

Comparative Evaluation of Computational Methods for Determining Mode I Fracture Toughness in Multilayer Composites Reinforced with Glass Nonwoven Fabrics, Based on ASTM D5528 Standard

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors

Simin Ahmadi*

Department of Textile Engineering,
Amir Kabir University of Technology,
Tehran, Iran

Seyed Abolfazl Mirdehghan

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

* Correspondence

siminahmadi@aut.ac.ir

Article History

Received: 01 Jun, 2026

Accepted: 07 Jul, 2026

ePublished: 02 Aug, 2026

ABSTRACT

Delamination is one of the most critical failure mechanisms in multilayer composites, stemming from their low interlaminar fracture toughness. In this study, nonwoven glass fiber interlayers were employed in glass/epoxy composites to enhance Mode I fracture toughness. To this end, composite specimens were fabricated using three types of base fabrics (with areal weights of 200, 400, and 600 g/m²) and two types of interlayers (with areal weights of 150 and 300 g/m²). Subsequently, the double cantilever beam (DCB) test was conducted in accordance with the ASTM D5528 standard, and the critical strain energy release rate (GIC) was calculated using three analytical approaches: Modified Beam Theory (MBT), Compliance Calibration (CC), and Modified Compliance Calibration (MCC).

Statistical analysis of the results revealed that the coefficients of variation for the data obtained via the MBT, CC, and MCC methods were 10%, 30%, and 15%, respectively. Furthermore, a comparison of the results demonstrated favorable agreement and satisfactory accuracy among all three methods in determining Mode I fracture toughness, with the differences in the calculated GIC values assessed to be within a range of 20 to 30 percent. These findings underscore the high efficiency and reliability of these computational methodologies in evaluating the fracture properties of interlayer-reinforced composites.

Keywords: Mode I fracture toughness; glass fiber nonwoven interlayer; double cantilever beam (DCB) test; strain energy release rate.

ارزیابی تطبیقی روش‌های محاسباتی تعیین چقرمگی شکست مود I در کامپوزیت‌های چندلایه تقویت‌شده با منسوجات بی‌بافت شیشه بر مبنای استاندارد ASTM D5528

سیمین احمدی*

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

سید ابوالفضل میردهقان

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

کلیدواژه‌ها

چقرمگی شکست مود اول، میان‌لایه بی‌بافت الیاف شیشه، آزمون تیر دولبه یکسرگردار، نرخ رهائش انرژی کرنشی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

*نویسنده مسئول: siminahmadi@aut.ac.ir

۱ مقدمه

در قلمرو صنایع پیشرفته نساجی و مهندسی مواد، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف^۱ به دلیل برخورداری از ویژگی‌های مکانیکی بی‌نظیر مانند استحکام ویژه بالا، سفتی عالی، وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در شرایط محیطی سخت، جایگاه ویژه‌ای در ساختارهای باربر یافته‌اند[۱]. این مواد به طور گسترده در صنایع استراتژیک از جمله هوافضا، تجهیزات پیشرفته دریایی، خودروسازی و تولید پره‌های توربین‌های بادی به کار گرفته می‌شوند[۲]. با این حال، بزرگ‌ترین چالش ساختاری در کامپوزیت‌های لایه‌ای، به‌ویژه موادی که با ماتریس‌های ترموست شکننده مانند اپوکسی ساخته می‌شوند، ضعف ذاتی آن‌ها در راستای ضخامت (بین‌لایه‌ای) است که منجر به پدیده آسیب‌زای لایه‌لایه‌شدن^۲ یا تورق می‌شود [۳]. این پدیده تحت بارهای کششی خارج از صفحه، ضربه‌های با سرعت پایین یا بارهای خستگی ناشی از نوسانات کاری آغاز شده و به سرعت در میان لایه‌ها پیشروی می‌کند، که نتیجه آن افت شدید سفتی سازه و گسیختگی ناگهانی بدون وجود علائم ظاهری بیرونی است [۴].

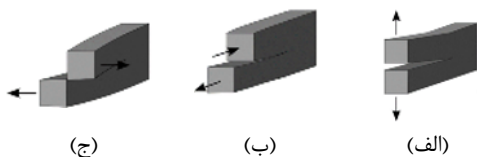
به منظور مهار این گسیختگی بحرانی، روش‌های متعددی نظیر دوخت لایه‌ها در راستای ضخامت^۳، پین‌گذاری^۴ و بافت‌های سه‌بعدی توسعه یافته‌اند. با این حال، اگرچه این روش‌ها مقاومت بین‌لایه‌ای را افزایش

چکیده

پدیده لایه‌لایه‌شدن یکی از بحرانی‌ترین مکانیزم‌های تخریب در کامپوزیت‌های چندلایه است که ریشه در چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای پایین آن‌ها دارد. در این پژوهش، به منظور افزایش چقرمگی شکست مود I، از میان‌لایه‌های بی‌بافت الیاف شیشه در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از سه نوع پارچه زمینه (با گرماژهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع) و دو نوع میان‌لایه (با گرماژهای ۱۵۰ و ۳۰۰ گرم بر مترمربع) ساخته شدند. سپس، آزمون تیر دولبه یکسرگردار مطابق با استاندارد ASTM D5528 انجام گرفت و نرخ رهائش انرژی کرنش بحرانی (GIC) با استفاده از سه رویکرد تحلیلی شامل تئوری تیر اصلاح‌شده (MBT)، روش کالیبراسیون نرمی (CC) و روش کالیبراسیون نرمی اصلاح‌شده (MCC) محاسبه شد. تحلیل آماری نتایج نشان داد که ضریب تغییرات داده‌ها در روش‌های MBT، CC و MCC به ترتیب ۱۰٪، ۳۰٪ و ۱۵٪ است. همچنین، مقایسه نتایج نشان‌دهنده تطابق و دقت مطلوب هر سه روش در تعیین چقرمگی شکست مود I است؛ به‌گونه‌ای که تفاوت مقادیر GIC محاسبه‌شده در بازه ۲۰ تا ۳۰ درصد

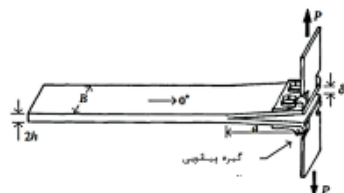
³ Stitching⁴ Z-pinning¹ FRPs² Delamination

به‌طور کلی، سه نوع شکست (مود) در کامپوزیت‌ها قابل مشاهده است که گاه ترکیبی از آنها نیز رخ می‌دهد. این سه مود عبارت‌اند از: مود I (بازشدگی و جدایش)، مود II (برشی و لغزشی) و مود III (پارگی). شکل 1 انواع مدهای شکست را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ۱ حالت‌های مختلف شکست: (الف) حالت: باز شدن، (ب) حالت: II لغزشی، (ج) حالت III: پارگی

در این مطالعه، مود I مورد بررسی قرار گرفته است که در آن، تنش نرمال عمود بر ترک اعمال می‌شود. این آزمون برای تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای¹² مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود. نمایی از نمونه را در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد [۱۴].



شکل ۲ شماتیک نمونه‌ی آزمون تیر یکسرگیردار دولبه

۲ مبانی مکانیک شکست بین لایه‌ای مود I و چارچوب محاسباتی استاندارد ASTM D5528

روش تئوری تیر اصلاح‌شده (MBT¹³)

نرخ رهایی انرژی برای یک تیر یکسر گیردار که در محل ترک کاملاً درگیر شده است برابر است با:

می‌دهند، اما معمولاً به دلیل آسیب رساندن به ساختار الیاف درون صفحه‌ای اصلی، ایجاد مناطق غنی از رزین پیرامون نخ‌های دوخت و تحمیل وزن اضافی و پیچیدگی‌های فرآیندی بالا، با محدودیت‌های صنعتی جدی مواجه هستند [5]. در سال‌های اخیر، تکنیک میان لایه‌گذاری^۵ به عنوان روشی بسیار کارآمد، کم‌هزینه و ساده جهت بهبود چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این تکنیک شامل قرار دادن لایه‌های بسیار نازک اصلاح‌کننده در نواحی مستعد تورق در حین لایه‌چینی کامپوزیت است [۶، ۷].

در میان گزینه‌های گوناگون میان لایه‌گذاری، منسوجات بی‌بافت^۶ به علت ساختار متخلخل و توزیع تصادفی الیاف تک‌رشته‌ای دارند و به آسانی اجازه نفوذ رزین پلیمری را از میان منافذ خود می‌دهند [8]. این منسوجات با حبس و منحرف کردن جبهه ترک، مسیر رشد آن را طولانی‌تر و پریپیچ‌وخم‌تر می‌کنند [9]. استفاده از میان لایه‌های بی‌بافت الیاف شیشه علاوه بر توجیه اقتصادی و در دسترس بودن، پایداری خواص فیزیکی و شیمیایی بسیار مناسبی را با فازهای تقویت‌کننده اصلی در کامپوزیت‌های شیشه/پوکسی برقرار می‌سازد [۱۰].

برای ارزیابی مهندسی و مدل‌سازی رفتار گسیختگی این مواد، تعیین دقیق نرخ رهايش انرژی کرنش بحرانی در مود اول شکست (G_{IC}) که معیاری از مقاومت ماده در برابر بازشدگی لایه‌ها است، اهمیت حیاتی دارد. استاندارد بین‌المللی ASTM D5528 [۱۱] مرجع اصلی برای اجرای آزمون تیر دولبه یکسرگیردار⁷ و استخراج داده‌های مکانیک شکست است. این استاندارد سه رویکرد تحلیلی شامل تئوری تیر اصلاح‌شده⁸، روش کالیبراسیون نرمی^۹ و روش کالیبراسیون نرمی اصلاح‌شده¹⁰ را برای محاسبه G_{IC} معرفی می‌کند [12]. از آنجا که ساختار ناهمگن میان لایه‌ها و پدیده‌هایی نظیر پل زدن الیاف^{۱۱} فرضیات الاستیک کلاسیک را به چالش می‌کشند، نتایج حاصل از این سه متد همواره یکسان نبوده و تفاوت‌های معناداری را نشان می‌دهند. از این رو، ارزیابی تطبیقی و آماری این متدهای محاسباتی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات بی‌بافت شیشه، نقشی کلیدی در افزایش دقت طراحی و اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌های عددی ایفا می‌کند [۱۱].

¹⁰ MCC

¹¹ Fiber Bridging

¹² G_{IC}

¹³ Modified Beam Theory

⁵ Interleaving

⁶ Nonwoven Veils/Mats

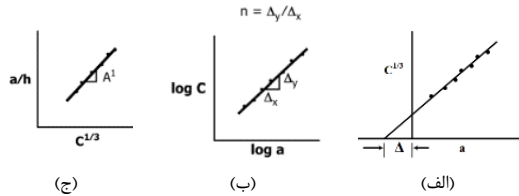
⁷ DCB

⁸ MBT

⁹ CC

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 b h} \quad (4)$$

در شکل ۳ (ج) نشان دهنده همین منحنی است [۱۱].



شکل ۳ (الف) نحوه به دست آوردن عامل تصحیح طول ترک، (ب) منحنی لگاریتم نرمی بر حسب لگاریتم طول ترک در نمونه، (ج) منحنی طول ترک بی بعد شده بر حسب ریشه سوم نرمی

۳ مرور پیشینه پژوهش و تحلیل مکانیزم‌های شکست

در طول دوره پژوهشی اخیر (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶)، تحقیقات گسترده‌ای با تمرکز بر توسعه و بهینه‌سازی میان‌لایه‌های منسوج بی‌بافت جهت غلبه بر ضعف‌های ساختاری کامپوزیت‌های چندلایه انجام شده است. منسوجات بی‌بافت با ایجاد ساختارهای تصادفی سه بعدی، یک منطقه فرآیند شکست چندمقیاسی^{۱۶} را در نوک ترک ایجاد می‌کنند که انرژی شکست را از طریق مکانیزم‌های اتلاف فیزیکی به شدت مستهلک می‌سازد. الیاف کوتاه یا پیوسته موجود در این ساختارها، در حین بازشدگی لایه‌ها تحت آزمون DCB، پل‌های کششی متراکمی را در پشت جبهه ترک تشکیل می‌دهند که مانع از تمرکز تنش و انتشار سریع ترک می‌گردد [۱۵].

تحقیقات نشان می‌دهند که جنس الیاف، نوع بایندر (اتصال‌دهنده الیاف در منسوج) و گرماژ (جرم واحد سطح) منسوج بی‌بافت پارامترهای کلیدی در تعیین چقرمگی شکست نهایی هستند [۷]. برای نمونه، استفاده از میان‌لایه‌های بی‌بافت الیاف پلیمری با استحکام بالا مانند نایلون (PA66) و آرامید منجر به افزایش پایداری و ایجاد منحنی‌های مقاومت شکست صعودی می‌شود [۸]. در مقابل، الیاف کربن در ساختار بی‌بافت به دلیل شکنندگی ذاتی و عدم تمایل به تغییر شکل الاستیک،

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (۱)$$

که P بار اعمال شده، δ جابجایی نقطه بار، b عرض قطعه و a طول ترک است. از آنجا که در واقعیت، تیر در جلوی ترک کاملاً گیردار نیست رابطه فوق منجر به پاسخ‌های غیر واقعی می‌گردد. بنابراین اثر چرخش نوک ترک را با اصلاح طول ترک به اندازه Δ می‌توان در نظر گرفت پس می‌توان نوشت:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (۲)$$

که Δ از ارتفاع خط برازش شده بر داده‌های تجربی در حین رشد ترک با محور افقی در نمودار a و $C^{1/3}$ به دست می‌آید که $C = \frac{\delta}{p}$ می‌باشد. ضریب اصلاح طول ترک جهت بازشدگی و چرخش نوک ترک می‌باشد. شکل ۴ (الف) نحوه به دست آوردن Δ را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

روش کالیبراسیون نرمی (CCM¹⁴)

با دقت در رابطه (۲) مشخص می‌شود هنگامی که تیر به صورت یکسر گیردار باشد، ضریب ۳ در رابطه G_I ظاهر می‌شود؛ اما در واقعیت به دلیل چرخش در جلوی ترک این ضریب عددی کمتر از ۳ است. بدین سان مد یک چقرمگی شکست بین لایه‌ای برابر است با:

$$G_I = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (۳)$$

که n شیب خط برازش شده بر نتایج آزمایشگاهی در مقیاس لگاریتمی $\log\left(\frac{\delta_i}{p_i}\right)$ بر $\log(a_i)$ در آغاز و حین رشد تورق می‌باشد که در شکل ۳ (ب) نمودار آن ارائه شده است.

روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده (MCC¹⁵)

در این روش نمودار طول ترک بی‌بعد شده با ضخامت قطعه (a/h) را بر حسب ریشه سوم نرمی $C^{1/3}$ رسم کرده و خطی را بر آن برازش می‌شود. اگر شیب خط A، باشد چقرمگی شکست بین لایه‌ای برابر است با:

¹⁶ Multiscale Fracture Process Zone

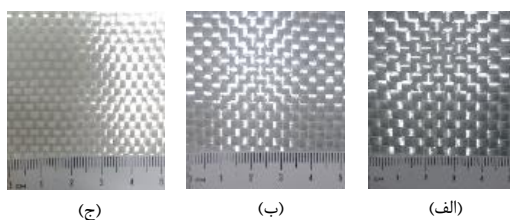
¹⁴ Compliance Calibration Method

¹⁵ Modified Compliance Calibration

۴ تجربیات

۴-۱ مواد و روش‌ها

در این مطالعه، سه نوع پارچه شیشه‌ای E-glass با بافت تافته و در سه وزن گوناگون ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع به کار گرفته شد. تصاویر این پارچه‌ها در شکل ۴ آمده است. این پارچه تار پودی دارای تراکم برابر هستند. جدول ۲ نیز به ارائه خواص فیزیکی و مکانیکی این پارچه‌ها می‌پردازد.



شکل ۴ سه نوع پارچه شیشه با بافت تافته: (الف) 200 g/m^2 ، (ب) 400 g/m^2 ، (ج) 600 g/m^2

جدول ۲ خواص پارچه‌ی تار پودی شیشه

خواص	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
g/m^2	g/m^2	g/m^2	g/m^2
تراکم نخ تار و پود ۱ (/cm)	۵	۴	۳
جرم واحد سطح (g/m^2)	۲۱۵	۳۹۵.۶	۵۹۲.۸
ضخامت پارچه (mm)	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۶۱
نمره روینگ شیشه (Tex)	۳۰۰	۵۹۵	۱۲۳۰
قطر الیاف (μm)	۱۱	۱۳	۱۷
بیشینه استحکام (N)	۱۳۰۰	۲۵۰۰	۴۰۰۰

در این مطالعه، از دو نوع پارچه بی‌بافت (مت) شیشه E-glass در گرماژهای ۱۵۰ و ۳۰۰ گرم بر مترمربع بهره‌گیری شد. تصاویر این پارچه‌ها در شکل ۵ قابل مشاهده است و جدول ۳ خلاصه‌ای از خواص آن‌ها را ارائه می‌کند.

ضعیف‌ترین عملکرد را در بهبود چقرمگی شکست مود I نشان می‌دهند و حتی در مواردی باعث افت خواص چقرمگی شکست آغازین می‌گردند [۱۶].

یکی از جدیدترین رویکردها در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف هیبریدی درون‌صفحه‌ای یا میان‌لایه‌ای است. با تلفیق الیاف انعطاف‌پذیر (همچون الیاف ترموپلاستیک PPS یا پلی‌پروپیلن) (با الیاف با سفتی بالا (کربن یا شیشه) در ساختار منسوج بی‌بافت، نواقص الیاف منفرد به طور هم‌افزا برطرف می‌شود. این الیاف هیبریدی مسیر ترک را در محدوده بین‌لایه‌ای محدود نگه‌داشته و مانع از مهاجرت ترک به درون لایه‌های اصلی تقویت‌کننده می‌شوند. علاوه بر این، پوشش‌دهی سطحی منسوج بی‌بافت با ذرات نانومقیاس نظیر نانولوله‌های کربنی (CNTs) یا ذرات لاستیکی هسته-پوسته (CSR) مکانیزم‌های اتلاف انرژی مهاربندی نانومقیاس (Nano-anchoring) و تسلیم پلاستیک موضعی ماتریس را فعال می‌کند که چقرمگی شکست را تا بیش از دو برابر ارتقا می‌دهد. جدول ۱ برترین دستاوردهای علمی در حوزه به‌کارگیری منسوجات بی‌بافت گوناگون در بهبود چقرمگی شکست را خلاصه کرده است [2, 7, 17].

جدول ۱ خلاصه پیشرفت‌های تجربی اخیر (۲۰۲۶-۲۰۲۰) در بهبود

چقرمگی شکست مود اول لایه‌ای با میان‌لایه‌های بی‌بافت

نوع میان‌لایه بی‌بافت	گرماژ میان‌لایه (g/m^2)	تأثیر بر چقرمگی شکست مود اول (G_{Ic})
الیاف شیشه (E-Glass)	۱۵۰ و ۳۰۰	افزایش ۲۰.۱۲ تا ۱۲.۶۰ برابری G_{Ic} وابسته به وزن پارچه پایه
پلی‌پروپیلن (Spunbond PP)	۴۰ الی ۹۰	بهبود ۷۸ درصدی G_{Ic} در نمونه بهینه GSM۷۰
آرامید (Nylon/Aramid)	۸.۵	افزایش ۷۲ درصدی چقرمگی در مرحله انتشار ترک
نایلون (PA66)	۹ الی ۱۵	بهبود ۱۵۶ درصدی در گرماژ بهینه GSM ۴۵

نام نمونه	ساختار لایه چینی
P200	۴ لایه پارچه تافته با وزن 200 g/m^2
P200 M150	۴ لایه پارچه تافته با وزن 200 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 150 g/m^2
P200 M300	۴ لایه پارچه تافته با وزن 200 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 300 g/m^2
P400	۴ لایه پارچه تافته با وزن 400 g/m^2
P400 M150	۴ لایه پارچه تافته با وزن 400 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 150 g/m^2
P400 M300	۴ لایه پارچه تافته با وزن 400 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 300 g/m^2
P600	۴ لایه پارچه تافته با وزن 600 g/m^2
P600 M150	۴ لایه پارچه تافته با وزن 600 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 150 g/m^2
P600 M300	۴ لایه پارچه تافته با وزن 600 g/m^2 ۳ میان لایه بی بافت با وزن 300 g/m^2

۴-۲ فرایند ساخت کامپوزیت‌ها

جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه گذاری دستی استفاده شده، این روش ساخت به طور کلی شامل چیدن لایه‌های پارچه تافته و بی بافت شیشه در تعداد مورد نیاز و سپس آغشته سازی آن با رزین بوده و در نهایت قرار دادن وزنه، برای حذف رزین اضافی و خارج کردن حباب هوا می باشد. برای ساخت از یک صفحه شیشه‌ای به عنوان قالب استفاده شد سطح شیشه با ماده رها ساز (واکس) پوشانده شد که در شکل 6 (الف) نمایش داده شده‌اند. سپس پارچه‌ها به ابعاد مناسب و تعداد مورد نیاز برش داده شد. برای جلوگیری از جابه جایی نخ‌های تار و پود، قبل از برش پارچه‌ها، دور تا دور آن با چسب کاغذی مطابق شکل 6 (ب) ثابت شد. با توجه به استاندارد ASTM D5528 [۱۸] آزمون تیر یکسرگیردار دولبه برای ساخت نمونه لازم است که یک پیش ترک در نمونه ایجاد شود، به همین جهت از یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۱۳ میکرون استفاده شده‌است. هر دو سمت ورق آلومینیومی را با واکس پوشش داده تا از چسبیدن به سایر لایه‌ها جلوگیری شوند. در شکل 6 (ج) نحوه‌ی لایه چینی و محل قرارگیری ورق آلومینیومی را نشان داده است. برای تهیه نمونه‌ها، ابتدا یک لایه پارچه داکرون بر روی قالب قرار داده می شود تا از صیقلی شدن سطح نمونه جلوگیری شود و سپس لایه چینی (به صورتی که میان لایه بی بافت بین هر ۲



(ب)



(الف)

شکل ۵ مقایسه ۲ نوع پارچه بی بافت شیشه: (الف) ۳۰۰ گرم بر مترمربع، (ب) ۱۵۰ گرم بر مترمربع

جدول ۳ خواص فیزیکی پارچه‌های بی بافت شیشه

ویژگی	$150 \text{ (g/m}^2\text{)}$	$300 \text{ (g/m}^2\text{)}$
ضخامت پارچه (mm)	۰/۳۵	۰/۶۲
میانگین طول الیاف در لایه بی بافت	۴/۵	۴/۵

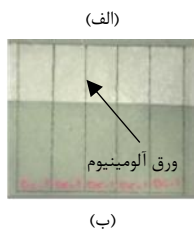
در این مطالعه، از رزین اپوکسی ۸۲۸ KER به همراه سخت کننده اختصاصی آن استفاده شد. جهت تهیه رزین، ۱۰ درصد وزنی سخت کننده با ۱۰۰ درصد وزنی رزین مخلوط و به طور کامل هم زده شد. خواص رزین و سخت کننده در جدول 4 ارائه شده است.

جدول ۴ خواص فیزیکی رزین اپوکسی و سخت کننده

ماتریس	استحکام کششی	ژل تایم	چگالی در	ویسکوزیته در
رزین 828 ¹⁷ KER	۶۰ (MPa)	۴۵ (دقیقه)	۱/۱۶ (g/cm ³)	۱۲-۱۴ (pa.s)

در این پژوهش نام نمونه‌ها بر اساس نوع پارچه و وزن آن انجام و در جدول 5 ذکر شده است. لازم به ذکر است حرف P معرف پارچه‌ی Plain و حرف M معرف پارچه‌ی بی بافت الیاف شیشه و همچنین اعداد بیان شده در جلوی حروف فوق معرف وزن پارچه Plain و بی بافت می باشد.

جدول ۵ شرح نام گذاری نمونه‌ها



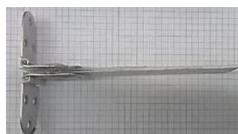
(الف)

شکل ۷ نمونه‌ی آزمون تیر یکسر گیردار قبل و بعد از برش

در نهایت مرحله‌ی آخر آماده سازی نمونه‌ها چسباندن لولاها به نمونه‌ها جهت قرارگیری در دستگاه آزمون می‌باشد. برای چسبندگی بهتر و جدا نشدن کامپوزیت از لولا، سطح لولاها سمباده کاری شد تا چسبندگی در سطح تماس لولا و کامپوزیت بهبود یافته و همچنین از سر خوردن لولا در گیره‌ی دستگاه آزمون جلوگیری شود. نمونه‌ی نهایی آماده شده در شکل ۸ نمایش داده شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ۸ (الف) نمونه‌ها قبل از چسباندن به لولا، (ب) نمونه نهایی آزمون تیریکسر گیردار دولبه

در این آزمایش از هر نمونه ۳ تکرار در نظر گرفته شد. ویژگی نمونه‌های ساخته شده در جدول ۷ ذکر شده‌است. مطابق استاندارد ASTM D5528 ضخامت نمونه‌ها باید در بازه ۲-۵ میلی‌متر باشد که با توجه به فرایند تولید لایه گذاری دستی امکان کنترل دقیق ضخامت نیست. با توجه به ضخامت پارچه‌های مورد استفاده در هر کدام از انواع لایه چینی ضخامت نهایی به دلیل رزین بین لایه ای کامپوزیت افزایش یافته است.

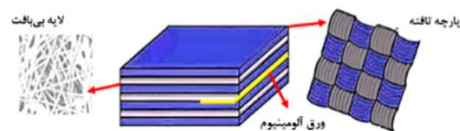
لایه پارچه قرار گرفته) انجام می‌شود. به منظور خروج رزین اضافی و پخت تحت فشار، بر روی قالب بالایی، وزنه‌های از قبل آماده شده قرار می‌گیرد. نمونه‌ها در این شرایط باقی مانده و بعد از ۷۲ ساعت که پخت نمونه‌ها در شرایط محیطی انجام شد، از قالب خارج شده و برای برش آماده می‌شوند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹ (الف) قالب شیشه‌ای، (ب) برش پارچه‌ها و (ج) شماتیک لایه چینی و ورق آلومینیوم برای آزمون تیر یکسر گیردار

پس از ساخت نمونه‌ی اصلی لازم است تا نمونه به ابعاد استاندارد جهت انجام آزمون برش داده شود. ابعاد مورد نظر در جدول ۶ ذکر شده‌است که طول نمونه ۱۲۵ میلی‌متر و طول ترک اولیه ۵۰ میلی‌متر و عرض ۲۵ میلی‌متر بوده که در شکل ۷ نمونه قبل و بعد از برش نشان داده است.

جدول ۶ ابعاد نمونه آزمون تیریکسر گیردار دولبه

طول نمونه	ضخامت نمونه	عرض نمونه	طول ترک اولیه	آزمون
L (mm)	2h (mm)	B (mm)	a ₀ (mm)	
۱۲۵	۲-۵	۲۵	۵۰	DCB-TEST



نمونه را در داخل فک دستگاه قرار داده و مقدار جابه‌جایی و نیرو را کالیبره کرده و سرعت حرکت برابر با ۵ میلی‌متر بر دقیقه و مقدار جابه‌جایی فک را ۱۰۰ میلی‌متر تنظیم کرده و آزمایش انجام داده شد. در شکل ۱۰ نحوه قرارگیری نمونه در فک و پیشروی ترک نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ نحوه قرار گرفتن نمونه در فیکسچر: (الف) و (ب) نمونه پس از بازشدگی ابتدایی از دو نمای مختلف (ج) رشد ترک و نحوه بل زدن الیاف

۵ بحث و نتایج

۵-۱ نتایج برحسب تئوری تیر اصلاح‌شده

(MBT)

برای محاسبه میزان چقرمگی شکست مود یک از نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها استفاده می‌شود. آزمایش را طبق شرایط استاندارد با سرعت یکسان در نمونه‌ها انجام شد و میزان جابه‌جایی دهانه‌ی نمونه توسط دستگاه ارائه گردید و برای

جدول ۷ مشخصات نمونه آزمون تیریکسرگیردار دولبه

نمونه	ضخامت (mm)	CV%	وزن (gr)	CV%
P200	۱.۸	۰.۸۹	۴.۸۴۶	۱.۲
P200 M150	۲.۳۲	۱.۲۴	۶.۷۹۶	۱.۴
P200 M300	۳.۰۶	۱.۰۷	۱۱.۴۱۱	۱.۳
P400	۲.۴۱	۱.۴۶	۷.۵۱۰	۱.۶
P400 M150	۲.۸۴	۲.۰	۱۱.۳۷۲	۲.۴
P400 M300	۳.۴۷	۰.۶۴	۱۳.۸۰	۱.۶
P600	۳.۲۵	۲.۵۸	۱۰.۵۹۱	۱.۹
P600 M150	۴.۲۷	۱.۶۷	۱۴.۶۷۸	۱.۳
P600 M300	۵.۰۲	۱.۹۱	۱۸.۴۱۲	۱.۵

۴-۳ آزمون تیر یکسر گیردار دولبه (چقرمگی شکست در مود I)

آزمایش چقرمگی شکست در مود I، شامل قرار دادن یک نمونه «پیش ترک‌خورده»^{۱۸} در معرض نیروی لایه برداری^{۱۹} است تا زمانی که ترک ایجاد شود. برای انجام آزمایش مد I چقرمگی شکست بین لایه‌ای در قطعات کامپوزیتی، مطابق استاندارد ASTM D5528 [۱۱] لازم است تا سه کمیت نیرو، جابجایی محل اعمال نیرو و طول ترک به‌طور هم‌زمان در هنگام شروع و رشد تورق ثبت گردد. لایه‌های نمونه توسط دستگاه کشش از یکدیگر جدا می‌شوند. در این تحقیق از دستگاه کشش این سترون موجود در دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده که در شکل ۹ نشان داده شده‌است.

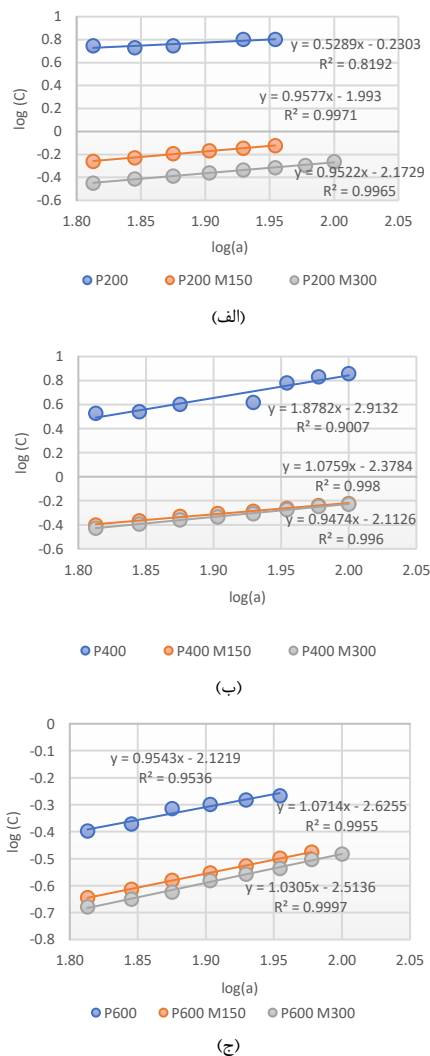


شکل ۹ دستگاه اینسترون و فک‌های آن برای آزمایش چقرمگی شکست مود I

¹⁹ Peeling force

¹⁸ Precracked

شیب به‌دست آمده مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را طبق رابطه (۳) به‌دست آورده که مقادیر و نمودار آن در شکل ۱۲ ارائه گردیده‌است.

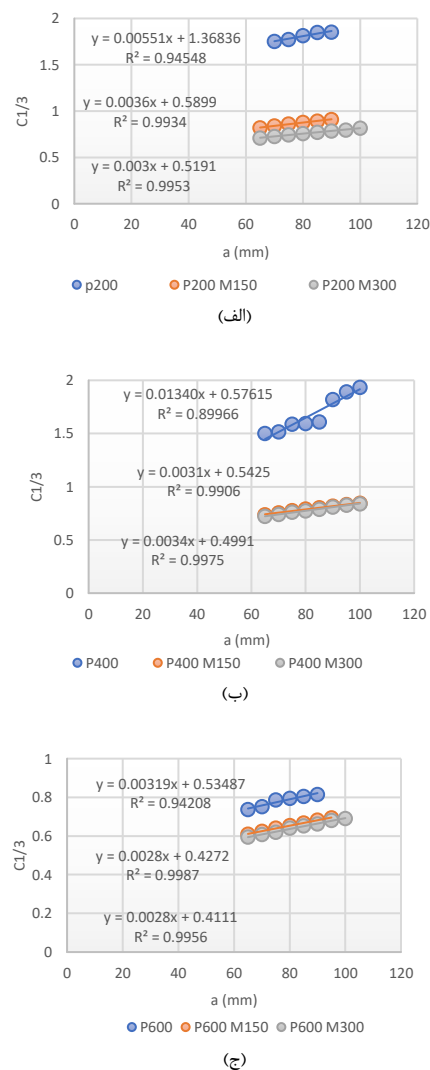


شکل ۱۲ منحنی لگاریتمی نرمی (c) برحسب لگاریتم طول جدایش بین لایه‌ای (a)

۵-۳ نتایج برحسب روش کالیبراسیون نرمی اصلاح‌شده (MCC)

دلیل بی‌بعد کردن طول ترک بر حسب ضخامت نمونه در روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده برای محاسبه چقرمگی شکست نمونه، حذف وابستگی به هندسه نمونه، استانداردسازی نتایج و تفسیر آسان‌تر نتایج انجام‌می‌شود. نمودارهای این روش برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۱۳ ارائه گردید.

هر نمونه نمودارهای زیر رسم گردید. در نمونه‌ها با افزودن تقویت‌کننده بی‌بافت در ساختمان کامپوزیت میزان شیب نمودار کاهش یافته که نشان دهنده‌ی مقدار نیروی وارده جهت کشش بر حسب جابه‌جایی انجام شده فک دستگاه کاهش یافته و می‌توان مقدار Δ را محاسبه نمود. نمودارها در شکل ۱۱ ارائه گردیده‌است.

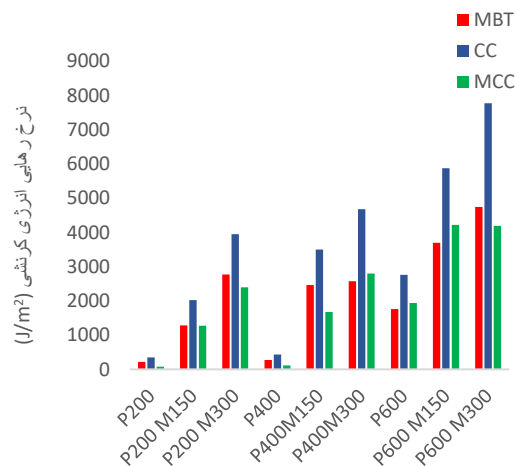


شکل ۱۱ منحنی ریشه سوم نرمی $C^{1/3}$ برحسب طول جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها

۵-۲ نتایج برحسب روش کالیبراسیون نرمی (CC)

شیب خط برازش شده بر نتایج آزمایشگاهی در مقیاس لگاریتمی را محاسبه کرده و برای تمام نمونه‌ها نمودار آن رسم گردید با استفاده از

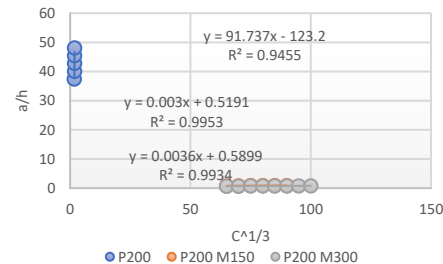
- روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده در برخی موارد، مقادیر GIC مشابه روش تئوری تیر اصلاح شده را نشان می‌دهد، اما در موارد دیگر، مقادیر بالاتر یا پایین تر را نشان می‌دهد.
 - انتخاب روش محاسباتی مناسب:
 - روش تئوری تیر اصلاح شده به دلیل سادگی، کارایی و ارائه مقادیر GIC محافظه کارانه و ضریب تغییرات کمتر به طور کلی روش مناسبی برای اکثر کاربردها است.
 - روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده در مواردی که نیاز به دقت بیشتر است، مانند نمونه‌های با هندسه پیچیده یا مواد غیرمعمول، می‌توانند مفید باشند.
- با توجه به دلایل ذکر شده ادامه‌ی محاسبات را بر حسب روش تئوری تیر اصلاح شده انجام شده است.



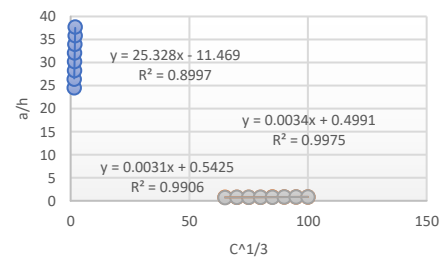
شکل ۱۴ مقایسه‌ی مقدار رهایی انرژی کرنشی سه روش تئوری تیر اصلاح شده، روش کالیبراسیون نرمی و روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده

۶ مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی

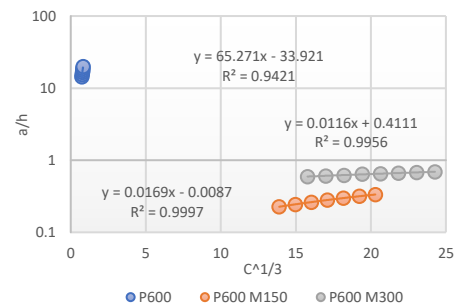
رابطه بین نیروی اعمال شده و جابجایی انجام شده برای باز کردن ترک برای لایه‌های کامپوزیت تولید شده از پارچه تقویت کننده شیشه با بافت تافته (۲۰۰ گرم بر مترمربع، ۴۰۰ گرم بر مترمربع و ۶۰۰ گرم بر مترمربع) تقویت شده با میان لایه بی‌بافت (۱۵۰ گرم بر مترمربع و ۳۰۰



(الف)



(ب)



(ج)

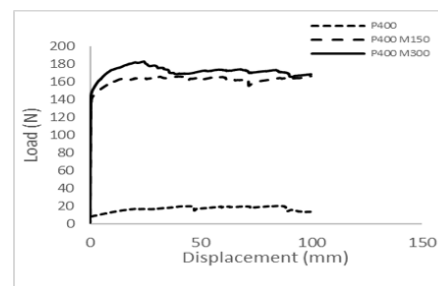
شکل ۱۳ منحنی ترک بدون بعد (a/h) بر حسب ریشه سوم نرمی $C^{1/3}$

در نهایت در شکل ۱۴ مقایسه‌ی کل از هر ۳ روش محاسباتی برای تمام نمونه‌ها ارائه گردیده است.

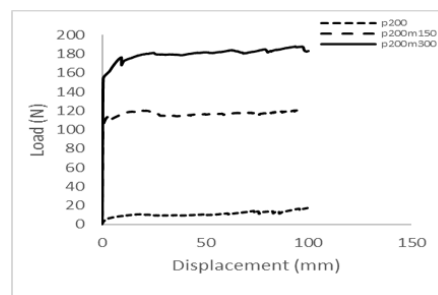
مقایسه روش‌ها:

- به طور کلی، روش تئوری تیر اصلاح شده مقادیر GIC محافظه کارانه‌تری را نسبت به روش‌های کالیبراسیون نرمی و روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده نشان می‌دهد.
- روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده مقادیر GIC بالاتر از روش تئوری تیر اصلاح شده را نشان می‌دهد، که نشان دهنده عدم قطعیت بیشتر در این روش است.

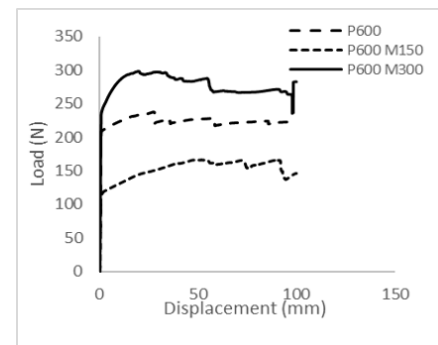
گرم بر مترمربع) در نمودارهای شکل ۱۵ ترسیم شده‌است. با توجه به‌شکل، می‌توان دریافت که نیروی لازم برای انتشار ترک در نمونه‌های فاقد میان‌لایه (نمونه شاهد) به‌مراتب از نمونه‌های دارای میان‌لایه بی‌بافت کم‌تر است. از طرف دیگر شیب اولیه نمودار برای نمونه‌های دارای میان‌لایه بی‌بافت نسبت به نمونه دارای میان‌لایه قابل‌توجه می‌باشد. نمودارهای نیرو-جابجایی دارای روندی مشابه با یکدیگر می‌باشند. در ابتدای آزمایش، چسبندگی بین دو لایه نمونه تقریباً بالا می‌باشد. این موضوع باعث ایجاد مقاومت لایه بی‌بافت اولیه در برابر جابجایی می‌شود. با افزایش نیرو، دو لایه نمونه از یکدیگر فاصله گرفته و ترک در نمونه ایجاد شده‌است. شیب زیاد در ابتدای نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش DCB (تیر یکسرگیردار دولبه) به‌دلیل مقاومت در برابر انتشار ترک است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵ نمودار رفتار نیرو-جابجایی نمونه‌ها در آزمون تیر یکسرگیردار دولبه (الف) نمونه‌ها با لایه تقویت‌کننده P200، (ب) نمونه‌ها با لایه تقویت‌کننده P400، (ج) نمونه‌ها با لایه تقویت‌کننده P400

مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی که بیانگر انرژی کل جذب‌شده برای پیشروی ترک در فرآیند شکست است در جدول ۸ محاسبه و ارایه شده، نشان می‌دهد که افزودن میان‌لایه‌های بی‌بافت نقش بسیار حیاتی در استهلاک انرژی ایفا می‌کند. نتایج حاکی از آن است که قرارگیری میان‌لایه‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ گرمی به عنوان یک مانع فیزیکی قوی عمل کرده و انرژی لازم برای باز شدن لایه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. بیشترین جهش نسبی در مقاومت کامپوزیت، در نمونه‌های سبک‌تر مشاهده می‌شود؛ به طوری که پارچه پایه P200 در حالت ساده تنها ۱۱۰۱ ژول انرژی جذب می‌کند، اما با افزودن میان‌لایه M300 این مقدار به ۱۷۹۴۴ ژول می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش بیش از ۱۶ برابری است و ثابت می‌کند میان‌لایه می‌تواند ضعف ذاتی پارچه‌های سبک را به طور کامل پوشش دهد. از سوی دیگر، با افزایش گرماژ پارچه پایه به P600، مقاومت اولیه کامپوزیت نیز بالا می‌رود و در نهایت ترکیب این پارچه با میان‌لایه ۳۰۰ گرمی در نمونه P600M300، بالاترین سطح انرژی مستهلک‌شده در کل آزمایش را با مقدار چشمگیر ۲۹۲۱۲ ژول ثبت می‌کند. بررسی روند کلی داده‌ها مشخص می‌کند که ارتقای گرماژ میان‌لایه از ۱۵۰ به ۳۰۰ گرم بر متر مربع در تمامی گروه‌ها باعث افزایش مستمر مساحت زیر نمودار می‌شود، زیرا تراکم بیشتر الیاف درگیری فیزیکی بیشتری به همراه دارد. این مقادیر کمی به وضوح تایید می‌کنند که مکانیزم‌هایی مانند «پل‌زدن الیاف» که توسط منسوج بی‌بافت در پشت جبهه ترک ایجاد می‌شوند، فوق‌العاده مؤثر بوده و با ایجاد مسیری پرپیچ‌وخم برای رشد ترک، انرژی کرنشی را پیش از وقوع گسیختگی نهایی به طور کامل مستهلک می‌سازند.

جدول ۸ مشخصات نمونه آزمون تیریکسرگیردار دولبه

نمونه	مساحت زیر سطح نمودار نیرو- جابه جایی (J)
P200	۱۱۰۱
P200M150	۱۱۰۷۴
P200M300	۱۷۹۴۴
P400	۱۷۰۹
P400M150	۱۶۲۰۹

محافظه کارانه تری از G_{Ic} به دست آورد. بنابراین، روش کاهش داده روش تئوری تیر اصلاح شده توصیه می شود.

در میان روش های پیشنهادی جهت محاسبه چقرمگی شکست مود I روش تئوری تیر اصلاح شده به عنوان روش منتخب مبنای عمل قرار گرفت. نتایج آزمون تیر یکسر گیردار نشان داد:

- در نمونه های P200 M150, P200 M300 با توجه به افزودن میان لایه ی بی بافت نسبت به نمونه ی P200، به ترتیب مقدار چقرمگی شکست مود I $86/5$ و $12/60$ برابر افزایش یافته است.
- در نمونه های P400 M150, P400 M300 با توجه به افزودن میان لایه ی بی بافت نسبت به نمونه P400، به ترتیب مقدار چقرمگی شکست مود I $55/9$ و $9/14$ برابر افزایش یافته است.
- در نمونه ها P600 M150, P600 M300 با توجه به افزودن میان لایه ی بی بافت نسبت به نمونه ی P600، به ترتیب مقدار چقرمگی شکست مود I $12/2$ و $2/80$ برابر افزایش یافته است.

P400M300	۱۷۱۹۵
P600	۱۸۸۵۸
P600M150	۲۲۲۷۳
P600M300	۲۹۲۱۲

۷ نتیجه گیری

تورق، یکی از متداول ترین انواع خرابی در مواد مرکب، به طور قابل توجهی بر خواص آنها، از جمله استحکام و سفتی، اثر منفی می گذارد. این پژوهش به بررسی تأثیر وجود میان لایه بی بافت بر چقرمگی شکست مود I در کامپوزیت چندلایه شیشه/ اپوکسی و علاوه بر آن سه روش محاسباتی چقرمگی شکست مود یک بر اساس استاندارد ASTM D5528 می پردازد. همان طور که قبلاً ذکر شد، استاندارد ASTM D5528 سه روش محاسباتی برای تعیین چقرمگی شکست مود I در مواد کامپوزیت ارائه می دهد:

- روش تئوری پرتو اصلاح شده
- روش کالیبراسیون نرمی
- روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده
-

مطابق با آنچه که در استاندارد ذکر شده است هیچ یک از این سه روش به طور واضح بر دیگری برتری نداشت. با این حال، روش روش تئوری تیر اصلاح شده برای ۸۰ درصد نمونه های آزمایش شده، مقادیر

منابع

- [1] H. Dalfi, P. Potluri, K. Jan, and E. Selver, "Improving the fracture toughness of glass/epoxy laminates through intra-yarns hybridisation," *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part I: journal of materials: design and applications*, vol. 236, no. 9, pp. 1750-1763, 2022.
- [2] V. S. Uppin, P. S. Gouda, I. Sridhar, M. Umarfarooq, and A. Edacherian, "Effects of carbon/glass nonwoven interleaving veils and their areal density on opening and shearing mode interlaminar fracture toughness of glass epoxy composites," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 130, p. 104292, 2024.
- [3] S. M. Aldosari *et al.*, "Mechanical recycling of carbon fiber-reinforced polymer in a circular economy," *Polymers*, vol. 16, no. 10, p. 1363, 2024.
- [4] S. M. R. Madhu Puttegowda, Suchart Siengchin, *Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Elsevier Science, 2025, 2025.
- [5] M. R. Hosseini, F. Taheri-Behrooz, and M. Salamat-talab, "Mode I interlaminar fracture toughness of woven glass/epoxy composites with mat layers at delamination interface," *Polymer Testing*, vol. 78, p. 105943, 2019.
- [6] Y. Wang, Z. Wang, and L. Zhu, "A Short Review of Recent Progress in Improving the Fracture Toughness of FRP Composites Using Short Fibers," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, p. 6215, 2022.
- [7] V. Uppin, S. Gouda, I. Sridhar, U. MA, A. Muddebihal, and A. Edacherian, "Interleaving Carbon-Glass veil in glass epoxy composite for improved mode-I fracture toughness-A hybrid approach," *Fracture and Structural Integrity*, vol. 18, no. 68, pp. 127-139, 2024.
- [8] V. A. Ramirez, P. J. Hogg, and W. W. Sampson, "The influence of the nonwoven veil architectures on interlaminar fracture toughness of interleaved composites,"

- [9] M. Kuwata and P. Hogg, "Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 1. Mode-I testing," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 10, pp. 1551-1559, 2011.
- [10] S. Ahmadi, S. A. Mirdehghan, and S. M. H. Varkiani, "Investigation of Mode I and Mode II Fracture Toughness in Glass/Epoxy Composites Reinforced with Nonwoven Glass Interlayer," *Fibers and Polymers*, vol. 27, no. 1, pp. 397-413, 2026.
- [11] *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, A. D5528-01.
- [12] E. Tahtalı and E. Selver, "The effect of nonwoven reinforcement on flexural strength of glass, carbon and hybrid composites," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 31, no. 136, pp. 201-210, 2024.
- [13] G. Cricri and M. Perrella, "A fracture toughness identification method for the debonding test of DCB specimens accounting for three-dimensional effects," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 315, p. 113350, 2025.
- [14] P. E. Caltagirone, D. Cousins, D. Snowberg, and D. Stebner, "DETERMINING MODE I FRACTURE TOUGHNESS OF ADHESIVE COMPOSITE JOINTS: AUTONOMOUS CRACK TRACKING USING MATLAB DEVELOPED PROGRAM," 2020.
- [15] S. Wang, M. Akbolat, K. Katnam, Z. Zou, P. Potluri, and J. Taylor, "On the interlaminar fracture behavior of carbon/epoxy laminates interleaved with fiber-hybrid non-woven veils," *Polymer Composites*, vol. 45, no. 4, pp. 3315-3326, 2024.
- [16] Z. Ali, J. Schmidt, J. Kaufmann, and H. Cebulla, "Influence of nonwoven interleave layer on interlaminar fracture of sandwich-structured composites," *Technologies for Lightweight Structures (TLS)*, vol. 5, no. 1, pp. 78-86, 2021.
- [17] M. Kuwata and P. Hogg, "Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 2. Mode-II testing," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 10, pp. 1560-1570, 2011.
- [18] Carlsson, L.A., Adams, D.F., & Pipes, R.B. (2014). *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials* (4th ed.). CRC Press.