



بررسی تجربی و عددی شکست بین لایه‌های کامپوزیت گرمانرم الیاف ممتد Glass/PP در مود ترکیبی (I/II)

محمد عبادی شیشه‌گران¹، نبی مهری خوانساری^{2*}، هادی قربانی³

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

3- دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 51335-1996، n.mehri@sut.ac.ir

چکیده:

اطلاعات مقاله:

امروزه مواد کامپوزیت به دلیل خواص منحصر به فرد، در صنایع مختلفی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، با توجه به کاربرد ویژه کامپوزیت‌های گرمانرم خصوصاً در صنایع هوافضا، خواص مکانیکی و رفتار شکست این مواد می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرند. یکی از فرآیندهای مهم در تولید قطعات کامپوزیتی گرمانرم، فرآیند تولید پرس گرم است. با توجه به دوام بالای این مواد و نوع محل استفاده، علاوه بر بررسی خواص مکانیکی، عمر شکست و خستگی این نوع مواد نیز می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله، هدف اصلی بررسی خواص مکانیکی و رفتار شکست مود ترکیبی (I/II) در کامپوزیت الیاف ممتد Glass/PP می‌باشد. بدین منظور، ابتدا کامپوزیت الیاف ممتد Glass/PP به روش پرس گرم ساخته شد. سپس، با استفاده از روش‌های تجربی، رفتار شکست مود ترکیبی (I/II) این ماده با استفاده از فیکسچر MMB ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مقادیر تجربی و تحلیلی ضرایب شدت تنش و انرژی شکست در مود ترکیبی (I/II) گزارش خواهد شد.

دریافت: 1403/06/29

پذیرش: 1403/09/12

کلیدواژگان

کامپوزیت، گرمانرم،

پرس گرم، شکست،

شکست مود ترکیبی (I/II)

Experimental and numerical investigation of interlayer fracture of glass/PP continuous fiber thermoplastic composite in mixed mode (I/II)

Mohammad Ebadi Shishegaran¹, Nabi Mehri Khansari^{1*}, Hadi Ghorbani²

1- Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2- PhD, Mechanical engineering department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Tabriz, PO Box 51335-1996, Iran, n.mehri@sut.ac.ir

Keywords

Composite, Thermoplastic, Hot Press, Fracture, Mixed Mode (I/II).

Abstract

Today, composite materials are widely used in various industries due to their unique properties. In the meantime, considering the special application of thermoplastic composites, especially in the aerospace industry, the mechanical properties and fracture behavior of these materials should be evaluated. One of the important processes in the production of thermoplastic composite parts is the HOT PRESS production process. Considering the high durability of these materials and the type of place of use, in addition to examining the mechanical properties, the failure and fatigue life of these materials should also be examined. In this paper, the main goal is to investigate the mechanical properties and failure behavior of the mixed mode (I/II) in the Glass/PP continuous fibers composite. For this purpose, Glass/PP continuous fiber composite was made by HOT PRESSING method. Then, using experimental methods, the composite mode failure behavior (I/II) of this material was evaluated using the fabricated MMB fixture. Finally, the experimental and analytical values of stress intensity coefficients and fracture energy in the mixed mode (I/II) will be reported.

1- مقدمه

با ماتریس‌های این مواد اشاره کرد که موجب افزایش استحکام و چقرمگی این مواد می‌شود [1-3]. کامپوزیت‌های گرمانرم مزایایی نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت‌ها دارند، از جمله سرعت تولید بالاتر و قابلیت بازیافت آن‌ها. با توجه به نیاز روزافزون به مواد سبک و مقاوم در برابر شرایط محیطی سخت، این کامپوزیت‌ها به عنوان جایگزینی مناسب برای مواد فلزی و کامپوزیت‌های

کامپوزیت‌های گرمانرم به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، به طور فزاینده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شوند. در دو دهه گذشته، پیشرفت‌های قابل توجهی در روش‌های تولید و کاربرد این کامپوزیت‌ها به وجود آمده است. از جمله این پیشرفت‌ها، می‌توان به استفاده از الیاف ممتد در ترکیب

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ebadi Shishegaran, M., Mehri Khansari, N., Ghorbani, H., "Experimental and numerical investigation of interlayer fracture of glass/PP continuous fiber thermoplastic composite in mixed mode (I/II)," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 3, pp. 2536-2545, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2024.2041133.1898>

تورق در لایه‌های کامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل عددی با تکنیک پیشنهاد شده در شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی بر حسب نمودار بار-جابجایی، افزایش مقاومت در شکست بین‌لایه‌ای در لایه‌چینی (-) $45^\circ/45^\circ$ را نشان می‌دهد. ریدر [14] از آزمون خمشی MMB برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای برای سه ماده کامپوزیت اپوکسی شکننده (AS4/3501-6)، کامپوزیت اپوکسی سخت شده پیشرفته (IM7/977-2) و کامپوزیت گرمانرم (AS4/PEEK) در محدوده مود ترکیبی استفاده کرد. سطوح شکست کامپوزیت‌ها را با معیارهای که در مقالات گزارش شده بود مورد ارزیابی قرار داد، یک معیار شکست دوخطی جدید معرفی کرده و نتایج شکست سه ماده را با معیارهای مختلف خرابی مود ترکیبی مقایسه کرده است. آروشه و همکاران [15] در سال 2021 به ارزیابی رفتار مکانیکی اتصالات پیوندی کامپوزیت به فلز در شرایط شکست مود ترکیبی پرداختند. همانطور که اشاره شد، عمده تحقیقات در زمینه برآورد انرژی شکست در مواد کامپوزیتی معطوف به روش تکنیک بست ترک مجازی است. در این مقاله، هدف اصلی بررسی خواص مکانیکی و رفتار شکست مود ترکیبی (I/II) در کامپوزیت الیاف ممتد Glass/PP می‌باشد که در دو بعد روش ساخت نمونه و روش آزمون دارای نوآوری می‌باشد. در این تحقیق از الیاف پیش‌آغشته‌های Glass/PP تک‌جهته به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیت استفاده شده است. آغشته‌سازی الیاف تک‌جهته در این نوع درصد گرم بر میلی‌متر مکعب به دلیل زمان بر بودن و پیچیدگی پروسه تجربی، جزو نوآوری به حساب می‌آید. همچنین، تغییرات ساختاری من جمله ایجاد قابلیت تنظیم فواصل بارگذاری در فیکسچر MMB ساخته شده و سبک‌سازی فیکسچر نیز از دیگر موارد نوآوری‌های محسوب می‌شود. بدین منظور، ابتدا این کامپوزیت‌ها به روش پرس گرم ساخته شدند و سپس رفتار شکست آن‌ها در شرایط مختلط (I/II) با استفاده از فیکسچر MMB مورد ارزیابی قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

جهت ساخت کامپوزیت گرمانرم الیاف ممتد از شیشه‌ی نوع (E)¹ که از الیاف‌های توزیع شده یک‌جهته ساخته شده‌اند، که به‌عنوان الیاف کامپوزیت و از پلی‌پروپیلن به‌عنوان زمینه (ماتریس) که جزء زمینه‌های گرمانرم هستند، استفاده شد. درصد حجمی الیاف مورد استفاده در این کامپوزیت 80 درصد در نظر گرفته شده است. برای شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت Glass/PP ساخته شده در حالت مود ترکیبی (I/II) از فیکسچر MMB استفاده شد. از آلومینیوم 7075 و فولاد ST37 نیز برای ساخت فیکسچر MMB استفاده شد. همچنین، به تعداد لازم، لولا از جنس استیل برای چسباندن نمونه‌ها و اتصال آن‌ها به فیکسچر استفاده شد. اتصال کامپوزیت Glass/PP به لولا با استفاده از استون²، پرایمر³ و لاکسیل⁴ انجام شد. در ادامه روش ساخت و نحوه استفاده از مواد ذکر شده به تفصیل بیان خواهد شد.

2-1- روش آزمایشگاهی ساخت کامپوزیت گرمانرم الیاف ممتد Glass/PP پرس گرم

از جمله روش‌های که برای ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم با پیش‌آغشته وجود دارند عبارتند از: (1) روش تحت خلا گرم⁵ (2) روش پرس گرم⁶ (3) روش لایه‌چینی اتوماتیک⁷ (4) روش استمپ فورمینگ⁸ (5) روش هسته پرفشار⁹ (6)

گرماسخت معرفی شده‌اند [4]. این کامپوزیت‌ها دارای مزایایی خوبی در برابر حرارت، کرنش در برابر شکست و همچنین زمان قالب‌گیری هستند. با این حال، چالش‌هایی نیز در زمینه هزینه‌های تولید و فرآیندهای آغشته‌سازی این مواد وجود دارد که نیاز به توسعه روش‌های کارآمدتر را ضروری می‌سازد [5]. یکی از فرآیندهای مهم در تولید قطعات کامپوزیتی گرمانرم، فرآیند پرس گرم است. در 20 سال گذشته، بسیاری از تکنیک‌های جدید برای کاربردهای گرمانرم پیشنهاد، توسعه و ارزیابی شده‌اند و در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم تقویت‌شده با الیاف ممتد به‌دلیل خواص خوب، با موفقیت در صنایع هواپیماسازی، نظامی و هوافضا استفاده شده‌اند. با توجه به کاربردهای مهندسی تجاری، آن‌ها می‌توانند جایگزین مواد دیگری مانند کامپوزیت‌های گرماسخت شوند [7، 8]. با این‌حال، هزینه زیاد و مشکلات آغشته کردن کامپوزیت‌های گرمانرم الیاف ممتد، ناشی از ذوب پلیمر یا استفاده از حلال‌ها، هنوز استفاده از آن‌ها را در کاربردهای تجاری محدود می‌کند. بنابراین، صرفه-جویی در هزینه و خواص مکانیکی تا حد زیادی به توسعه روش‌های کارآمدتر برای اشباع الیاف به‌دلیل ویسکوزیته بالای گرمانرم و پردازش قطعات کامپوزیتی نهایی بستگی دارد [2]. علاوه بر این، استفاده از آن‌ها به‌دلیل فقدان تکنیک‌های پردازش خوب برای ساخت الیاف‌های پیش‌آغشته انعطاف‌پذیر محدود شده است. سختی کلی این زمینه‌ها به‌دلیل ویسکوزیته بالا و دماهای پردازش بالا باعث ایجاد یک سری مشکلات می‌شود، مانند ساخت الیاف دارای استحکام بالا، غیرفعال شدن محلول که منجر به تشکیل حفره‌ها شده در نتیجه منجر به از دست دادن خواص مکانیکی، و محتوای رزین ناهمگن الیاف‌های پیش‌آغشته می‌گردد [9]. قدمی و همکاران [10] در سال 2014 لایه‌لایه شدن و تجزیه تحلیل چقرمگی شکست کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه‌ی اصلاح شده با محتوای اصلاح‌کننده لاستیکی را مورد بحث قرار دادند، همچنین روش‌های مود (I) (DCB)، مود (II) (ENF)، مود ترکیبی (I/II) (MMB) در نسبت‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نمونه کامپوزیتی اصلاح شده با (CTBN) در مودهای شکست (I)، (II) خالص و مود ترکیبی (I/II) به‌دلیل چسبندگی سطحی الیاف زمینه به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. ریدر و کروز [11] در سال 1990 توانستند اندازه‌گیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در طیف گسترده‌ای از نسبت‌های مود ترکیبی (I/II) و مود خالص (I) و مود خالص (II) انجام دهند. همچنین نرخ رهاسازی انرژی کرنشی کل (G)، نرخ رهاسازی انرژی در مود (GI) و مود (GII) برای نمونه‌های آزمایش MMB با استفاده از تجزیه تحلیل المان محدود ارزیابی کردند. چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نمونه گرافیت PEEK در نسبت‌های مختلف GI/GII با استفاده از روش MMB انجام داده شد. یوم و یو [12] در سال 2001 شکست بین‌لایه‌ای مود خالص (I)، (II) و مود ترکیبی (I/II) را برای مواد گرافیت اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. برای توصیف چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای، نسبت‌های مختلف مود ترکیبی را با تغییر موقعیت بار اعمال شده روی اهرم بارگذاری تولید کردند، و یک روش تحلیلی جدید ارائه دادند که توانست نرخ آزادسازی انرژی کرنشی را به اجزای مود (I) و مود (II) تجزیه کند. نتایج تجربی و المان محدود به خوبی با نتایج نظری مطابقت داشت. رایموندو و همکاران [13] در سال 2021 تأثیر جهت‌گیری لایه رابط بر رشد

⁶ Hot Press

⁷ Automatic Layering

⁸ Stamp Forming

⁹ High Pressure Core

¹ E-Glass

² Acetone

³ Primer 7

⁴ Laxeal 24

⁵ Hot Vacuum Bag



Fig. 3 Metal mold with a thickness of 3 millimeters

شکل 3 قالب فلزی به ضخامت 3 میلی‌متر

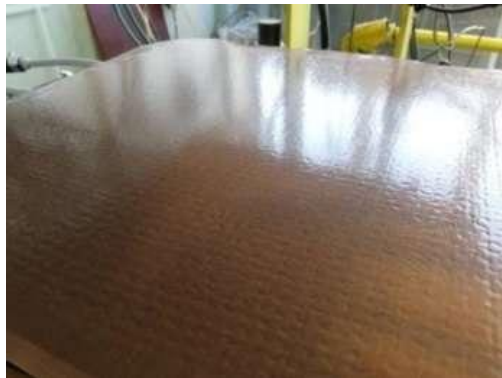


Fig. 4 Non-stick surface on which the layer of tiles is applied

شکل 4 سطح نچسب که لایه‌چینی بر روی آن انجام می‌شود

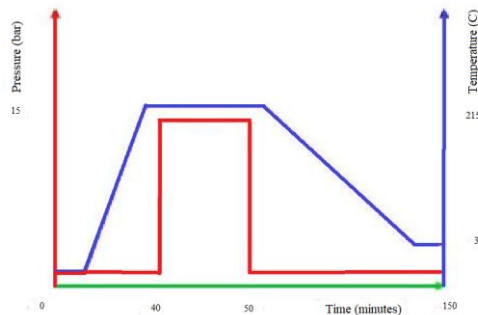


Fig. 5 Hot press molding cycle: Pressure, temperature, and time chart

شکل 5 سیکل قالب‌گیری با پرس گرم نمودار فشار، دما و زمان

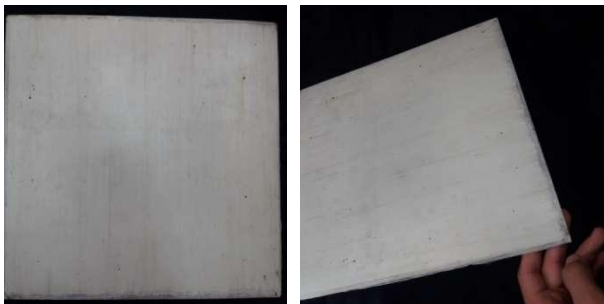


Fig. 6 Glass/PP composite sheet removed from the mold

شکل 6 ورق کامپوزیت Glass/PP خارج شده از قالب

پالتروزن¹ (7) پرینت سه‌بعدی² و 8) روش و کیوم ممبران³، در این بخش بیشتر به بررسی نوع کامپوزیت و روش ساخت پرداخته می‌شود. برای ساخت قطعات کامپوزیتی به روش پرس گرم می‌توان از انواع پیش‌آغشته استفاده نمود. در این تحقیق، پیش‌آغشته‌ها از الیاف‌های توزیع شده یک‌جهته شیشه از نوع E که در آن مشخصه‌های مکانیکی در یک جهت هستند ساخته شده است. الیاف‌های توزیع شده شیشه که در (شکل 1) نشان داده شده است به عنوان الیاف، و با مذاب رزین گرمانرم پلی‌پروپیلن که به عنوان زمینه کامپوزیت ساخته شده است، آغشته شد و در ضخامت‌های 0.3 میلی‌متر به صورت نواری (همانند شکل 1 و شکل 2) تهیه شد.



Fig. 1 Distributed Fibers

شکل 1 الیاف توزیع شده



Fig. 2 Pre-impregnated Glass/PP

شکل 2 پیش‌آغشته Glass/PP

در ادامه پیش‌آغشته‌ها درون قالب‌های مستطیلی و مربعی شکل، به صورت 10 لایه صفر درجه بر روی هم لایه‌چینی شد (شکل 3). در حین لایه‌چینی یک ورق نچسب کپتون⁴ در انتهای لایه پنجم قرار داده شد تا ترک اولیه ایجاد شود. برای نمونه ساخته شده از یک قالب فلزی به ابعاد 300 در 300 میلی‌متر و به ضخامت نهایی 3 میلی‌متر استفاده شد.

پیش‌آغشته‌های لایه‌چینی شده در درون قالب فلزی بر روی یک سطح نچسب زیر دستگاه پرس گرم 50 تنی قرار داده شد (شکل 4). اعمال دما و فشار برای پیش‌آغشته‌های مختلف متفاوت هستند که سیکل دمایی برای ماده مورد نظر به صورت (شکل 5) بررسی شد.

نمونه‌ی نهایی خارج شده از قالب بصورت یک ورق کامپوزیتی به اندازه 300 در 300 میلی‌متر و به ضخامت 3 میلی‌متر ساخته شد (شکل 6).

³ Vacuum Membranes

⁴ Kapton

¹ Pultrusion

² 3D Print

کامپوزیتی استفاده می‌شود که در این تحقیق، نمونه کامپوزیت Glass/PP مورد ارزیابی قرار گرفته است.

3-2- آزمون خواص مکانیکی کامپوزیت Glass/PP

در این قسمت از کامپوزیت ده لایه تک‌جهته شیشه پلی‌پروپیلن به منظور آزمایش‌های تجربی خواص مکانیکی و شکست استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیت مطابق استاندارد ASTM D3039 آزمایش کشش مواد کامپوزیت پایه پلیمری و به روش پرس گرم تحت فشار و حرارت بصورت یک ورق 300 در 300 میلی‌متر که از لایه‌چینی پیش‌آغشته‌های Glass/PP بر روی هم در یک قالب به ضخامت 3 میلی‌متر ساخته شد. همچنین لایه‌های الیاف در یک راستا چیده شده و با رزین آغشته شد. در ادامه، نمونه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D3039 با روش واترجت در زاویه‌های 0، 90 و 45 درجه برش داده شد. ابعاد خواص مکانیکی نمونه کامپوزیت Glass/PP با درصد حجمی الیاف 80 درصد طبق استاندارد ASTM D3039 در جدول 1 آورده شده است.

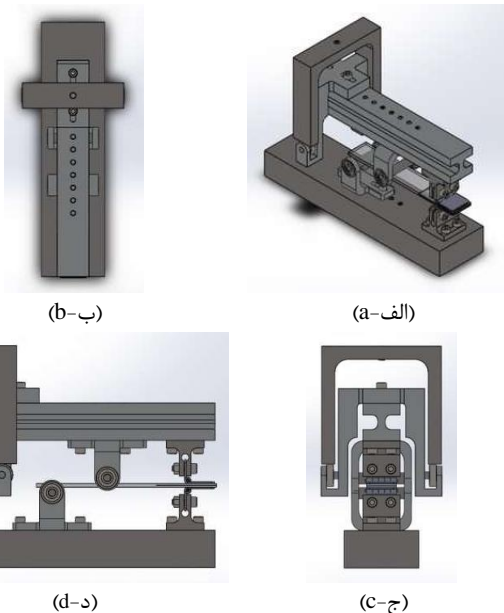


Fig. 9 Fixture designed model. a) Overall view. b) Top view. c) Front view. d) Side view.

شکل 9 مدل فیکسچر طراحی شده، (الف) نمای کلی، (ب) نمای بالا، (ج) نمای روبه‌رو، (د) نمای جانبی

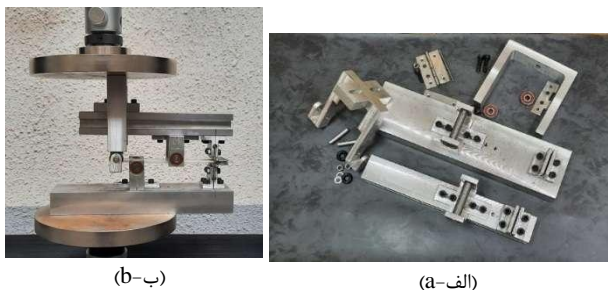


Fig. 10 a) and b), the manufactured components of the MMB fixture and its assembly on the tensile testing machine, respectively

شکل 10 الف) و ب)، به ترتیب قطعات ساخته شده فیکسچر MMB و مونتاژ آن بر دستگاه آزمون کشش

ورق کامپوزیتی تهیه شده به وسیله‌ی واترجت در راستای الیاف برش داده شد. هفت نمونه با عنوان‌های test، A، B، C، D، E، F، با ابعادی به طول 152.4 میلی‌متر، عرض 25.4 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر طبق استاندارد برش داده شد. پس از عملیات صافی سطح، ابعاد تقریبی آن‌ها به طول 152 میلی‌متر، عرض 23 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر تغییر یافت (شکل 7). این مقادیر در محدوده استاندارد ASTM D6671 و آزمون مود ترکیبی I/II انجام شده بود، قرار دارد [6].

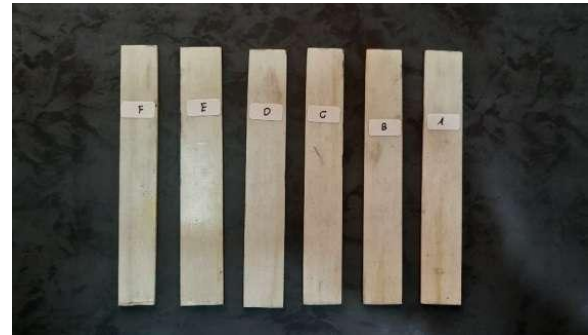


Fig. 7 Cut Glass/PP composite sample

شکل 7 نمونه کامپوزیت Glass/PP برش داده شده

2-2- ساخت فیکسچر MMB

آزمایش مود ترکیبی MMB در واقع دو حالت تیر یک سرگیردار دوپل (DCB) و خمش تیر انتهایی (ENF) را با هم ترکیب کرده، مود ترکیبی (I/II) به وجود می‌آورد (شکل 8) [14].

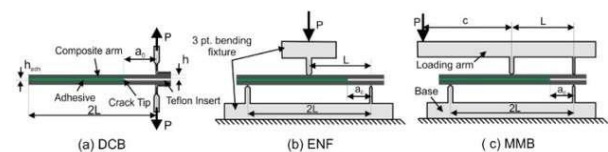


Fig. 8 Mixed Mode Loading process in the MMB fixture

شکل 8 فرایند اعمال بار مود ترکیبی در فیکسچر MMB

از دستگاه MMB برای جدا کردن لایه‌های کامپوزیت شیشه پلی‌پروپیلن برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست با نسبت‌های مختلف بین مود (I) و مود (II) بکار برده شده است. فک پایین فیکسچر ثابت نگه داشته می‌شود و فک بالایی با اعمال نیرو از انتهای اهرم¹ به سمت پایین در خلاف جهت اهرم به سمت بالا حرکت می‌کند که اعمال کننده مود (I) شکست می‌باشد. همچنین نگهدارنده غلتک² بالایی با اعمال نیرو به اهرم همزمان نیرو را به سمت پایین اعمال می‌کند که با اعمال خمش و ایجاد نیروی برشی، مود (II) شکست را بر روی نمونه کامپوزیتی اعمال می‌کند. تمامی قطعات فیکسچر MMB براساس استاندارد ASTM D6671 طراحی شده است. فرایند ساخت قطعات فیکسچر به وسیله وایرکات³ و دستگاه CNC انجام شد، در شکل 9 فیکسچر مورد نظر در نماهای مختلف نمایش داده شده است. برای درک بهتر جزئیات فیکسچر ساخته شده نمای برش داده شده آن آورده شده است. در نهایت بعد از اتمام طراحی انجام شده و ساخت قطعات فیکسچر MMB بصورت شکل 10 مونتاژ شد و برای انجام آزمون شکست مود ترکیبی (I/II) نمونه مورد نظر استفاده شد. همچنین، از این فیکسچر به منظور بررسی استحکام بین‌لایه‌ای مواد

³ Wirecut

¹ Lever
² Roller Holder

فاصله فک بالای فیکسچر با تکیه‌گاه بالا با حرف L نشان داده شد و مقدار آن برای نمونه‌های مورد نظر 55 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین، فاصله فک و تکیه‌گاه پایین دو برابر حالت قبل یعنی 2L برابر با 110 میلی‌متر در نظر گرفته شد. مقدار 2h نشان‌دهنده ضخامت نمونه بود، که طبق استاندارد ذکر شده 3 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در ادامه فاصله تکیه‌گاه بالا و قطعه اعمال کننده نیرو که محل اعمال نیروی فشاری است با C نشان داده شده است. فاصله C نسبت‌های مختلف انرژی شکست مود (I) و مود (II) را نشان می‌دهد. هرچقدر مقدار C بیشتر باشد نسبت انرژی شکست مود (I) به مود (II) نیز بیشتر خواهد شد. مقدار C در نظر گرفته شده در این آزمون با توجه به مود ترکیبی بودن شکست و بعد از کالیبره کردن فیکسچر بصورت تجربی در فاصله 30 تا 85 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

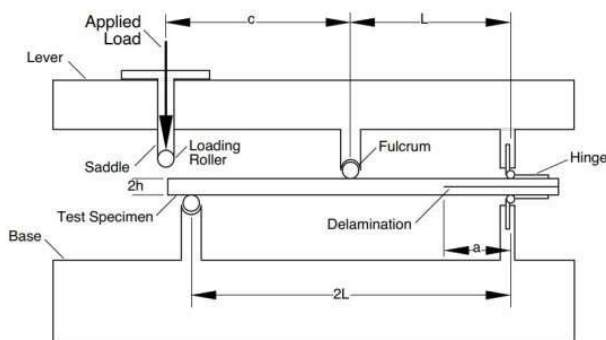


Fig. 11 MMB fixture schematic

شکل 11 شماتیک فیکسچر MMB

به منظور محاسبه انرژی و چقرمگی شکست مود ترکیبی (I/II) و همچنین بررسی سخت‌شوندگی در اطراف نوک ترک در نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده، نمونه‌ها در دستگاه آزمایش فشاری 2 تنی Gotech-AL-7000-AL10، در جهت الیاف با استفاده از فیکسچر MMB مطابق شکل 12 انجام شد.



Fig. 12 Gotech-AL-7000-AL10 Pressure Testing Machine

شکل 12 دستگاه آزمون فشار Gotech-AL-7000-AL10

جدول 1 الزامات ساخت کامپوزیت طبق استاندارد ASTM D3039

Table 1 Composite manufacturing requirements according to ASTM D3039 standard

زاویه فیلت (°)	ضخامت تپ (E) (میلی‌متر)	طول تپ (D) (میلی‌متر)	ضخامت نمونه (C) (میلی‌متر)	طول نمونه (A) (میلی‌متر)	عرض نمونه (B) (میلی‌متر)	نوع الیاف
90	1.5	56	3	250	15	0°
90	1.5	25	3	175	25	90°
90	1.5	25	3	175	25	45°

در مواد ارتوتروپیک با سه صفحه تقارن، 9 پارامتر مستقل محاسبه می‌شود که شامل مدول کششی (E)، مدول برشی (G) و ضریب پواسون (ν) در سه راستا است [16, 17]. همچنین، ماتریس نرمی برای این مواد در رابطه (1) آورده شده است.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

مقادیر E_{11} و E_{22} از آزمون کشش به ترتیب در راستای الیاف و عمود بر الیاف به ترتیب، 19.57287 و 3.5624 گیگاپاسکال بدست آمد. همچنین، مدول الاستیک E_{33} برابر با همان مقدار E_{22} در نظر گرفته شد [4, 18, 19].

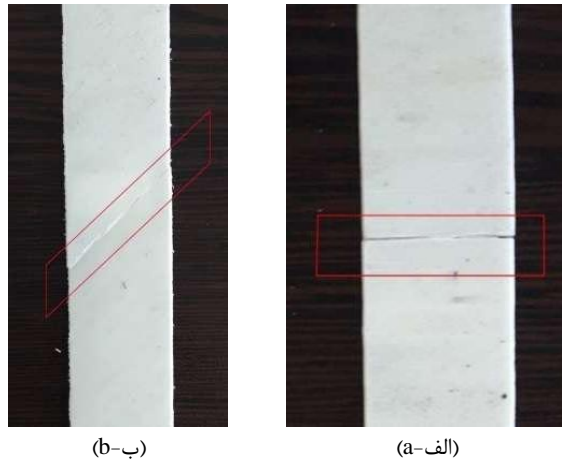
$$G_{12} = \frac{\sin^2 Q \cdot \cos^2 Q}{\frac{1}{E_x} - \frac{\cos^4 Q}{E_1} - \frac{\sin^4 Q}{E_2} + \left(\frac{\nu_{21}}{E_1} + \frac{\nu_{12}}{E_2} \right) \sin^2 Q \cdot \cos^2 Q}$$

$$G_{23} = \frac{\sin^2 Q \cdot \cos^2 Q}{\frac{1}{E_x} - \frac{\cos^4 Q}{E_2} - \frac{\sin^4 Q}{E_3} + \left(\frac{\nu_{32}}{E_2} + \frac{\nu_{23}}{E_3} \right) \sin^2 Q \cdot \cos^2 Q}$$

$$G_{31} = \frac{\sin^2 Q \cdot \cos^2 Q}{\frac{1}{E_x} - \frac{\cos^4 Q}{E_3} - \frac{\sin^4 Q}{E_1} + \left(\frac{\nu_{13}}{E_3} + \frac{\nu_{31}}{E_1} \right) \sin^2 Q \cdot \cos^2 Q} \quad (2)$$

4-2 آزمون شکست مود ترکیبی (I/II) با استفاده از فیکسچر MMB

در این قسمت از کامپوزیت ده لایه تک‌جهته شیشه پلی‌پروپیلن به منظور آزمایش‌های تجربی استفاده شد. نمونه کامپوزیتی با روش واترجت در زاویه‌های صفر درجه و در ابعاد و اندازه‌های به طول 152 میلی‌متر، عرض 23 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر طبق استاندارد به تعداد 5 نمونه برش و مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین ترک اولیه در همه نمونه‌ها 25 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها بعد از اتصال چسبی با لولاها، به فک‌های که در فیکسچر MMB طراحی شده بود، با استفاده از پیچ و مهره متصل شدند. نمونه‌های کامپوزیت شیشه پلی‌پروپیلن همانند (شکل 11) در فیکسچر جایگذاری شد، مقدار ترک اولیه با a_0 نشان داده شده و در همه آزمون‌ها 25 میلی‌متر در نظر گرفته شد.



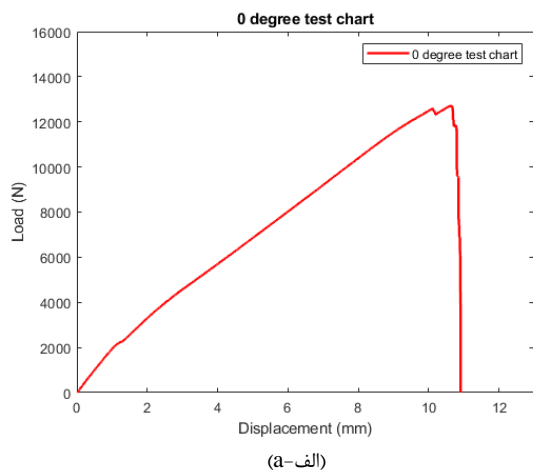
(b-ب)

(الف-ا)

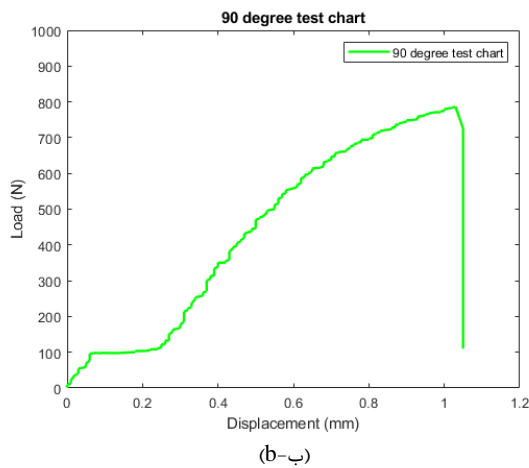
Fig. 14 a) Four-layer Glass/PP composite sample under tension: a) Perpendicular to the fibers. b) Along the fibers ± 45 .

شکل 14 الف) نمونه کامپوزیت ده لایه تحت کشش الف) در راستای عمود بر الیاف ب) تحت کشش در راستای ± 45

مدول الاستیک در راستای الیاف (E_{11})، عمود بر الیاف (E_{22}) و مقدار (E_x) برابر با 19.57087، 3.5624 و 4.39168 گیگاپاسکال (طبق شکل 15، الف، ب، ج) بدست آمد. همچنین، به دلیل شرایط تنش صفحه‌ای و ضخامت کم، مقادیر E_{33} برابر E_{22} قرار گرفت [18].



(الف-ا)



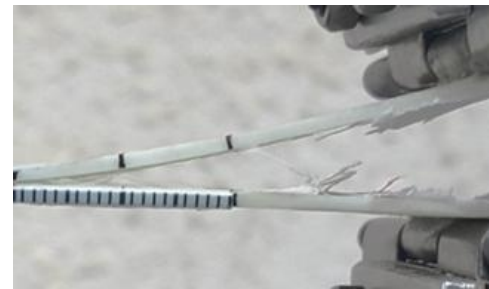
(ب-ب)



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)

Fig. 13 Indication of crack growth in the composite sample using the MMB method. a) Before testing. b) After testing. c) Close-up view of crack growth showing glass fiber bridging.

شکل 13 نشان دهنده رشد ترک نمونه کامپوزیتی به روش MMB. الف) قبل از آزمون. ب) بعد از آزمون. ج) نمای نزدیک از پل زنی الیاف شیشه.

3- نتایج و بحث

به منظور محاسبه مدول الاستیک (E_{11}) و (E_{22}) به ترتیب نمونه در راستای الیاف و عمود بر الیاف تحت کشش قرار گرفت. همچنین، با توجه به رابطه (2) مقدار E_x (مدول کششی در راستای زاویه ± 45)، نمونه مطابق شکل 14 در راستای زاویه ± 45 برش داده شده و تحت کشش قرار گرفت.

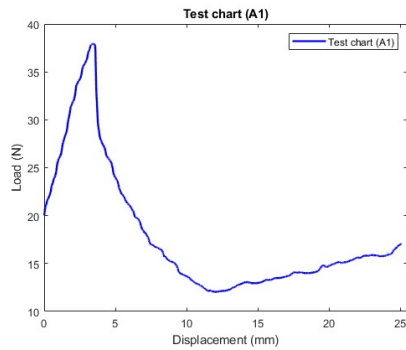


Fig. 16 mixed mode test diagram for sample A1

شکل 16 نمودار آزمون مود ترکیبی نمونه A1

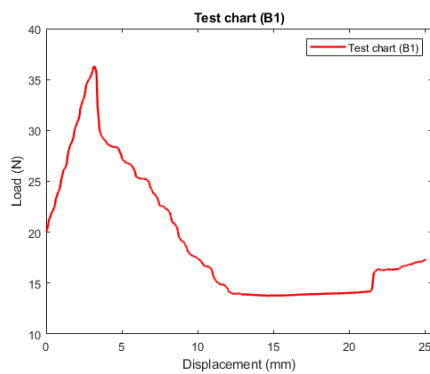


Fig. 17 mixed mode test diagram for sample B1

شکل 17 نمودار آزمون مود ترکیبی نمونه B1

در ادامه آزمون در شرایط یکسان برای چهار حالت A تا E بررسی و صحت سنجی شد.

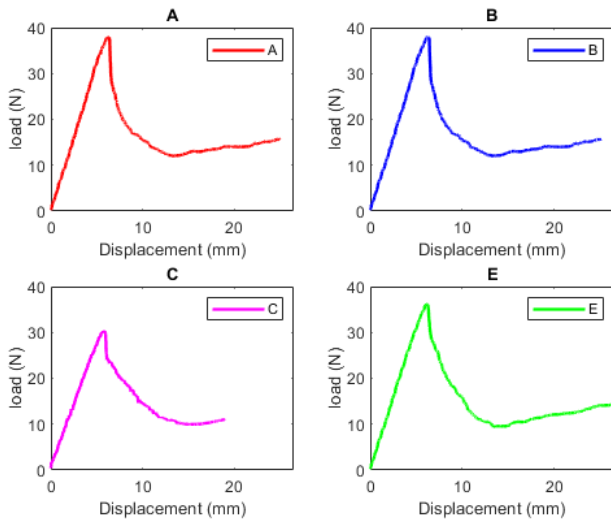
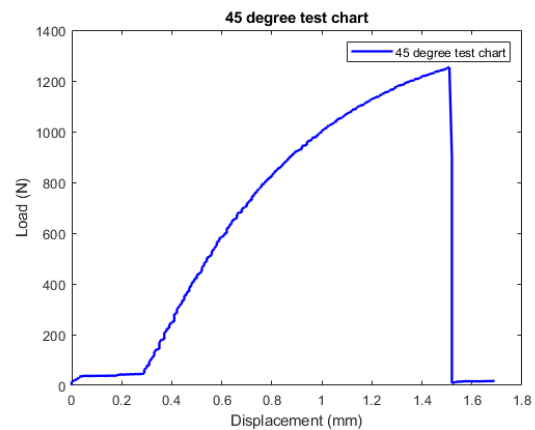


Fig. 18 mixed mode test diagram for samples A, B, C, and E under identical conditions

شکل 18 نمودار آزمون مود ترکیبی انجام شده نمونه‌های A, B, C, E در شرایط یکسان

با توجه به نتایج نمونه تجربی، حداکثر نیرویی که تحت شکست مود ترکیبی (I/II) تحمل می‌کند به‌طور میانگین 36.8 نیوتن شد. تفاوت نمودار C نسبت به نمودار نمونه‌های دیگر نشان‌دهنده وابسته بودن کامپوزیت‌ها به زمان آزمون است. آزمون نمونه C با سرعت پایین‌تر از نمونه‌های دیگر با سرعت 0.2 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد (شکل 19).



(ج-)

Fig. 15 Force-displacement diagram for the sample: a) Along the fibers, b) Perpendicular to the fibers, and c) At a 45-degree angle.

شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه الف) در راستای الیاف، ب) در راستای عمود بر الیاف و ج) در راستای 45 درجه.

صاف بودن ابتدای دو نمودار شکل 15 ب و ج به دلیل پیچ‌خوردگی ناچیز نمونه‌های مورد نظر هنگام آزمون کشش می‌باشد. همانطور که مورد انتظار بود مقاومت نمونه‌ها به ترتیب کشش در راستای صفر، 45 و 90 درجه الیاف از بیشتر به کمتر شد. همچنین، همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت نمونه کامپوزیتی در راستای الیاف که در (شکل 15 الف) نشان داده شده است، خیلی بیشتر از دو حالت 90 درجه و 45 درجه می‌باشد.

جدول 2 خواص مکانیکی بدست آمده از نتایج تجربی [20].

Table 2 Mechanical properties obtained from experimental results [20]

E_{11} (GPa)	19.5
E_{22} (GPa)	3.56
E_{33} (GPa)	3.5
ν_{12}	0.32
ν_{13}	0.32
ν_{23}	0.14
G_{12} (GPa)	2
G_{13} (GPa)	0.9
G_{23} (GPa)	2.6

آزمون مود ترکیبی در 3 مرحله انجام شد، در مرحله اول نمونه‌ای با هدف بررسی مقاومت چسب و فیکسچر MMB انجام شد. این آزمون با این آزمون با دستگاه سنناتم 2 تنی انجام شد، در مرحله دوم آزمون، نمونه با هدف بررسی نمودار نیرو جابه‌جایی و رشد ترک و کالیبره کردن فیکسچر MMB مورد آزمون قرار گرفت. در این آزمون فک بالای فیکسچر را برای رشد بیشتر ترک و تأکید بر غالب بودن مود (I) در فاصله 70 میلی‌متری از لولا قرار داده شد. در مرحله بعد، به ترتیب نمونه‌های A1 و B1 مورد آزمایش قرار گرفت، تمامی ابعاد و اندازه‌ها همانند نمونه‌های قبلی بوده و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. حداکثر نیرو و جابه‌جایی در نمونه A1 به ترتیب 37.9353 نیوتن و 3.413 میلی‌متر و حداکثر نیرو و جابه‌جایی در B1 به ترتیب 36.297 نیوتن و 3.118 میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

جدول 5 تغییرات انرژی شکست در حالت‌های مختلف

Table 5 Variation in fracture energy under different conditions

C	G _{Ic}	G _I	G _{IIc}	G _{II}	G _{Tc}	G _T
85	348	511	5.32	8.25	354	520
30	37.31	55.08	12.9	19.83	50.21	74.91
26.4	18.62	27.28	17.63	27.34	36.25	54.63
20	0.82	1.21	27.49	42.67	28.3	43.8

یکی از عوامل موثر در انرژی شکست، تغییر پارامتر C است. مقدار پارامتر C نشان‌دهنده محل بارگذاری است که می‌تواند تغییر کند. این پارامتر از 30 تا 85 میلی‌متر قابل تغییر بوده و لذا، مقدار انرژی لازم برای رشد ترک می‌بایست با این پارامتر نشان داده شود. لذا، در شکل 20، نمودار R-curve نسبت به تغییرات این پارامتر رسم شده است. لازم به ذکر است که بحرانی‌ترین حالت برای C حداکثر این مقدار یعنی 85 می‌باشد.

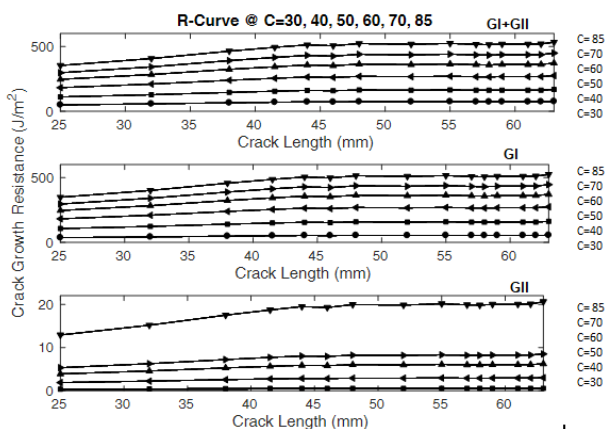


Fig. 20 the fracture energy in fracture modes I and II and the total (II+I) relative to the changes in crack length at different values of C, 85, 70, 60, 50, 40 and 30, respectively.

شکل 20 انرژی شکست در مدهای شکست I و II و مجموع (II+I) نسبت به تغییرات طول ترک در مقادیر مختلف C به ترتیب 85، 70، 60، 50، 40 و 30.

همانطور که در شکل فوق مشخص است، انرژی شکست با افزایش مقدار C، افزایش می‌یابد.

3-1 روش عددی مدل‌سازی رشد ترک در کامپوزیت

در این بخش، با استفاده از روش المان محدود¹، و با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی، خواص مکانیکی ماده شیشه پلی‌پروپیلن، ضرایب شدت تنش ناحیه آسیب نوک ترک، شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از مدل ناحیه چسبیده² برای نمونه شیشه پلی‌پروپیلن محاسبه می‌شود. به همین منظور، ابتدا ابعاد قطعه از جمله طول، عرض، ضخامت و اندازه ناچ طبق استاندارد ASTM D6671 توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس³، که به ترتیب 152، 25، 3 و 25 میلی‌متر در نظر گرفته شد. از آنجایی که ابعاد نمونه‌ی مورد نظر در دو بعد نمونه خیلی بیشتر از ضخامت نمونه بود، شرط تنش صفحه‌ای برقرار است [11]. به منظور محاسبه موارد ذکر شده، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی و تحلیل نمونه استفاده شد، نمونه بصورت پوسته و سه‌بعدی با توجه به ابعاد و اندازه ذکر شده طراحی شد، در ادامه خواص مکانیکی کامپوزیت

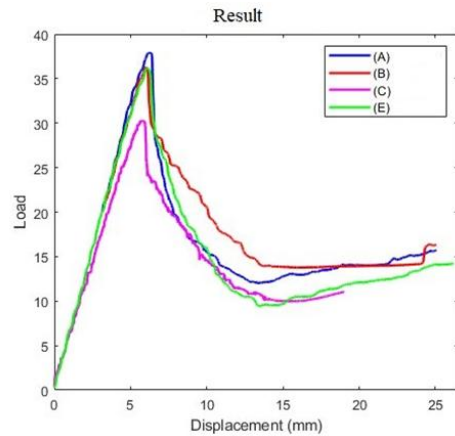


Fig. 19 Comparison of the mixed mode (I/II) test diagrams for samples A, B, C, and E

شکل 19 مقایسه‌ی نمودار آزمون مود ترکیبی (I/II) نمونه‌های A، B، C، E

جدول 3 نتایج حاصل از حل المان محدود را نشان می‌دهد. این آزمون در فاصله‌ی 85 میلی‌متری پارامتر C انجام شده و نتایج آن در جدول 3 آورده شده است. با استفاده از روش المان محدود و تغییر مقدار پارامتر C، نتایج بدست آمده در جدول 4 نشان می‌دهد، با افزایش مقدار C نسبت شکست مود (I) به مود (II) تغییر پیدا می‌کند. این تغییر باعث افزایش مود (I) و کاهش مود (II) می‌شود. همچنین بیشترین نیرویی که نمونه برای شکست تحمل می‌کند کاهش می‌یابد.

جدول 3 نتایج ضریب شدت تنش بدست آمده در مطالعه حاضر

Table 3 Stress intensity factor results obtained in the present study

(MPa√m)	کانتور اول	کانتور دوم	کانتور سوم
K _I	8.488	8.904	8.898
K _{II}	7.548	7.899	7.886

جدول 4 نتایج ضریب شدت تنش حاصل از تغییر پارامتر C به روش عددی

Table 4 Stress intensity factor results obtained from varying parameter C using numerical methods

C(mm)	P _I (N)	P _{II} (N)	کانتور 3	کانتور 2	کانتور 1	(MPa√m)
20	13.38	50.18	0.2302	0.2299	0.2163	K _I
			4.215	4.221	3.969	K _{II}
30	20.07	63.56	1.564	1.564	1.489	K _I
			4.780	4.784	4.520	K _{II}
40	26.76	63.56	2.897	2.899	2.761	K _I
			5.344	5.353	5.070	K _{II}
50	33.45	70.25	4.230	4.233	4.034	K _I
			5.909	5.919	5.621	K _{II}
60	40.14	76.94	5.563	5.567	5.306	K _I
			6.474	6.484	6.171	K _{II}
70	46.83	83.63	6.897	6.901	6.578	K _I
			7.039	7.050	6.722	K _{II}
85	56.78	93.67	8.898	8.904	8.488	K _I
			7.886	7.899	7.548	K _{II}
100	66.90	103.7	10.89	10.90	10.39	K _I
			8.733	8.747	8.373	K _{II}

همچنین، تغییرات انرژی شکست در جدول 5 گزارش شده است.

¹ Finite Element Method (FEM)

² Cohesive Zone Model

³ Abaqus2020

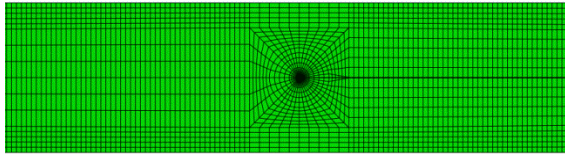


Fig. 23 Type of meshing used in this study

شکل 23 نوع مش‌بندی انجام شده در این تحقیق

نحوه مدل‌سازی و نتایج نمونه کامپوزیتی شیشه پلی‌پروپیلن با در نظر گرفتن ناحیه چسبنده نمونه، در شکل زیر نشان داده می‌شود.

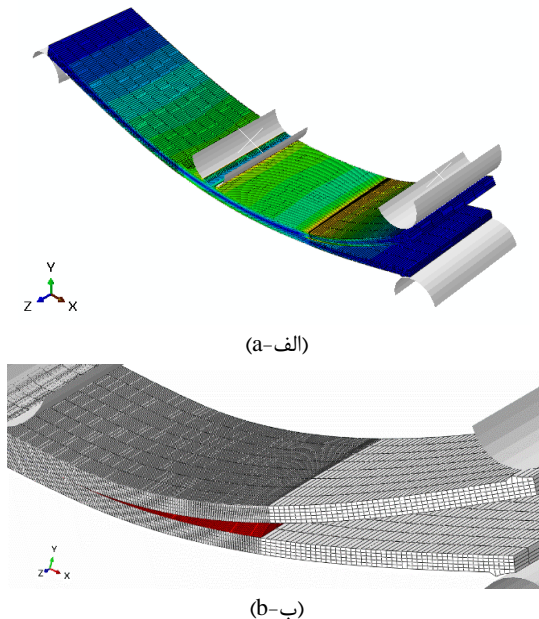


Fig. 24 a) and b) 3D modeling and adhesive zone modeling of the damage area, respectively

شکل 24 الف) و ب) به ترتیب نحوه مدل‌سازی سه‌بعدی و مدل ناحیه چسبنده ناحیه آسیب

4- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی عددی و تجربی خواص مکانیکی و شکست در کامپوزیت الیاف ممتد شیشه پلی‌پروپیلن ساخته شده (به روش پرس گرم) در مود ترکیبی (I/II) پرداخته شد. در این راستا، ابتدا، نمونه‌های شیشه پلی‌پروپیلن ساخته شد. سپس، با توجه به استاندارد ASTM D3039 خواص مکانیکی نمونه‌ها برآورد شد. همچنین، طبق استاندارد ASTM D6671 به صورت تجربی و عددی خواص شکست ماده در مود (I/II) برآورد شد. در روش تجربی فیکسچر MMB ساخته شد و نتایج حاصل شده با نتایج عددی روش المان محدود مورد صحت سنجی قرار گرفت. در این میان، انرژی شکست کامپوزیت شیشه پلی‌پروپیلن با استفاده از آزمون تجربی، روش‌های عددی و تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و کد نویسی متلب در نسبت‌های مختلف شکست مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، هنگامی که مقدار پارامتر C افزایش داده می‌شود نسبت مود (I) به مود (II) افزایش پیدا می‌کند، این امر موجب افزایش انرژی شکست نمونه کامپوزیت گرمانرم شیشه پلی‌پروپیلن می‌شود. همچنین، پدیده پل‌بندی در مقادیر بالای C بیشتر از سایر نمونه‌ها بود.

تعریف شد و یک کامپوزیت به تعداد 10 لایه با ضخامت 0.3 میلی‌متر با جهت الیاف صفر درجه طبق (شکل 21) لایه‌چینی شد. همچنین از حالت المان 8 نودی از نوع $S8r^1$ کوادراتیک استفاده شد.

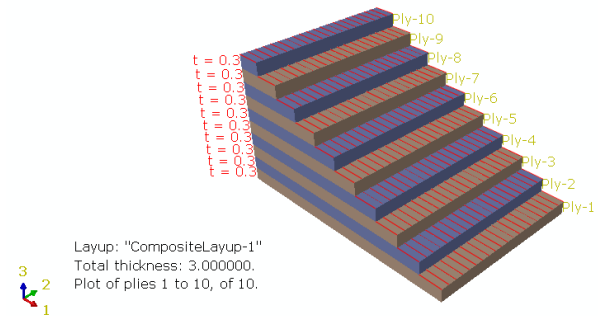


Fig. 21 Glass/polypropylene composite laminates in ABAQUS software
شکل 21 لایه‌چینی کامپوزیت شیشه پلی‌پروپیلن در نرم‌افزار آباکوس

در این مقاله، تعداد المان استفاده شده در این حالت 16015 المان می‌باشد. نوع المان 8 نودی سازه از نوع $S8r^2$ کوادراتیک است. شرایط مرزی و نوع بارگذاری نمونه کامپوزیتی در فیکسچر MMB به صورت شماتیک (شکل 1) در حل المان محدود در نظر گرفته شد. با توجه به شکل زیر، بارگذاری و شرایط مرزی مدل MMB آورده شده است BC_1 در این شبیه‌سازی کاملاً ثابت بود، و BC_2 نیز فقط در راستای مختصات x نمونه حرکتی آزادانه و لغزشی بر روی غلتک داشت. مقادیر نیروی PI و PII نیز مطابق روابط زیر استفاده خواهد شد.

$$P_I = P \left(\frac{c}{L} \right)$$

$$P_{II} = P \left(\frac{c+L}{L} \right) \quad (3)$$

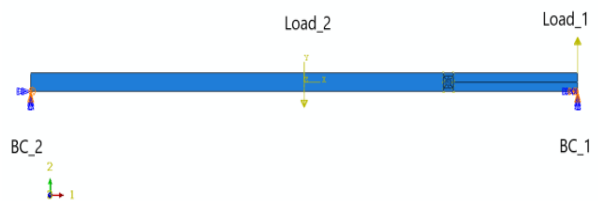


Fig. 22 Type of Loading and Boundary Conditions for Specimens in Mixed-Mode (I/II) Testing

شکل 22 نوع بارگذاری و شرایط مرزی نمونه تحت آزمایش مود ترکیبی (I/II)

به منظور محاسبه ضرایب شدت تنش در اطراف نوک ترک از سه کانتور دایره‌ای استفاده شد. همچنین دو پارتیشن مربعی برای کنترل نظم مش‌ریزی مدل بعد از کانتور دایره‌ای ایجاد شد (شکل 23). از همگرایی المان به منظور صحت سنجی اندازه المان صحیح استفاده شد. همچنین، به دلیل تکینگی نوک ترک، کانتور اول از نوع المان مثلثی در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده در جدول 3 و 4 آورده شده است.

² 8-Node Thick Shell Elements (S8r)

¹ 8-Node Thick Shell Elements (S8r)

- [14] Reeder, J. R., Crews, J., "Redesign of the mixed-mode bending delamination test to reduce nonlinear effects," *Journal of Composites, Technology and Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 12-19, 1992.
- [15] Arouche, M. M., De Freitasb, S. T., De Barrosa, S., "MIXED-MODE FRACTURE OF COMPOSITE-TO-METAL BONDED JOINTS,"
- [16] Fakoor, M., Mehre, N., "Simulation of Orthotropic Damaged Zone Behavior Using Viscoelastic Models," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 401-410, 2016.
- [17] Ganjiani, M., Safarabadi, M., Mehri-Khansari, N., Oruji, H., "Effects of delamination in drilling glass/polyester composite," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 552-567, 2021/04/01 2021.
- [18] Khansari, N. M., Fakoor, M., Berto, F. J. T., Mechanics, A. F., "Probabilistic micromechanical damage model for mixed mode I/II fracture investigation of composite materials," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 99, pp. 177-193, 2019.
- [19] Mehri Khansari, N., Aliha, M. R. M., "Mixed-modes (I/III) fracture of aluminum foam based on micromechanics of damage," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 32, No. 4, pp. 519-548, 2023/04/01 2023.
- [20] Ahmadi, R., Biglari, H., "Presenting the Traction-Separation Law for Ultrasonic Welding of Glass-Fiber Reinforced Polypropylene Composite," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 10, pp. 2429-2456, 2022.

5- فهرست علائم

- a طول ترک (mm)
 a_o طول ترک اولیه (mm)
 b عرض نمونه (mm)
 MMB مود ترکیبی
 C موقعیت بار اعمال شده روی اهرم (mm)
 C_g فاصله اعمال نیروی وزن
 L طول نصف نمونه (mm)
 h نصف ضخامت نمونه
 E_{11} مدول طولی لایه (GPa)
 E_{22} مدول عرضی لایه (GPa)
 E_{33} مدول الاستیک در راستای 3
 K_I, K_{II} ضریب شدت تنش برای مود (I) و (II) ($Mpa\sqrt{m}$)
 P نیرو (N)

6- مراجع

- [1] Ghadami, F., Dadfar, M. R., Zeraati, A. S., "Mixed mode I/II delamination analysis of rubber-modified glass-reinforced epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 17, pp. 1634-1643, 2014/09/01 2014.
- [2] Nunes, J. P., Silva, J. F., Marques, A. T., Crainic, N., Cabral-Fonseca, S., "Production of Powder-Coated Towpregs and Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 16, No. 3, pp. 231-248, 2003/05/01 2003.
- [3] Van Rijswijk, K., Bersee, H., "Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites—An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 3, pp. 666-681, 2007.
- [4] Fakoor, M., Sabour, M., Khansari, N. M., "A new approach for investigation of damage zone properties in orthotropic materials," Vol. 2, No. 4, pp. 283-292, 2014.
- [5] Van Rijswijk, K., Bersee, H. E. N., "Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 3, pp. 666-681, 2007/03/01/ 2007.
- [6] Khansari, N., Farrokhi, A., Mosavi, A. J. E. S. M., "Orthotropic mode II shear test fixture: Iosipesque modification," Vol. 7, No. 2, pp. 93-108, 2019.
- [7] Nunes, J., Silva, J., Marques, A., Crainic, N., Cabral-Fonseca, S., "Production of powder-coated towpregs and composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 16, No. 3, pp. 231-248, 2003.
- [8] McMahon, P., "Developments in Reinforced Plastics—4," *Applied Science*, pp. 1-30, 1984.
- [9] Iyer, S. R., Drzal, L. T., "Manufacture of Powder-Impregnated Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 325-355, 1990/10/01 1990.
- [10] Ghadami, F., Dadfar, M., Zeraati, A. S., "Mixed mode I/II delamination analysis of rubber-modified glass-reinforced epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 17, pp. 1634-1643, 2014.
- [11] Reeder, J. R., Crews Jr, J. H., "Mixed-mode bending method for delamination testing," *AiAA Journal*, Vol. 28, No. 7, pp. 1270-1276, 1990.
- [12] Yum, Y.-J., You, H., "Pure mode I, II and mixed mode interlaminar fracture of graphite/epoxy composite materials," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 20, No. 9, pp. 794-808, 2001.
- [13] Raimondo, A., Urcelay Oca, I., Bisagni, C., "Influence of interface ply orientation on delamination growth in composite laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 27, pp. 3955-3972, 2021.