

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 لرک^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 تقویتشده با پارچه بهدلیل 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 تقویتکننده، 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 بهروش 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 اندازه گیری شد. مقدار چقرمگی شکست بین لایهای نمونهها بر مبنای تئوری اصلاح شده باریکه تیر یکسر گیردار دو لبه اندازه گیری و پس از تحلیل آماری با هم مقایسه شد. چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیتهای هیبرید درونلایهای ۳۰ درصد نسبت به نمونههای خالص بهبود یافت. همچنین با افزایش نرخ بارگذاری نیروی شروع تورق به مقدار قابل توجهی کاهش ایفتی این

واژههای کلیدی: تورق – چقرمگی شکست – هیبرید بینلایهای– هیبرید درونلایهای – 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. Nosraty² and A. Lorak²

Department of Carpet, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
 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 مكاتبات، پست الكترونيكي: 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 عارتم
عرض نمونه (mm)	b	چقرمگی شکست (KJ/mm ²)	Gı
مقدار جابهجایی دو فک (mm)	δ	چقرمگی شکست بحرانی (KJ/mm²)	G _{IC}
اصلاحیه طول ترک (mm)	Δ	نیروی کششی (N)	Р
		طول ترک (mm)	а

۱ – مقدمه

امروزه استفاده از کامپوزیتها بهدلیل 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، مشکل هایی نیز در مقایسه با فلزات دارند. از معایب کامپوزیتهای پلیمری می توان به حساس بودن آنها نسبت به عیوب ناشی از بارگذاری ضربهای و جدایش بین لایهای اشاره کرد [۳-۱].

جدایش بین لایه ای یا تورق یکی از معمول ترین پدیده های تخریب است که دلیل کلی آن فقدان تقویت کننده^۲ در راستای ضخامت و وجود تنش های بین لایه ای^۳ است. در فرایند لایه چینی کامپوزیت ها ممکن است به علت وجود آلودگی یا به دام افتادن حباب های هوا^۴ در برخی نواحی سطحی لایه ها، اتصال ناقصی بین آنها ایجاد شود و ممکن است تحت اثر بارگذاری مکانیکی یا حرارتی، لایه ها در این نواحی از یکدیگر ناحیه اتصال و جدایش بین لایه ها در این نواحی از یکدیگر ناحیه اتصال و جدایش بین لایه ها می شود. با توجه به گستردگی مسائل تورق، از دیدگاه های مختلفی به بررسی تورق در کامپوزیت ها پرداخته شده است. محققان تورق را با توجه به شرایط ترک، ویژگی های روش حل، نحوه بارگذاری و

فرضیات درنظر گرفته شده در حل مسئله تقسیم بندی 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 یوویـو و ايونسن [٧] ادامه يافت. در اين تحقيقات مدل هايي ابتدايي 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 سال های بعد باعث شد از تورق به عنوان تهدیدآمیزترین نوع شکست در سازههای کامپوزیتی یاد شود. در سالهای اخیر تورق از جنبه های گوناگون همچون روش های 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] تـأثیر نـوع دوخـت لایـههـای کـامپوزیتی را بـر چقرمگی شکست بینلایهای^۶ کامپوزیتهای شیشـه- اپوکسـی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نوع دوخت تاثیر قابل تـوجهی بـر افـزایش چقرمگـی شکسـت دارد. زمسـیک [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

DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.3.1.6]

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 لایه های مختلف در کامپوزیت گوناگون است. در دسته دوم هر لایه ترکیبی از نخها با طرح مشخص است که به آنها هیبرید درونلایهای^{۱۱} می گویند [۱۸ و ۱۹].

بررسی تحقیق های انجام شده در زمینه تورق نشان می دهد تاکنون مطالعهای روی استحکام برش بین لایهای کامپوزیت های هیبرید درون لایه ای انجام نشده است. در این پژوهش تأثیر نوع الیاف تقویت کننده، نحوه هیبرید کردن، نحوه چینش لایه ها و سرعت جابه جایی^{۱۲} بر رفتار برش بین لایه ای نوع I نمونه های کامپوزیت خالص^{۱۳} و هیبرید درون لایه ای و بین لایه ای بازالت و نایلون مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی رفتار برش بین لایه ای، مقدار چقرمگی شکست نوع I تورق نمونه های مختلف با استفاده از روابط مکانیک شکست اندازه گیری شد و پس از تحلیل آماری با هم مقایسه شده است.

۲ – مواد و روش تحقیق ۲-۱- مواد و آمادهسازی نمونهها

به منظور بررسی استحکام برش بین لایه ای کامپوزیت ها از پارچه های تاری-پودی ترکیبی بازالت و نایلون به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت ها 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^{۱۱} بر روی ماشین بافندگی رپیری^{۱۵} تولید شد. پارچه ها در هر دو راستای تار و پود دارای خواص و ساختار یکسان هستند [۲۰]. در شکل (۱)، نمایی از پارچه های بافته شده آورده شده است.

برای بافت پارچهها، نخ بازالت و نایلون مورد نیاز بهترتیب

شکست بین لایهای تحت بارگذاری نوع I و نوع II را در كامپوزیتهای گرافیت- پلی آیمید بررسی كردند. آنها دریافتند با افزایش دما، چقرمگی شکست در بارگذاری نوع I، افرایش و در بارگذاری نوع II کاهش می یابد. چارالاموس و همکاران [۱۱] رفتار برشی نوع I را در دماها و شرایط بارگذاری مختلف و در حالت خستگی^۷ بررسمی کردنـد. آنهـا دریافتنـد چگونگی تأثیر دما بر چقرمگی شکست، به نحوه اعمال بار وابسته است. پريرا و همكاران [۱۲ و ۱۳] استحكام برش بين لایهای کامپوزیتهای چندلایه را در نمونههای کربن/اپوکسی بررسی کردند. آنها نشان دادند رفتار تورق درحالتی که تـرک ایجاد شده در بین لایه های صفر درجه حرکت میکند، با حالتی که در بین لایه ها با جهت الیاف ۹۰ درجه حرکت میکند، در زمان رشد تورق متفاوت است. رهان و همکاران [۱۴] تا ثیر 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. جولیاس و همکاران [۱۵] چقرمگی شکست نوع I کامپوزیت های هیبرید بین لایه-ای تقویتشده با الیاف کولار و کربن در لایـههـای بیرونـی و الیاف شیشه در لایههای درونی را بررسی کردند. آنها دریافتند نمونه های تقویت شده با الیاف کربن نسبت به سایر نمونه ها عملکرد بهتری داشتهاند. شکریه و حیدری [۱۶] اثر لایهچینی بر مقدار چقرمگی شکست بین لایهای و شروع و رشد تـورق 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 اولیہ ترک بر چقرمگی شکست بین لایہای پرداختند. آنها دریافتند با افزایش طول ترک چقرمگی شکست كاهش مى يابد.

همان طور که اشاره شد یکی از مشکل های کامپوزیت های پلیمری به خصوص کامپوزیت های تقویت شده با الیاف تر د همچون بازالت حساس بودن آنها نسبت به عیوب ناشی از بارگذاری ضربه ای است [۲ و ۱۸]. برای رفع این مشکل،



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

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

- 1		•	
اپو كسى	نايلون	بازالت	ویژکی نخ
	777	٨٠٠	نمره نخ (تکس ^{۱۹)})
	٣٠	٣٢	تاب (تاب بر متر)
1110	1700	۲۷۰۰	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲/۷۳	۲/۴۵	٧۶	مدول کششی نخ (گیگا پاسکال)
V۵	1009	1790	استحکام کششی تا حد پارگی (مگا پاسکال)
۲	۲۰/۵۱	١/٩	ازدیاد طول تا حد پارگی (درصد)

از شرکتهای هنگدیان شانگهای^۱ و جوما تایر کورد^{۱۷} کشور چین بهصورت روینگ^{۱۸} تهیه شده است. جدول (۱) برخی مشخصات نخهای بازالت و نایلون بهکار برده شده را نشان می دهد.

کامپوزیتهای خالص و هیبرید بازالت - نایلون به صورت چهار لایه با آرایش ۴[(۹۰/۹۰)] با روش لایه گذاری دستی^{۲۰} ساخته شدند. در کامپوزیتهای ساخته شده از رزین اپوکسی امال – ۵۰۶^{۲۱} تولید شرکت مواد مهندسی مکرر ایران به عنوان زمینه استفاده شده است. برای آماده سازی رزین از سختکننده^{۲۲} اچآ – ۱۱^{۳۱} 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 Interply1) با پارچههای خالص و یا ترکیبی بازالت-نایلون هستند. برخی ویژگیهای کامپوزیتهای ساخته شده در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول

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

نمونههای مورد نیاز برای آزمایش برش بین لایه ای نوع I بر اساس استاندارد ASTM D.5528 آمادهسازی شدند. در این استاندارد ابعاد نمونهها برای آزمایش استحکام برش بین لایه ی 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 بهدلیل ترک و نایکنواختی که در حین برش ممکن است ایجاد شود، کنارههای نمونه با سمباده مناسب تا رسیدن شده برای آزمایش برش بین لایه ای نوع I آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود برای این آزمایش باید یک جفت لولای فلزی در سمتی از نمونه که برش بین لایه ای ایجاد می شود، نصب شود. بدین منظور لولاهای فلزی با

درصد حفره	چگالي تجربي	نسبت حجمي الياف	ضخامت		4: : 15			
(درصد)	(کیلوگرم بر مترمربع)	(ميلىمتر) (درصد)		ارایس د یکما	كد تمونه			
$\gamma/\Lambda V$	١٧٨٦	۵۸	٣/٣٠	[B/B/B/B]	100B			
۴/۸۵	1887	۶۱	۳/۵۰	[B/B/N/N]	Interply1			
۴/۳۹	1890	54	٣/۴۰	[B/N/B/N]	Interply2			
$\Delta/\Lambda \circ$	129 0	٥٣	۴/۶۰	[BN/BN/BN/BN]	Intraply			
3/09	1190	۶.	٣/٩ •	[N/N/N]	100N			

جدول ۲– ویژگیهای کامپوزیتهای ساخته شده



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

(1)

آلمان روی نمونه های برش داده شده، چسبانده شد. این لولاها باعث می شوند راستای اعمال نیروی دستگاه کشش، همواره عمود بر راستای رشد ترک باشد. لازم به ذکر است مطابق استاندارد برای آزمایش برش بین لایه ای باید در مرحله ساخت، یک ترک مصنوعی با قرار دادن فویل آلومینیومی به ضخامت ۲۰ میکرون در بین لایه های 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

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 بینلایهای 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 کامپوزیت های پلیمری، چقرمگی شکست است. چقرمگی شکست نوع I تورق در نمونه های 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 بهاندازه |۵| بیشتر فرض کرده و رابطه (۱) را ارائه کردند. مقدار |۵| از ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک بهدست میآید:

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



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

در این رابطه، GI بیانگر چقرمگی شکست نوع I تورق، G_i بیانگر چقرمگی شکست نوع I تورق، G_i نیروی کششی، δ مقدار جابهجایی دو فک، d = -2 مرض نمونه، 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 اندازه گیری طول ترک اندازه گیری شد (شکل ۳).

٣- نتايج و بحث

نتایج آزمایش های تجربی برش بین لایه ای نوع I برای نمونه های مختلف با استفاده از نرمافزار اس پی اس اس ^{۳۰} نسخه ۱۸ و به کمک آزمون های آنووا^{۳۱} و دانکن^{۳۲} با درنظر گرفتن ضریب اطمینان ۹۵ درصد تحلیل و مقایسه شدند.

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

نمودار نیرو – جابه جایی نمونه های کامپوزیت بررسی شده طی آزمایش برش بین لایه ای نوع I، در شکل (۴) آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود نمودار نیرو – جابه جایی برای همه نمونه ها دارای دو ناحیه متفاوت است. در آزمایش برش بین لایه ای نوع I پس از حرکت فک متحرک، ابتدا لایه های موجود در بالا و پایین ترک مصنوعی خم می شوند و از هم فاصله می گیرند. این مسئله باعث افزایش نیرو به صورت خطی با شیب بسیار تند می شود. این رفتار در همه

نمونه های بررسی شده، در بخش ابتدایی شکل (۴) قابل مشاهده است. در ادامه آزمایش برش و پس از خم شدن لایه های بالایی و پایینی، تمام نیرو در قسمت انتهای ترک متمرکز می شود. برای شروع تورق و رشد ترک به نیرویی قابل توجه نیاز است که نیروی شروع رشد ترک نامیده می شود. نیروی شروع رشد ترک، نقطه پایانی قسمت شبه خطی نمودار نیرو – جابه جایی است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود پس از نقطه شروع رشد ترک، روند نمودار نیرو – جابه جایی به طور کلی تغییر می کند. در این حالت به دلیل شکل سطح پارچه تقویت کننده، ترک به صورت ایست – رو^{۳۳} گسترش می یابد و این مسئله باعث می شود نیروی برش در هر لحظه به صورت نوسانی، افزایش و کاهش یابد.

نیروی شروع رشد ترک نمونههای بررسی شده، در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود نیروی شروع رشد ترک در نمونه بازالت خالص هشت درصد بیشتر از نمونه نایلون خالص است. دلیل این نتیجه، استحکام خمشی^{۵۳} بالاتر نمونه بازالت خالص و مقاومت بیشتر آن در مرحله اول تورق نسبت بهنمونه نایلون خالص است [۲۲]. بررسی نمودارهای شکل (۴) بعد از نقطه شروع ترک نشان می دهد 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



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 (تقریبا ۱۱ نیوتن) افزایش یافته است. در این نمونه تورق به آنجا ناشی می شود که مقدار نیروی لازم برای خمش لایه ها 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 لایه های کامپوزیت متمرکز شده و باعث گسترش سریع ترک در مقدار جابه جایی کم (۵۰ میلی متر) شده است. در نمونه نایلون خالص به دلیل انعطاف



شکل ۶- نحوه ایجاد تورق در نمونه های الف) Interply1 و ب) Interply2

آرامی و در جابهجاییهای بالا (۸۰ میلیمتر) اتفاق افتاده است. مقايسه نمودار نيرو - جابهجايي نمونههاي هيبريـد بـين لايهاي نشان ميدهد نحوه چيدمان لايهها تأثير قابل توجهي بر نیروی شروع رشد ترک و نحوه گسترش ترک در بین لایـههـا داشته است. نتایج نشان میدهد نمونه Interplyl، ۲۰ درصد نیروی شروع رشد ترک بالاتری، نسبت به نمونه Interply2 نیاز دارد. همچنین همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود در نمونه Interply2 پس از طی مرحله اول نمودار، در ابتدا مقدار نیروی لازم برای گسترش تـرک ثابـت شـده و پـس 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 تـرک تقریباً ۱۰ درصـد افزایش یافته است. اختلاف در رفتار این نمونه ها بهدلیل چیدمان متفاوت لایهها در ساختار آنها است. از آنجایی که نمونه Interply1 دارای ساختاری غیرمتقارن است لـذا خـم شدن لایههای بالایی و پایینی ترک بهصورت غیرمتقارن انجام می شود. مطابق با شکل (۶- الف) در این نمونه، لایه های تقویت شده با نایلون که دارای سختی خمشی کمتری هستند [۲۲] با انحنای زیادی از روی لایه های تقویت شده با بازالت (که دارای سختی خمشی بیشتر هستند) [۲۲] و خم نیز نشده-اند به صورت غیرمدام جدا می شوند. در شکل (۶- ب) نحوه خم شدن لایههای کامپوزیت و گسترش ترک در زمان تـورق در نمونه Interply2 نشان داده شده است. در این شکل مشاهده مي شود به دليل متقارن بودن ساختار لايـه هـاي نمونـه

Interply2، خم شدن لایهها و گسترش ترک بهصورت متقارن 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 درصورتی که نحوه چیدمان لایههای کامپوزیت بهصورت مطلوب انجام شود هیبرید کردن کامپوزیتها با دو نوع تقویتکننده ترد و انعطاف پذیر 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 درونلایهای با سایر نمونهها مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود نیروی شروع رشد ترک در نمونه هیبرید درون لایهای به مقدار ۳۲ تا ۴۵ درصد بیشتر از نمونههای خالص و هیبرید بینلایهای است. در نمونه هیبرید درونلایهای، در هر لایه از کامپوزیت الیاف بازالت و نایلون به صورت همزمان وجود دارند. این مسئله می تواند باعث بهتر شدن اتصال لایه ادر 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



برای تقویت این نمونه مرتبط است. در پارچه مورد استفاده برای نمونه هیبرید درون لایهای به طور همزمان از نخهای بازالت و نایلون استفاده شده است. این امر باعث افزایش میزان موج نخها^۳، ناهموار شدن سطح پارچه، غیر مدام شدن اتصال بین لایهها در ساختار کامپوزیت هیبرید بین لایهای و درنهایت رشد ترک به حالت ایست - رو شدید در حین انجام آزمایش تورق شده است.

۲-۲- مقایسه چقرمگی شکست نمونهها

همانطور که اشاره شد یکی از معیارهای مناسب برای ارزیابی و مقایسه استحکام بـرش بـین لایـهای کامپوزیـتهـای پلیمـری، چقرمگی شکست است [۲۱]. در این تحقیـق از نیـروی شـروع رشد ترک برای تعیین چقرمگی شکست بحرانی^{۳۷} استفاده شد.

در شکل (۷)، چقرمگی شکست بحرانی نمونههای مختلف با هم مقایسه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود نمونه های هیبرید درون لایه ای و بازالت خالص به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار چقرمگی شکست بحرانی را دارند. نتایج نشان می دهد مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونه هیبرید درون لایه ای به ترتیب ۱/۸۲، ۱/۶۷، ۱/۱۶۷ و ۱/۴۶۰ برابر چقرمگی شکست بحرانی نمونه های Interply1

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

100N ، Interply2 و 100B است. با توجه به این نتیجه می توان دریافت هیبرید کردن کامپوزیت ها به صورت درون لایه ای تا حد قابل توجهی باعث بهبود چقرمگی شکست بحرانی کامپوزیت ها خواهد شد. دلیل بالاتر بودن چقرمگی شکست نمونه Intraply نسبت به نمونه های دیگر، بالاتر بودن نیرو و جابه جایی اعمال شده در نقط ه شروع رشد ترک است (شکل های ۴ و ۵).

مقایسه مقدار چقرمگی شکست بحرانی نمونههای هیبرید بینلایهای با یکدیگر در شکل (۷) نشان می دهد تغییر چیدمان لایهها در این دسته از کامپوزیتها، تقریباً تأثیری بر مقدار چقرمگی شکست بحرانی آنها نداشته است. نتایج نشان می دهد چقرمگی شکست نمونه Interply1 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 معنی دار نیست.

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود هیبرید کردن کامپوزیت ها به صورت بین لایه ای به مقدار قابل توجهی (تا پنج برابر) باعث افزایش جابه جایی در نقط ه شروع رشد ترک نسبت به نمونه بازالت خالص و تا حد کمی (تا ۱/۱۴ برابر) باعث کاهش جابه جایی در این نقطه نسبت به نمونه نایلون

۲٣



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

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 تـرک در برخـی موارد متفاوت هستند. مقایسـه نمونـههـای خـالص در ایـن دو نمودار نشان میدهد نیروی شروع رشد ترک نمونه بازالت خالص (۹۶/۲۲)، هشت درصد از نمونه نایلون خالص (۹۹/۰۹) بیشتر است. این در حالی است که چقرمگی شکست بحرانی نمونه نايلون خالص (۲/۸۹)، ۳/۳۶ برابر نمونه بازالت خالص (۰/۸۶) است. دلیل این مسئله میتواند به اختلاف استحکام خمشی و تفاوت مقدار جابهجایی دو فک در نقطه شروع رشـد ترک وابسته باشد [۲۲]. در نمونه بازالت خالص پـس از شـروع آزمایش، لایههای بالا و پایین ترک تقریباً بهصورت صلب از هم باز میشوند (شکل ۸-الف) لذا پس از جابهجایی کمبی (تقریبـاً ۱۰ میلیمتر)، نیرو در بین لایهها متمرکز میشود و ترک شـروع به رشد میکند. در نمونه نایلون خالص بهدلیل انعطاف پذیری لايهها و مدول خمشي كم أنها [٢٢]، بـا حركـت فـك.هـا ابتـدا لايههاي بالايي و پاييني ترک بهصورت منحنيوار خم ميشوند

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

۳-۳- تأثیر سرعت جابهجایی فکها بر رفتار برش بینلایهای نوع I

در شکل (۹) نمودار نیرو – جابه جایی برش بین لایه ای نوع I برای نمونه نایلون خالص در سرعت های ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه آورده شده است. نتایج نشان می دهد تغییر سرعت جابه جایی تأثیر قابل توجهی بر رفتار برش بین لایه ای کامپوزیت ها و مقدار نیروی شروع رشد ترک داشته است. همان طور که مشاهده می شود افزایش سرعت کشش از پنج میلی متر بر دقیقه به ۱۰ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه به ترتیب باعث نایلون خالص شده است. این نتیجه با یافته های کمپستون و نایلون خالص شده است. این نتیجه با یافته های انجام شده در این زمینه نشان می دهد زمانی که سرعت جابه جایی در آزمایش برش بین لایه ای نوع I افزایش یابد سفتی زمینه کاهش می یابد و این مسئله باعث کاهش مقاومت خمشی و درنهایت کاهش نیروی شروع رشد ترک می شود [۳۳ و ۲۴ و ۲۴]

۴- نتیجه گیری
در این پژوهش تأثیر نوع الیاف تقویت کننده، نحوه هیبرید



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 درون لایه ای به مقدار ۳۲ تا ۴۵ درصد بیشتر از نمونه های خالص و هیبرید بین لایه ای است.

درصورتی که نحوه چیدمان لایههای کامپوزیت بهصورت
 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 نمونـه هیبریـد درون لایـهای بهترتیب ۱/۶۷، ۱/۳۷ و ۴/۶۰ برابر چقرمگـی شکسـت بحرانـی

واژەنامە

inter-laminar stress
 void

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸

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

- هیبرید کردن کامپوزیتها بهصورت درونلایهای تا حـد قابـل توجهی باعث بهبود چقرمگی شکسـت بحرانـی کامپوزیـتهـا 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 ۱۰ میلیمتر بر دقیقه بهترتیب باعث کاهش ۲۳ و ۴۰ درصدی نیروی شروع رشد ترک در نمونه نایلون خالص شده است.

1. delamination 2. reinforcement

۲۵

- 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
- 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. Zemcik, R., and La, V., "Numerical and Experimental Analyses of the Delamination of Cross-

- 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

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 Quasi-Static and Fatigue Delamination under Loading of а Carbon/Epoxy Composite". Part A: Applied Science Composites. and Manufacturing, Vol. 77, pp. 75-86, 2015.
- 12. Pereira, A. B., and Morais, D., "Mode I Interlaminar Fracture Carbon/Epoxy Multidirectional of 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., Rousseaua, J., Gonga, 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.

- 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].
- 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.