون‌لایه‌ای انجام نشده است. در این پژوهش تأثیر نوع الیاف تقویت‌کننده، نحوه هیبرید کردن، نحوه چینش لایه‌ها و سرعت جابه‌جایی^{۱۲} بر رفتار برش بین لایه‌ای نوع I نمونه‌های کامپوزیت خالص^{۱۳} و هیبرید درون لایه‌ای و بین‌لایه‌ای بازالت و نایلون مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی رفتار برش بین لایه‌ای، مقدار چقرمگی شکست نوع I تورق نمونه‌های مختلف با استفاده از روابط مکانیک شکست اندازه‌گیری شد و پس از تحلیل آماری با هم مقایسه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی استحکام برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها از پارچه‌های تار-پودی ترکیبی بازالت و نایلون به‌عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌ها استفاده شده است. بدین منظور سه نمونه پارچه خالص و ترکیبی شامل بازالت خالص (B)، ترکیب ۵۰ درصد بازالت و ۵۰ درصد نایلون (BN) و نایلون خالص (N) با بافت تافته^{۱۴} بر روی ماشین بافندگی ریبری^{۱۵} تولید شد. پارچه‌ها در هر دو راستای تار و پود دارای خواص و ساختار یکسان هستند [۲۰]. در شکل (۱)، نمایی از پارچه‌های بافته شده آورده شده است.

برای بافت پارچه‌ها، نخ بازالت و نایلون مورد نیاز به‌ترتیب



شکل ۱- نمایی از پارچه‌های بافته شده: الف) B، ب) BN و ج) N

جدول ۱- مشخصات نخ‌های بازالت و نایلون به کار برده شده در بافت پارچه‌ها

ویژگی نخ	بازالت	نایلون	اپوکسی
نمره نخ (تکس ^{۱۹})	۸۰۰	۳۷۲	---
تاب (تاب بر متر)	۳۲	۳۰	---
دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۷۰۰	۱۲۵۰	۱۱۱۰
مدول کششی نخ (گیگا پاسکال)	۷۶	۲/۴۵	۲/۷۳
استحکام کششی تا حد پارگی (مگا پاسکال)	۱۲۶۰	۱۰۰۶	۷۵
ازدیاد طول تا حد پارگی (درصد)	۱/۹	۲۰/۵۱	۲

آرایش لایه‌ها برای هر نمونه بر اساس کد پارچه تقویت‌کننده در آن لایه، نشان داده شده است.

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش برش بین‌لایه‌ای نوع I بر اساس استاندارد ASTM D.5528 آماده‌سازی شدند. در این استاندارد ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش استحکام برش بین‌لایه‌ای با طول ۱۲۵ میلی‌متر و عرض ۲۰ میلی‌متر پیشنهاد شده است. برای آماده‌سازی، هر نمونه کمی بزرگ‌تر از ابعاد ذکر شده توسط دستگاه عمود بر دستی از روی قطعه‌های ساخته شده برش داده شد، سپس برای جلوگیری از تمرکز تنش در لبه‌های نمونه که به دلیل ترک و نایکنواختی که در حین برش ممکن است ایجاد شود، کناره‌های نمونه با سمباده مناسب تا رسیدن به ابعاد دقیق صیقل داده شد. در شکل (۲) نمایی از نمونه آماده شده برای آزمایش برش بین‌لایه‌ای نوع I آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای این آزمایش باید یک جفت لولای فلزی در سمتی از نمونه که برش بین‌لایه‌ای ایجاد می‌شود، نصب شود. بدین منظور لولاهای فلزی با استفاده از چسب دو جزئی یوهو^{۲۵} ساخت کشور

از شرکت‌های هنگ‌دیان شانگهای^{۱۶} و جوما تایر کورد^{۱۷} کشور چین به صورت روینگ^{۱۸} تهیه شده است. جدول (۱) برخی مشخصات نخ‌های بازالت و نایلون به کار برده شده را نشان می‌دهد.

کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت-نایلون به صورت چهار لایه با آرایش ۴[(۰/۹۰)] با روش لایه‌گذاری دستی^{۲۰} ساخته شدند. در کامپوزیت‌های ساخته شده از رزین اپوکسی امال-۵۰۶^{۲۱} تولید شرکت مواد مهندسی مکرر ایران به‌عنوان زمینه استفاده شده است. برای آماده‌سازی رزین از سخت‌کننده^{۲۲} اچ‌آ-۱۱^{۲۳} محصول همان شرکت استفاده شده است. مشخصات رزین استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است.

قطعات کامپوزیتی ساخته شده در این پژوهش شامل بازالت خالص (100B)، نایلون خالص (100N)، یک نمونه هیبرید درون‌لایه‌ای (Intraply) و دو نمونه هیبرید بین‌لایه‌ای (Interply1 و Interply2) با پارچه‌های خالص و یا ترکیبی بازالت-نایلون هستند. برخی ویژگی‌های کامپوزیت‌های ساخته شده در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول

جدول ۲- ویژگی‌های کامپوزیت‌های ساخته شده

کد نمونه	آرایش لایه‌ها	ضخامت (میلی‌متر)	نسبت حجمی الیاف ^{۲۴} (درصد)	چگالی تجربی (کیلوگرم بر مترمربع)	درصد حفره (درصد)
100B	[B/B/B/B]	۳/۳۰	۵۸	۱۷۸۶	۳/۸۷
Interply1	[B/B/N/N]	۳/۵۰	۶۱	۱۶۶۷	۴/۸۵
Interply2	[B/N/B/N]	۳/۴۰	۶۴	۱۶۹۰	۴/۳۹
Intraply	[BN/BN/BN/BN]	۴/۶۰	۵۳	۱۳۹۰	۵/۸۰
100N	[N/N/N/N]	۳/۹۰	۶۰	۱۱۹۰	۳/۵۶



شکل ۲- نمایی از نمونه آماده شده برای آزمایش برش بین لایه‌ای نوع I

دقیقه روی دستگاه تنظیم شد. هر آزمایش بر اساس استاندارد سه تا پنج مرتبه تکرار شد و از میانگین نتایج برای مقایسه نمونه‌ها، استفاده شد. در شکل (۳) نمایی از دستگاه کشش استفاده شده در حین آزمایش برش بین لایه‌ای و نحوه قرار گرفتن نمونه در بین فک‌های^{۲۸} دستگاه، آورده شده است.

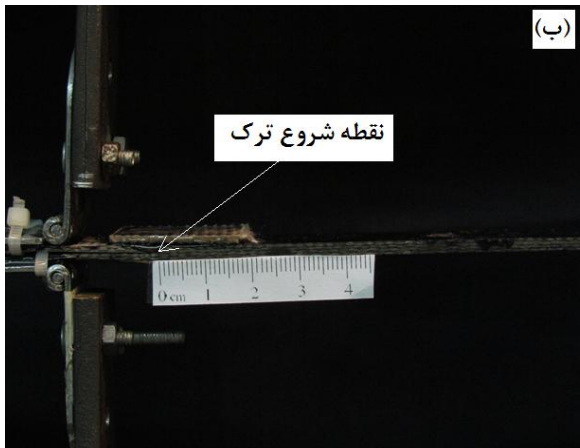
یکی از معیارهای مناسب برای ارزیابی و مقایسه استحکام برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری، چقرمگی شکست است. چقرمگی شکست نوع I تورق در نمونه‌های آزمایش شده با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده^{۲۹} که توسط هاشمی و همکاران ارائه شده [۲۱]، محاسبه شد. هاشمی و همکاران در سال ۱۹۸۹ میلادی در رابطه چقرمگی شکست تیر یک‌سر گیردار، طول ترک موجود را به اندازه $|\Delta|$ بیشتر فرض کرده و رابطه (۱) را ارائه کردند. مقدار $|\Delta|$ از ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک به دست می‌آید:

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

آلمان روی نمونه‌های برش داده شده، چسبانده شد. این لولاهای باعث می‌شوند راستای اعمال نیروی دستگاه کشش، همواره عمود بر راستای رشد ترک باشد. لازم به ذکر است مطابق استاندارد برای آزمایش برش بین لایه‌ای باید در مرحله ساخت، یک ترک مصنوعی با قرار دادن فویل آلومینیومی به ضخامت ۲۰ میکرون در بین لایه‌های دوم و سوم ایجاد شود تا شرایط رشد و گسترش ترک در طی زمان آزمایش فراهم شود. در شکل (۲)، ترک مصنوعی ایجاد شده روی نمونه آماده شده، نشان داده شده است.

۲-۲- آزمون‌ها

برای انجام آزمایش برش بین لایه‌ای از دستگاه کشش اینسترون^{۲۶} مدل ۵۵۶۶ مجهز به نیروسنج^{۲۷} ۱۰ کیلونیوتنی موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شد. برای این آزمایش مطابق استاندارد، سرعت فک متحرک ۱۰ میلی‌متر بر



شکل ۳- الف) نمایی از دستگاه کشش در حین آزمایش برش بین لایه‌ای و ب) نحوه قرار گرفتن نمونه در بین فک‌های دستگاه

نمونه‌های بررسی شده، در بخش ابتدایی شکل (۴) قابل مشاهده است. در ادامه آزمایش برش و پس از خم شدن لایه‌های بالایی و پایینی، تمام نیرو در قسمت انتهایی ترک متمرکز می‌شود. برای شروع تورق و رشد ترک به نیرویی قابل توجه نیاز است که نیروی شروع رشد ترک نامیده می‌شود. نیروی شروع رشد ترک، نقطه پایانی قسمت شبه خطی نمودار نیرو- جابه‌جایی است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود پس از نقطه شروع رشد ترک، روند نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌طور کلی تغییر می‌کند. در این حالت به‌دلیل شکل سطح پارچه تقویت‌کننده، ترک به‌صورت ایست-رو^{۳۴} گسترش می‌یابد و این مسئله باعث می‌شود نیروی برش در هر لحظه به‌صورت نوسانی، افزایش و کاهش یابد.

نیروی شروع رشد ترک نمونه‌های بررسی شده، در شکل (۵) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نیروی شروع رشد ترک در نمونه بازالت خالص هشت درصد بیشتر از نمونه نایلون خالص است. دلیل این نتیجه، استحکام خمشی^{۳۵} بالاتر نمونه بازالت خالص و مقاومت بیشتر آن در مرحله اول تورق نسبت به نمونه نایلون خالص است [۲۲]. بررسی نمودارهای شکل (۴) بعد از نقطه شروع ترک نشان می‌دهد نیروی لازم برای تورق در نمونه بازالت خالص با شدت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است اما این نیرو در نمونه نایلون خالص با شیب کم افزایش داشته است. این نتیجه از

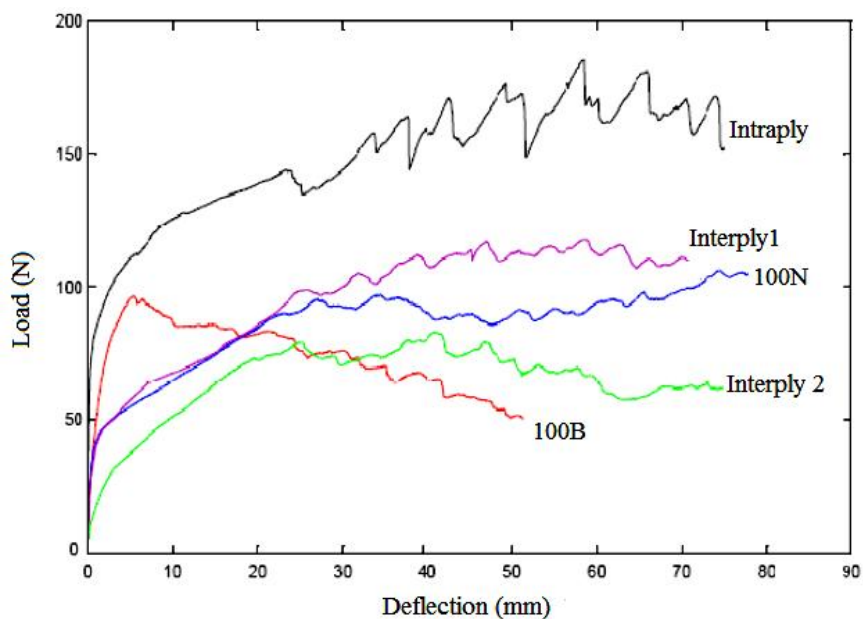
در این رابطه، G_I بیانگر چقرمگی شکست نوع I تورق، P نیروی کششی، δ مقدار جابه‌جایی دو فک، b عرض نمونه، a طول ترک و $|\Delta|$ اصلاحیه طول ترک هستند [۲۱]. در رابطه (۱)، مقدار طول ترک در هر نیروی کششی با استفاده از تصاویر دوربین نصب شده در جلوی نمونه و برچسب مدرج برای اندازه‌گیری طول ترک اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

۳- نتایج و بحث

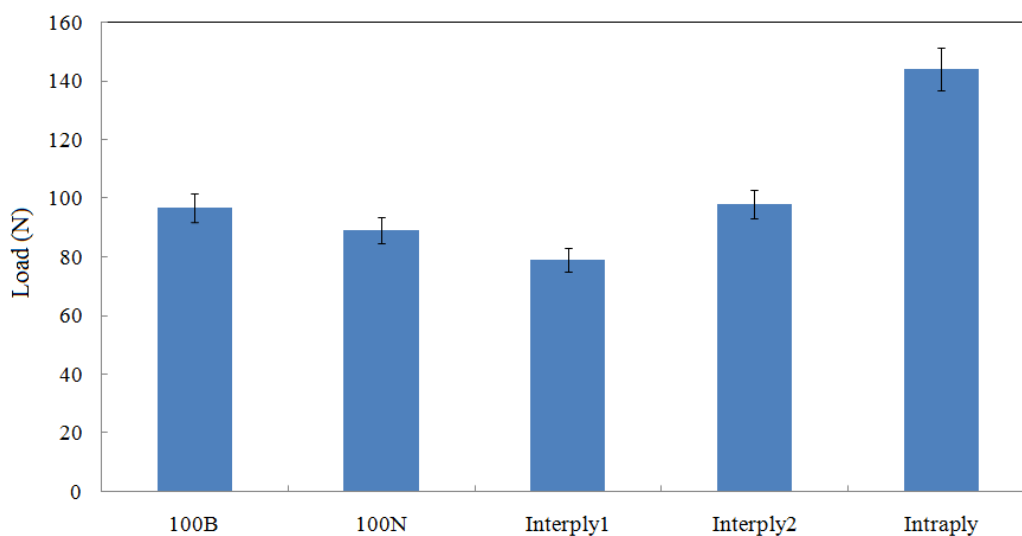
نتایج آزمایش‌های تجربی برش بین لایه‌ای نوع I برای نمونه‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار اسپ‌اس اس^{۳۰} نسخه ۱۸ و به‌کمک آزمون‌های آنووا^{۳۱} و دانکن^{۳۲} با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۹۵ درصد تحلیل و مقایسه شدند.

۳-۱- بررسی نیروی شروع رشد ترک^{۳۳} نمونه‌ها

نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های کامپوزیت بررسی شده طی آزمایش برش بین لایه‌ای نوع I، در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار نیرو- جابه‌جایی برای همه نمونه‌ها دارای دو ناحیه متفاوت است. در آزمایش برش بین لایه‌ای نوع I پس از حرکت فک متحرک، ابتدا لایه‌های موجود در بالا و پایین ترک مصنوعی خم می‌شوند و از هم فاصله می‌گیرند. این مسئله باعث افزایش نیرو به‌صورت خطی با شیب بسیار تند می‌شود. این رفتار در همه



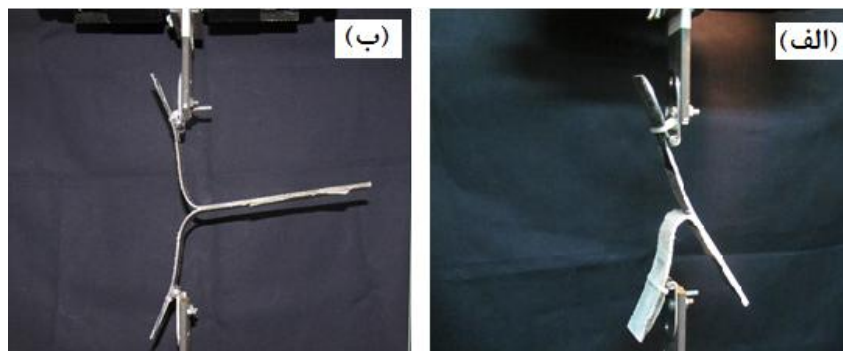
شکل ۴- نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های کامپوزیت بررسی شده طی آزمایش برش بین‌لایه‌ای



شکل ۵- نیروی شروع رشد ترک نمونه‌های بررسی شده

پذیری الیاف نایلون، در مرحله اول تورق، لایه‌های کامپوزیت با نیروی کمی از هم باز شده‌اند [۲۲] لذا پس از مرحله خمش، مقدار نیروی اعمال شده تقریباً برابر یا حتی کمی کمتر از نیرویی است که بتواند باعث گسترش ترک و ادامه تورق شود. بنابراین در مرحله گسترش ترک، نیروی تورق به مقدار کم (تقریباً ۱۱ نیوتن) افزایش یافته است. در این نمونه تورق به

آنجا ناشی می‌شود که مقدار نیروی لازم برای خمش لایه‌ها در نمونه بازالت خالص بیشتر از نیروی لازم برای گسترش تورق در این نمونه است. لذا در نمونه بازالت خالص پس از مرحله خمش، نیروی اعمال شده بین لایه‌های کامپوزیت متمرکز شده و باعث گسترش سریع ترک در مقدار جابه‌جایی کم (۵۰ میلی‌متر) شده است. در نمونه نایلون خالص به دلیل انعطاف



شکل ۶- نحوه ایجاد تورق در نمونه‌های (الف) Interply1 و (ب) Interply2

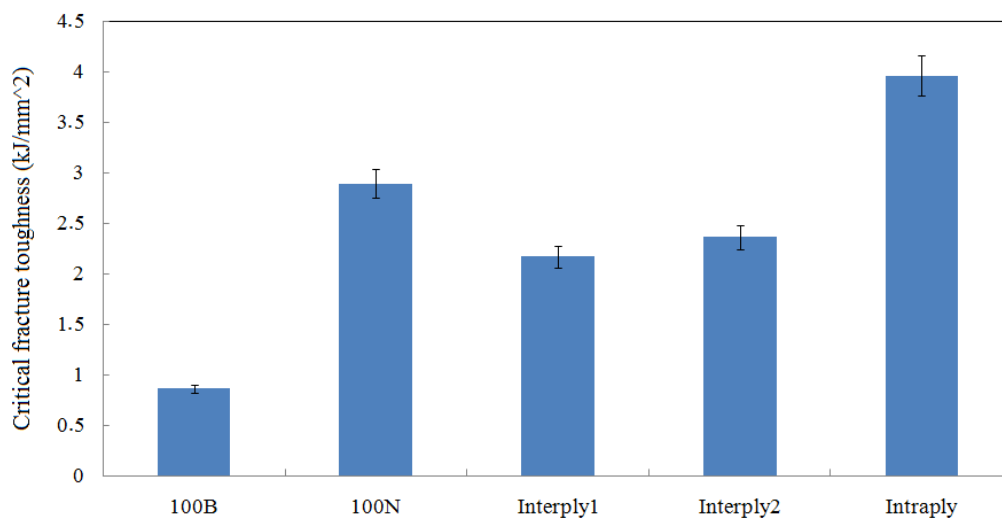
آرامی و در جابه‌جایی‌های بالا (۸۰ میلی‌متر) اتفاق افتاده است. مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای نشان می‌دهد نحوه چیدمان لایه‌ها تأثیر قابل توجهی بر نیروی شروع رشد ترک و نحوه گسترش ترک در بین لایه‌ها داشته است. نتایج نشان می‌دهد نمونه Interply1، ۲۰ درصد نیروی شروع رشد ترک بالاتری، نسبت به نمونه Interply2 نیاز دارد. همچنین همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در نمونه Interply2 پس از طی مرحله اول نمودار، در ابتدا مقدار نیروی لازم برای گسترش ترک ثابت شده و پس از رشد بیشتر ترک، این نیرو تقریباً ۲۰ نیوتن کاهش یافته است. این در حالی است که در نمونه Interply1 پس از شروع رشد ترک نیز نیروی لازم برای گسترش ترک تقریباً ۱۰ درصد افزایش یافته است. اختلاف در رفتار این نمونه‌ها به دلیل چیدمان متفاوت لایه‌ها در ساختار آنها است. از آنجایی که نمونه Interply1 دارای ساختاری غیرمقارن است لذا خم شدن لایه‌های بالایی و پایینی ترک به صورت غیرمقارن انجام می‌شود. مطابق با شکل (۶-الف) در این نمونه، لایه‌های تقویت شده با نایلون که دارای سختی خمشی کمتری هستند [۲۲] با انحنای زیادی از روی لایه‌های تقویت شده با بازالت (که دارای سختی خمشی بیشتر هستند) [۲۲] و خم نیز نشده‌اند به صورت غیرمدام جدا می‌شوند. در شکل (۶-ب) نحوه خم شدن لایه‌های کامپوزیت و گسترش ترک در زمان تورق در نمونه Interply2 نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود به دلیل مقارن بودن ساختار لایه‌های نمونه

Interply2، خم شدن لایه‌ها و گسترش ترک به صورت مقارن انجام شده است.

مقایسه نتایج نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای و خالص نشان می‌دهد نمونه Interply1 نسبت به سایر نمونه‌ها، مقاومت بهتری در برابر گسترش ترک داشته است. با توجه به این نتیجه می‌توان دریافت در صورتی که نحوه چیدمان لایه‌های کامپوزیت به صورت مطلوب انجام شود هیبرید کردن کامپوزیت‌ها با دو نوع تقویت‌کننده ترد و انعطاف‌پذیر می‌تواند تا ۱۰ درصد باعث بهبود عملکرد آنها در برابر گسترش ترک و افزایش تورق شود.

در شکل‌های (۴) و (۵)، نیروی شروع رشد ترک و نحوه گسترش ترک نمونه هیبرید درون لایه‌ای با سایر نمونه‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی شروع رشد ترک در نمونه هیبرید درون لایه‌ای به مقدار ۳۲ تا ۴۵ درصد بیشتر از نمونه‌های خالص و هیبرید بین لایه‌ای است. در نمونه هیبرید درون لایه‌ای، در هر لایه از کامپوزیت الیاف بازالت و نایلون به صورت همزمان وجود دارند. این مسئله می‌تواند باعث بهتر شدن اتصال لایه‌ها در ساختار کامپوزیت و بهبود عملکرد خمشی آنها [۲۲] و در نهایت مقاومت بهتر این نمونه در برابر تورق شود.

نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد در نمونه Intraply بعد از نقطه شروع رشد ترک، نیروی لازم برای گسترش ترک با نوسان‌های بسیار شدید و بیشتر از سایر نمونه‌ها همراه است. دلیل این رفتار به ساختار ناهموار سطح پارچه مورد استفاده



شکل ۷- چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های بررسی شده

برای تقویت این نمونه مرتبط است. در پارچه مورد استفاده برای نمونه هیبرید درون لایه‌ای به‌طور همزمان از نخ‌های بازالت و نایلون استفاده شده است. این امر باعث افزایش میزان موج نخ‌ها^{۳۶}، ناهموار شدن سطح پارچه، غیر مدام شدن اتصال بین لایه‌ها در ساختار کامپوزیت هیبرید بین لایه‌ای و در نهایت رشد ترک به حالت ایست-رو شدید در حین انجام آزمایش تورق شده است.

برای تقویت این نمونه مرتبط است. در پارچه مورد استفاده برای نمونه هیبرید درون لایه‌ای به‌طور همزمان از نخ‌های بازالت و نایلون استفاده شده است. این امر باعث افزایش میزان موج نخ‌ها^{۳۶}، ناهموار شدن سطح پارچه، غیر مدام شدن اتصال بین لایه‌ها در ساختار کامپوزیت هیبرید بین لایه‌ای و در نهایت رشد ترک به حالت ایست-رو شدید در حین انجام آزمایش تورق شده است.

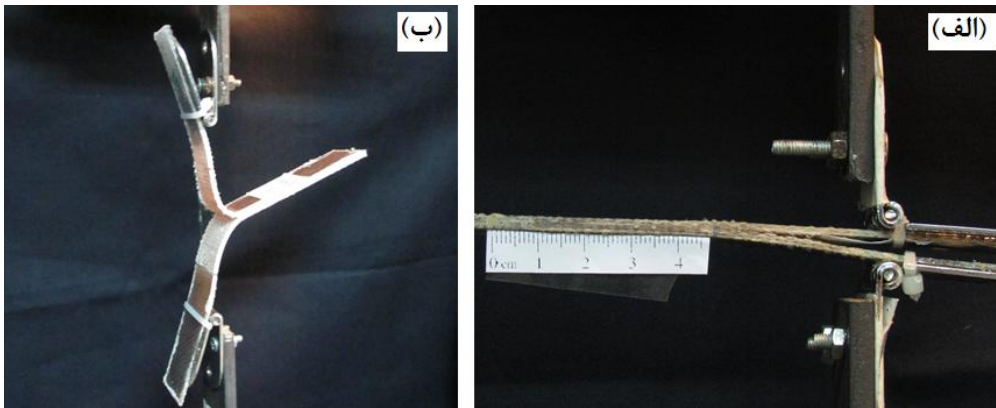
مقایسه مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای با یکدیگر در شکل (۷) نشان می‌دهد تغییر چیدمان لایه‌ها در این دسته از کامپوزیت‌ها، تقریباً تأثیری بر مقدار چقرمگی شکست بحرانی آنها نداشته است. نتایج نشان می‌دهد چقرمگی شکست نمونه Interply2 به مقدار کم (حدود هشت درصد) بیشتر از نمونه Interply1 است که این مقدار اختلاف، با توجه به تحلیل‌های آماری انجام شده در سطح ضریب اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود هیبرید کردن کامپوزیت‌ها به‌صورت بین لایه‌ای به مقدار قابل توجهی (تا پنج برابر) باعث افزایش جابه‌جایی در نقطه شروع رشد ترک نسبت به نمونه بازالت خالص و تا حد کمی (تا ۱/۱۴ برابر) باعث کاهش جابه‌جایی در این نقطه نسبت به نمونه نایلون

برای تقویت این نمونه مرتبط است. در پارچه مورد استفاده برای نمونه هیبرید درون لایه‌ای به‌طور همزمان از نخ‌های بازالت و نایلون استفاده شده است. این امر باعث افزایش میزان موج نخ‌ها^{۳۶}، ناهموار شدن سطح پارچه، غیر مدام شدن اتصال بین لایه‌ها در ساختار کامپوزیت هیبرید بین لایه‌ای و در نهایت رشد ترک به حالت ایست-رو شدید در حین انجام آزمایش تورق شده است.

۳-۲- مقایسه چقرمگی شکست نمونه‌ها

همان‌طور که اشاره شد یکی از معیارهای مناسب برای ارزیابی و مقایسه استحکام برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری، چقرمگی شکست است [۲۱]. در این تحقیق از نیروی شروع رشد ترک برای تعیین چقرمگی شکست بحرانی^{۳۷} استفاده شد. در شکل (۷)، چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های مختلف با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه‌های هیبرید درون لایه‌ای و بازالت خالص به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار چقرمگی شکست بحرانی را دارند. نتایج نشان می‌دهد مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونه هیبرید درون لایه‌ای به ترتیب ۱/۸۲، ۱/۶۷، ۱/۳۷ و ۴/۶۰ برابر چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های Interply1.



شکل ۸- نحوه ایجاد تورق در نمونه‌های: الف) 100B و ب) 100N

(شکل ۸- ب) و پس از جابه‌جایی زیاد (تقریباً ۲۵ میلی‌متر)، نیروی لازم برای شروع رشد ترک تأمین می‌شود.

۳-۳- تأثیر سرعت جابه‌جایی فک‌ها بر رفتار برش بین لایه‌ای نوع I

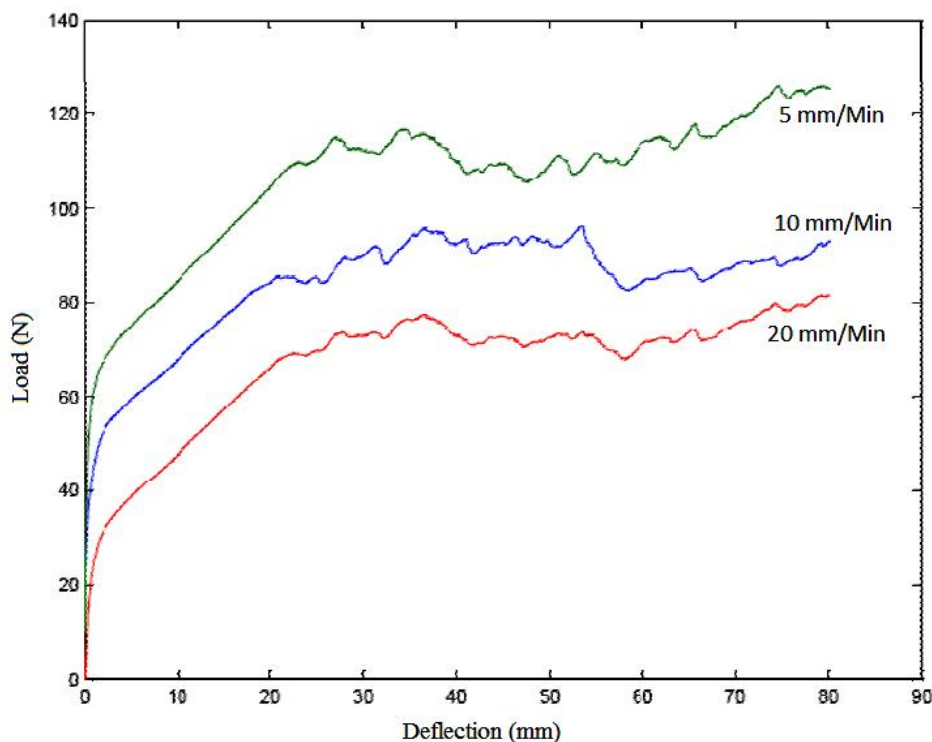
در شکل (۹) نمودار نیرو - جابه‌جایی برش بین لایه‌ای نوع I برای نمونه نایلون خالص در سرعت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییر سرعت جابه‌جایی تأثیر قابل توجهی بر رفتار برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها و مقدار نیروی شروع رشد ترک داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش سرعت کشش از پنج میلی‌متر بر دقیقه به ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب باعث کاهش ۲۳ و ۴۰ درصدی نیروی شروع رشد ترک در نمونه نایلون خالص شده است. این نتیجه با یافته‌های کمپستون و همکاران همخوانی دارد [۲۳]. بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد زمانی که سرعت جابه‌جایی در آزمایش برش بین لایه‌ای نوع I افزایش یابد سفتی زمینه کاهش می‌یابد و این مسئله باعث کاهش مقاومت خمشی و در نهایت کاهش نیروی شروع رشد ترک می‌شود [۲۳ و ۲۴].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر نوع الیاف تقویت‌کننده، نحوه هیبرید

خالص شده است. این مسئله بر مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونه‌های هیبرید بین‌لایه‌ای نسبت به نمونه‌های خالص مؤثر بوده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای تقریباً ۶۰ درصد بیشتر از نمونه بازالت خالص و ۲۰ درصد کمتر از نمونه نایلون خالص است.

مقایسه شکل‌های (۵) و (۷) نشان می‌دهد نتایج چقرمگی شکست بحرانی با نتایج نیروی شروع رشد ترک در برخی موارد متفاوت هستند. مقایسه نمونه‌های خالص در این دو نمودار نشان می‌دهد نیروی شروع رشد ترک نمونه بازالت خالص (۹۶/۲۲)، هشت درصد از نمونه نایلون خالص (۸۹/۰۹) بیشتر است. این در حالی است که چقرمگی شکست بحرانی نمونه نایلون خالص (۲/۸۹)، ۳/۳۶ برابر نمونه بازالت خالص (۵/۸۶) است. دلیل این مسئله می‌تواند به اختلاف استحکام خمشی و تفاوت مقدار جابه‌جایی دو فک در نقطه شروع رشد ترک وابسته باشد [۲۲]. در نمونه بازالت خالص پس از شروع آزمایش، لایه‌های بالا و پایین ترک تقریباً به صورت صلب از هم باز می‌شوند (شکل ۸- الف) لذا پس از جابه‌جایی کمی (تقریباً ۱۰ میلی‌متر)، نیرو در بین لایه‌ها متمرکز می‌شود و ترک شروع به رشد می‌کند. در نمونه نایلون خالص به دلیل انعطاف‌پذیری لایه‌ها و مدول خمشی کم آنها [۲۲]، با حرکت فک‌ها ابتدا لایه‌های بالایی و پایینی ترک به صورت منحنی‌وار خم می‌شوند



شکل ۹- نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه نایلون خالص در سرعت‌های جابه‌جایی مختلف

نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای، نایلون خالص و بازالت خالص است.

- هیبرید کردن کامپوزیت‌ها به صورت درون‌لایه‌ای تا حد قابل توجهی باعث بهبود چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیت‌ها خواهد شد.

- نحوه چیدمان لایه‌ها تأثیر معناداری بر مقدار چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیت‌های بررسی شده نداشته است.

تغییر سرعت جابه‌جایی تأثیر قابل توجهی بر رفتار برش بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها و مقدار نیروی شروع رشد ترک داشته است. افزایش سرعت کشش از پنج میلی‌متر بر دقیقه به ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب باعث کاهش ۲۳ و ۴۰ درصدی نیروی شروع رشد ترک در نمونه نایلون خالص شده است.

کردن، نحوه چینش لایه‌ها و سرعت جابه‌جایی بر رفتار برش بین لایه‌ای نوع I نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید تقویت شده با پارچه‌های بازالت/نایلون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند:

- نیروی شروع رشد ترک در نمونه هیبرید درون‌لایه‌ای به مقدار ۳۲ تا ۴۵ درصد بیشتر از نمونه‌های خالص و هیبرید بین لایه‌ای است.

- در صورتی که نحوه چیدمان لایه‌های کامپوزیت به صورت مطلوب انجام شود هیبرید کردن کامپوزیت‌ها با دو نوع تقویت-کننده ترد و انعطاف‌پذیر می‌تواند باعث افزایش نیروی شروع رشد ترک شود.

- مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونه هیبرید درون‌لایه‌ای به ترتیب ۱/۶۷، ۱/۳۷ و ۴/۶۰ برابر چقرمگی شکست بحرانی

واژه‌نامه

1. delamination
2. reinforcement

3. inter-laminar stress
4. void

5. stacking sequence
6. fracture toughness
7. fatigue
8. brittle
9. ductile
10. inter-ply
11. intra-ply
12. loading rate
13. pure
14. plain
15. rapier
16. Hengdian Group Shanghai
17. Juma Tyre Cord
18. roving
19. tex
20. hand-lay-up
21. mL-506
22. hardner
23. hA-11
24. fiber volume fraction
25. uHO
26. instron
27. load cell
28. fixture
29. double cantilever beam
30. sPSS
31. anova
32. duncan
33. crack initial load
34. stick-slip
35. flexural strength
36. crimp
37. critical fracture toughness

مراجع

1. Nasuha, N., Azmi, A. I., and Tan, C. L., "A Review on Mode-I Interlaminar Fracture Toughness of Fibre Reinforced Composites", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 908, pp. 1-8, 2017.
2. Tehrani Dehkordi, M., Bahrami, S. H., and Nategi Jahromi, R., "Effect of Different Parameters on Charpy Impact Properties of Quasi Isotropic Epoxy Composites Reinforced with Basalt and Glass Fibers", *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 33, pp. 91-103, 2015. [In Farsi].
3. Tehrani Dehkordi, M., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G., and Ghelli, D., "Low Velocity Impact Properties of Intra-ply Hybrid Composites Based on Basalt and Nylon Woven Fabrics", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3835-3844, 2010.
4. Lachaud, F., Piquet, R., and Michel, L., "Delamination in Mode I and II of Carbon Fibre Composite Materials: Fibre Orientation Influence", *Journal of Composite Materials*, Vol. 4, pp. 204-220, 1998.
5. Szekrenyes, A., "Delamination of Composite Specimen", Ph.D Thesis, University of Technology and Economics, Budapest, 2005.
6. Pagano, N. J., "Analysis of the Flexure Test of Bidirectional Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 1, pp. 336-342, 1967.
7. Puppo, A. H., and Evensen, H. A., "Interlaminar Shear in Laminated Composites under Generalized Plane Stress", *Journal of Composite Materials*, Vol. 4, pp. 204-220, 1970.
8. Goktas, D., Kennon, W. R., and Ptluri, P., "Improvement of Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Stitched Glass/Epoxy Composites", *Applied Composite Materials*, Vol. 24, pp. 351-375, 2017.
9. Zemicik, R., and La, V., "Numerical and Experimental Analyses of the Delamination of Cross-ply Laminates", *Materials and Technology*, Vol. 44, pp. 171-174, 2008.
10. Czabaj, M. W., and Davidson, B. D., "Determination of the Mode I, Mode II, and Mixed-Mode I-II Delamination Toughness of a Graphite/Polyimide Composite at Room and Elevated Temperatures", *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, pp. 2235-2253, 2016.
11. Charalambous, G., Allegri, G., and Hallett, S. R., "Temperature Effects on Mixed Mode I/II Delamination under Quasi-Static and Fatigue Loading of a Carbon/Epoxy Composite", *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 77, pp. 75-86, 2015.
12. Pereira, A. B., and Morais, D., "Mode I Interlaminar Fracture of Carbon/Epoxy Multidirectional Laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 2261-2270, 2004.
13. Pereira, A. B., Morais, D., Moura, M. F. S. F., and Magadha, A. G., "Mode I Interlaminar Fracture of Woven Glass/Epoxy Multidirectional Laminates", *Composites*, Vol. 36, pp. 1119-1127, 2005.
14. Mohamed Rehana, M. S., Rousseau, J., Gong, X. J., Guillaumata, L., and Ali, J. S., "Effects of Fiber Orientation of Adjacent Plies on the Mode I Crack Propagation in a Carbon-Epoxy Laminates", *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 3179-3184, 2011.
15. Julias, A., and Murali, V., *Advances in Materials and Metallurgy-Interlaminar Fracture Behaviour of Hybrid Laminates Stacked with Carbon/Kevlar Fibre as Outer Layers and Glass Fibre as Core*, 1st ed., Springer, Singapore, p. 91, 2018.
16. Shokrieh, M. M., and Heidari-Rarani, M., "Effect of Stacking Sequence on R-curve Behavior of Glass/Epoxy DCB Laminates with 0°/0° Crack Interface", *Materials Science and Engineering*, Vol. 529, pp. 265- 269, 2011.
17. Shokrieh, M. M., Heidari-Rarani, M., and Ayatollahi,

- M. R., "Delamination R-Curve as a Material Property of Unidirectional Glass/Epoxy Composites", *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 211-218, 2012.
18. Tehrani Dehkordi, M., Nosraty, H., and Shokrieh, M. M., "Low Velocity Impact Simulation of Intraply Hybrid Composites Reinforced with Brittle and Ductile Fibers", *Computational Methods in Engineering*, Vol. 32, pp. 115-124, 2013. [In Farsi].
 19. Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C., and Pilati, F., "Intraply and Interply Hybrid Composites Based on E-glass and Polyvinyl Alcohol Woven Fabrics: Tensile and Impact Properties", *Polymer International*, Vol. 53, pp. 1290-1297, 2004.
 20. Tehrani Dehkordi, M., Nosraty, H., and Shokrieh, M. M., "A Study on the Effect of Basalt and Nylon Yarns Hybridization on the Tensile Properties of Their Weaved Fabrics", *Journal of Textile Science and Technology*, Vol. 2, pp. 39-49, 2012. [In Farsi].
 21. Hashemi, S., Kinloch, A. J., and Williams, G. J., "Corrections Needed in Double-Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fibre-Composites", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 8, pp. 125-129, 1989.
 22. Tehrani-Dehkordi, M., Nosraty, H., and Rajabzadeh, M. H., "Effects of Plies Stacking Sequence and Fiber Volume Ratio on Flexural Properties of Basalt/Nylon-Epoxy Hybrid Composites", *Fibers and Polymers*, Vol. 16, pp. 918-925, 2015.
 23. Compston, P., Jar, P. Y. B., and Takahashi, K., "The Use of Crack Opening Displacement Rate to Assess Matrix-to-Composite Mode I Toughness Transfer", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 19, pp. 17-19, 2000.
 24. Zabala, H., Aretxabaleta, L., Castillo, G., and Aurrekoetxea, J., "Loading Rate Dependency on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional and Woven Carbon Fibre Epoxy Composites", *Composite Structures*, Vol. 21, pp. 75-82, 2015.