



Investigation the Effect of Loading Rates on Fracture Toughness of Loading Mode I in Glass/Epoxy Composite Laminates by Acoustic Emission

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Habibi M.¹ MSc,
Yousefi J.¹ MS,
Ahmadi-Najafabadi M.*¹ PhD

How to cite this article

Habibi M, Yousefi J, Ahmadi-Najafabadi M. Investigation the Effect of Loading Rates on Fracture Toughness of Loading Mode I in Glass/Epoxy Composite Laminates by Acoustic Emission. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2917-2925.

¹Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
ahmadin@aut.ac.ir

Article History

Received: December 19, 2018
Accepted: February 12, 2019
ePublished: December 21, 2019

ABSTRACT

Delamination or interlayer cracking is one of the most important imperfections in composite materials. The existence of this defect in a structure reduces the strength and, as a result, disables the structure. To analyze the effective factors in interlayer separation, it is necessary to analyze the effective loading parameters. In this paper, the effect of the change in loading rate on the failure mechanism in I failure mode was analyzed using an acoustic emission for unidirectional samples made of glass fiber/epoxy resin. At first composite, samples were made according to standard and placed at different rates of displacement under loading. Force data, displacement and crack growth rate for different loading rates were used to calculate the exact strain energy release rate. In addition to the extensometer, the Dino camera was used. In this paper, a high-reliability method was proposed to evaluate the separation between the layered composites using acoustic emission method. By comparing mechanical data and acoustic emission signals, the mechanical behavior obtained for each loading rate was determined so that the mechanical behavior of the composite material varied with the change in loading rate. The results show that, with increasing loading rates, the resin lost its elastic properties, and the specimen exhibited a more rigid behavior and is quite rigorous so that the fracture failure process is changed. The failure processes and crack growth rate was validated by use of acoustic emission signals. There was good agreement between the fracture toughness of accretion of acoustic emission signals with the experimental values.

Keywords Composite Laminates; Failure Mechanism; Delamination; Loading Rate

CITATION LINKS

[1] Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of glass/epoxy composite by acoustic emission [2] The phenomena of rupture and flow in solids [3] A double cantilever beam test for characterizing mode I delamination of composite materials [4] Delamination of glass fiber reinforced polyester, an acoustic emission study [5] The interlaminar fracture of organic-matrix, woven reinforcement composites [6] Fracture mechanics of mode I delamination in composite materials [7] A method for determining the mode I delamination fracture toughness of elastic and viscoelastic composite materials [8] Characterizing delamination growth in graphite-epoxy [9] Rate-dependent mode I delamination in ballistic composites - experimental and simulation [10] Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array [11] The potential of guided waves for monitoring large areas of metallic aircraft fuselage structure [12] Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites, damage assessment by using advanced signal processing techniques, part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution [13] Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites [14] Ultrasonic guided waves in solid media [15] Quantitative experimental measurements of matrix cracking and delamination using acoustic emission [16] Wavelet-based acoustic emission characterization of residual strength of drilled composite materials [17] Failure modes and fractographic study of glass-epoxy composite under dynamic compression [18] Standard test method for determination of the mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites [19] Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials [20] Strain energy release rate analysis of adhesive-bonded composite joints with a prescribed interlaminar crack [21] Experimental and numerical analysis of delamination growth in double cantilever laminated beams [22] Prediction of residual strength of composite laminates by means of acoustic emission technique [23] Delamination characterization in composite laminates using acoustic emission features, micro visualization and finite element modeling

بررسی اثر نرخ بارگذاری بر تعیین چقرمگی شکست کامپوزیت شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری مود یک با استفاده از آکوستیک امیشن

مهدی حبیبی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

جلال یوسفی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مهدی احمدی نجف‌آبادی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

جدایش یا ترک خوردگی بین لایه‌ای یکی از مهم‌ترین عیوب در مواد کامپوزیتی لایه‌ای است. وجود این عیب در یک سازه باعث کاهش استحکام و در نتیجه از کار افتادگی آن سازه می‌شود. برای بررسی عوامل مؤثر در جدایش بین لایه‌ای نیاز به تحلیل پارامترهای مؤثر در بارگذاری است. در این مقاله تأثیر تغییر نرخ بارگذاری بر مکانیزم خرابی در مود I شکست با استفاده از آکوستیک امیشن برای نمونه‌های تک‌چته ساخته شده از الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی مطابق استاندارد ساخته شده و با نرخ‌های مختلف جابه‌جایی تحت بارگذاری قرار داده می‌شوند. داده‌های نیرو، جابه‌جایی و میزان رشد ترک بر حسب زمان برای نرخ‌های متفاوت بارگذاری برای محاسبه دقیق نرخ آزادسازی انرژی کرنشی علاوه بر اکستنسومتر از دوربین دینو هم استفاده شده است. در این مقاله روشی با قابلیت اطمینان بالا برای ارزیابی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های لایه‌ای با استفاده از روش نشر آوایی پیشنهاد شده است. با مقایسه دیتاهای مکانیکی و سیگنال‌های آکوستیک امیشن، رفتار مکانیکی به‌دست‌آمده برای هر نرخ بارگذاری، مشخص می‌شود به‌طوری که رفتار مکانیکی ماده کامپوزیتی با تغییر نرخ بارگذاری کاملاً متفاوت خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری، رزین خاصیت الاستیکی خود را از دست داده و نمونه از خود رفتار سختتری نشان داده و کاملاً ترد عمل می‌کند به گونه‌ای که فرآیند خرابی قطعه عوض می‌شود. با استفاده از سیگنال‌های آکوستیک امیشن روند خرابی و رشد ترک صحت‌سنجی شد. مقادیر چقرمگی شکست حاصل از تجمع سیگنال‌های انرژی آکوستیک امیشن تطابق خوبی با مقادیر تجربی داشته است.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت لایه‌ای، مکانیزم خرابی، جدایش بین لایه‌ای، نرخ بارگذاری، آکوستیک امیشن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

*نویسنده مسئول: ahmadin@aut.ac.ir

۱- مقدمه

روش نشر آوایی را می‌توان امواج تنش ناشی از انتشار محلی انرژی کرنشی آزادشده در اثر فرآیندهای خرابی نظیر رشد ترک در ساختار نمونه تعریف کرد^[۱]. این امواج را می‌توان شناساگر رشد خرابی مدنظر گرفت. سیگنال‌های نشر آوایی در مواد کامپوزیتی از موده‌های شکست از قبیل ترک‌های ماتریسی، جدایش لایه‌ای، جدایش بین ماتریس و الیاف و شکست الیاف ناشی می‌شوند. این موده‌های خرابی دارای خصوصیات صوتی متفاوتی‌اند که ناشی از مجموعه‌ای از عیوب میکروسکوپی در داخل ساختار نمونه است. این عیوب میکروسکوپی ممکن است سبب خرابی ناگهانی پیش از تغییر سختی یا منحنی هیستریزس شود. از این رو، نشر آوایی می‌تواند ابزاری مؤثر برای تشخیص خرابی در مواد کامپوزیتی باشد، با توجه به اینکه جدایش یا ترک خوردگی بین لایه‌ای یکی از موده‌های غالب خرابی در مواد کامپوزیتی محسوب می‌شود^[۱]. شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای منجر به کاهش تصاعدی سختی و در نهایت شکست ساختار کامپوزیت می‌شود. ترک خوردگی بین لایه‌ای بر اثر عواملی از قبیل هندسه، نوع ماده یا بارگذاری

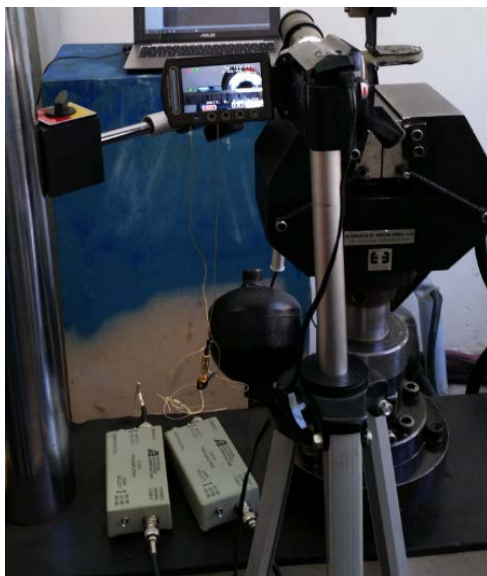
ناپیوسته نظیر لبه‌های آزاد، اطراف سوراخ، رهاشدگی لایه‌ها و محل اتصالات پیچ و پرچ که منجر به ایجاد وضعیت پیچیده سه‌بعدی تنش می‌شود، ایجاد می‌گردد. حتی در نبود چنین ناپیوستگی‌هایی، با اعمال بار فشاری، جدایش بین لایه‌ای اتفاق می‌افتد. بارگذاری فشاری سبب کمناش موضعی یا کلی می‌شود، اما در جهت رزین نیز باعث ایجاد تنش‌های عمودی و برشی شده که جدایش بین لایه‌ای ایجاد می‌کند. چقرمگی شکست بین لایه‌ای که معمولاً با نرخ آزادسازی انرژی بحرانی شناخته می‌شود، با چقرمگی شکست رزین در ارتباط است^[۲].

رشد ترک بین لایه‌ای به واسطه موده‌های بازشدگی، برش، قیچی‌شدگی یا موده‌های ترکیبی اتفاق می‌افتد. بنابراین چقرمگی شکست بین لایه‌ای با استفاده از ضریب شدت تنش یا نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در موده‌های I، II و III به‌دست می‌آید. به‌منظور مقایسه و ارزیابی سازه‌های کامپوزیتی با مواد مختلف از نظر چقرمگی شکست بین لایه‌ای، ارائه تست‌های ساده و قابل اطمینان نیاز است. چندین روش آزمایش برای خرابی مود I و ترکیب مود I و II ارائه شده است. غالب‌ترین نوع نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار می‌گیرند نمونه‌های با بریدگی سطحی (SN)، تیر دو لبه (DCB) و سوراخ‌دار در وسط صفحه‌اند. تیر دو لبه DCB به‌عنوان رایج‌ترین نمونه توسط ویتنی و همکاران^[۳] مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. همچنین، این نمونه توسط بسیاری از محققان برای محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I شکست، به‌کار گرفته شده است^[۳-۸].

همان‌طور که توسط شارنتنی و بنزگاه^[۶] بیان شد، رشد جدایش بین لایه‌ای شامل ۳ مرحله شروع، رشد آهسته و در نهایت جداشدن لایه‌ها، است. همچنین نشان داده شده است که انرژی شکست در حین رشد خرابی، تابع نمایی از رشد ترک است. دویت و همکاران^[۷] در آزمایش نمونه DCB از اتصالات لولایی برای آزادسازی چرخش در نقاط بارگذاری انتهایی تیر دو لبه استفاده کردند. ویلکینز و همکاران^[۸] جدایش بین لایه‌ای را در مود I و مود ترکیبی I و II شکست روی نمونه‌های گرافیت/اپوکسی با لایه چینی میانی صفر درجه و همچنین صفر و ۹۰ درجه به‌کار گرفتند و نرخ آزادسازی انرژی بحرانی را در این کامپوزیت محاسبه نمودند. در پژوهشی از هندسه تیر DCB برای مطالعه تأثیر نرخ بارگذاری و دمای انجام تست بر چقرمگی جدایش بین لایه‌ای در چند لایه از پیش آغشته گرافیت/اپوکسی استفاده شد. نتایج نشان داد که تحلیل عددی قادر به پیش‌بینی دقیق از رفتار نمونه در دماهای بالا نسبت به نتایج تجربی نیست.

با این وجود، مطالعات اندکی بر تأثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های لایه‌ای به نسبت پلیمرهای خالص، انجام شده است^[۹]. بررسی اثر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست برای درک بهتر از حالت بحرانی خرابی در پلیمرهای نرم تا ترد مورد نیاز است. در این مقاله مطالعه تجربی بر تأثیر نرخ بارگذاری بر رفتار مکانیکی و چقرمگی شکست قطعه در حین شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای مود I شکست برای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی انجام شده است. بارگذاری با نرخ ثابت ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه به دهانه ترک اعمال شده و سبب رشد ترک در لایه میانی قطعه می‌شود. با عکس‌برداری از نمونه، رشد ترک و اطلاعات نیرو-جابه‌جایی ثبت شده و در محاسبه رفتار مکانیکی ماده در حین بارگذاری و همچنین چقرمگی شکست قطعه از آنها استفاده می‌شود. افزایش در نرخ بارگذاری باعث می‌شود تا سرعت بالای جابه‌جایی، خاصیت الاستیک رزین را از بین ببرد و رزین در

۳۰، ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. ظرفیت سلول بارگذاری ۱۵ تن با دقت $\pm 0.001 \text{ KN}$ است. ۳ نمونه به‌عنوان تکرارپذیری برای صحت‌سنجی داده‌های استخراج‌شده، مورد آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۱) تنظیمات تست تجربی برای تست مود I شکست همراه با سنسورهای آکوستیک

جدول ۱) خواص مادی کامپوزیت تک‌جهته^[19]

E_{11} (مگاپاسکال)	E_{22} (مگاپاسکال)	E_{33} (مگاپاسکال)
۳۳۰۰۰	۱۰۵۰۰	۱۰۵۰۰
G_{12} (مگاپاسکال)	G_{13} (مگاپاسکال)	G_{23} (مگاپاسکال)
۵۲۵۰	۵۲۵۰	۳۶۶۰
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
۰/۳	۰/۳۳	۰/۳۵

۳-۲- سنسورهای نشرآوایی

۲ سنسور نشرآوایی برای ثبت سیگنال‌های نشرآوایی تولیدشده در طی آزمون خمش ۳ نقطه استفاده شده است. فرکانس رزونانس سنسور پیزوالکتریک تک‌کریستال نشرآوایی با دامنه عملکردی ۱۰۰ تا ۷۵۰ کیلوهرتز، ۵۱۳/۲۸ کیلوهرتز است. پیش‌تقویت‌کننده AST-۲/۴/۶ برای تقویت سیگنال‌های نشرآوایی با درجه ۴۰ dB به‌کار گرفته شده است. نرخ نمونه‌برداری برد جمع‌آوری داده‌های نشرآوایی در یک مگاسمپل بر ثانیه تنظیم شده است. آستانه دریافت سیگنال‌های نشرآوایی، ۳۵ dB تنظیم گردید. قبل از انجام هر تست، برای کالیبره‌کردن سنسورهای نشرآوایی بر اساس استاندارد ASTM E976-10 روش شکست نوک مداد اعمال شد. سطح تماس سنسورها برای اتصال صوتی مناسب، با روغن گریس پوشانده شد.

۳- آزمایش‌های تجربی

مطالعه و بررسی روش‌های مختلف تحلیل تست تیر دو لبه (DCB) توسط ویتنی و همکارانش^[3] ارائه شده است. روش‌های ارائه‌شده از قبیل روش سطح، روش تحلیل تیر و روش تجربی تامیم یافته است. در روش تحلیل تیر، نمونه شامل ۲ تیر لبه‌ای یکسان با انتهای گیردار و طول برابر با طول ترک در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲).

برابر بارگذاری خواص کاملاً تردی از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، فنری بودن و مقاومتی که رزین در مقابل رشد ترک در مود I از خود نشان می‌دهد، با افزایش سرعت بارگذاری از بین رفته و میزان سختی نمونه کاهش می‌یابد. جزئیات آزمایش‌ها و نتایج حاصل در بخش‌های بعد مورد بحث قرار می‌گیرد.

در ادامه ضروریست که اطلاعات مطلوبی در مورد بررسی خرابی به‌وسیله آکوستیک امیشن و ویژگی‌های منبع انتشار موج نشرآوایی در اختیار داشته باشیم. خرابی‌های ایجادشده باعث تولید موده‌های مختلفی از موج‌های لمب در سازه‌های ورقه‌ای می‌شود^[10]. موج‌های لمب صفحه‌ای به‌دلیل توانایی‌شان در حفظ حساسیت خود به خرابی در طول فواصل طولانی انتشار، نقش مهمی در ارزیابی غیر مخرب دارند^[11]. برخی تحقیقات نشان داد که محدوده‌های فرکانسی مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی، بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز است^[12, 13]. در این طیف فرکانسی، عمده‌ترین موج‌های لمب شامل موده‌های اصلی متقارن S_0 و نامتقارن A_0 است^[14, 15]. بنابراین سیگنال‌های نشرآوایی تولیدشده در نمونه‌های کامپوزیتی ترکیبی از موده‌های اصلی امواج لمب هستند. برخی از محققان تا کنون مکانیزم خرابی را با استفاده از روش‌های مختلف به ویژه نشرآوایی به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای مواد کامپوزیتی مورد بررسی قرار داده‌اند^[12, 13, 16, 17]. لوتاس و کوستاپولوس^[12] نشان دادند که نشرآوایی را می‌توان به‌عنوان ابزاری مؤثر برای نظارت بر مکانیزم‌های مختلف خرابی در کامپوزیت بافته در طی بارگذاری سیکلی کششی به‌کار برد. آنها از یک طرح تشخیص الگوی قوی برای به‌دست آوردن شروع و افزایش خرابی نمونه‌ها استفاده کردند.

۲- آزمایش‌های تجربی

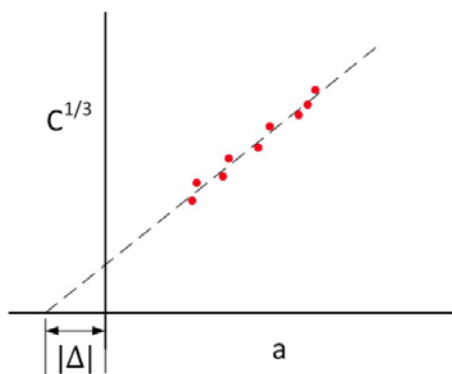
۲-۱- شرح مواد مورد استفاده

تست‌هایی آزمایشی روی ورق‌های مستطیلی کامپوزیتی شیشه/اپوکسی انجام گرفته است. لایه چینی این نمونه به‌صورت ۱۲ لایه صفر درجه با ضخامت ۵ میلی‌متر انتخاب شده است. از الیاف شیشه تک‌جهته برای ساخت صفحات کامپوزیتی با استفاده از رزین اپوکسی بهره گرفته شده است. نمونه‌ها با روش تزریق در خلاء ساخته شده و به‌منظور پخت نهایی رزین، به مدت ۷ روز در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و تحت فشار خلاء ۰/۷ bar قرار داده شده‌اند. ترک اولیه با قراردادن پارچه نسوز به ضخامت ۱۱ میکرون در لایه میانی کامپوزیت به‌عنوان جدایش اولیه ایجاد شده است. صفحات با ضخامت ۵ میلی‌متر به‌وسیله دستگاه فرز به نوارهایی با ابعاد ۲۱×۱۶۰ میلی‌متر مربع برش داده شده‌اند (استاندارد ASTM D5528^[18]). سپس برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده، با استفاده از استاندارد ASTM D3039^[19] نمونه‌ها تحت تست کشش قرار گرفتند.

۲-۲- روش آزمایش

روش انجام تست مود I شکست برای نمونه‌های تک‌جهته مستطیلی با ضخامت یک‌نواخت که در یک انتهای آن ترک به‌عنوان شروع‌کننده جدایش بین لایه‌ای (استاندارد ASTM^[18]) وجود دارد، در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها با ترک اولیه ۴۰ میلی‌متر آماده شده‌اند. خواص نمونه‌های تک‌جهته در جدول ۱ ارائه شده است. با استفاده از لولاهای متصل‌شده روی نمونه و با استفاده از دستگاه عمومی کشش‌دار تک بارگذاری روی قطعه انجام شده و روش انجام آن به‌صورت کنترل جابه‌جایی با نرخ‌های ثابت ۵، ۱۵،

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (5)$$



شکل ۳) روش به دست آوردن پارامتر اصلاح طول ترک (Δ) برای تست مود I

۴- نتایج و تحلیل‌ها

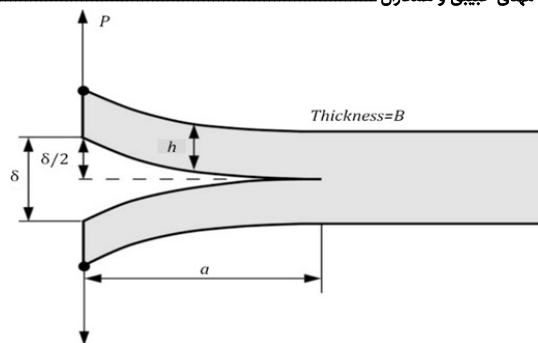
مکانیزم‌های اصلی خرابی مواد کامپوزیتی شکست فیبرها، ترک‌خوردگی ماتریس و جدایش بین ماتریس و الیاف، جدایش بین لایه‌های شناخته می‌شود [20-22]. در این بخش، از داده‌های مکانیکی ثبت شده حین رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها، برای بررسی رفتار آن استفاده می‌شود.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، ضریب تصحیح طول ترک با استفاده از ترسیم نمودار ریشه سوم نرمی بر حسب طول ترک و مشخص کردن مقدار طول از مبدا نمودار به دست می‌آید. این مقدار برای هر یک از تست‌ها مطابق جدول ۲ است [22].

جدول ۲) ضرایب تصحیح طول ترک برای نرخ‌های مختلف بارگذاری

crack growth rate (mm/min)	۵	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
crack length correction factor	۴/۹۱	۴/۹۳	۴/۹۷	۵/۲	۵/۳

نمودار نیرو- جابه‌جایی به منظور تعریف توالی مکانیزم‌های خرابی در تست مود I برای نمونه‌های تک‌جهته تعیین شده است (نمودار ۱). توالی مکانیزم‌های خرابی، به ۵ مرحله تقسیم می‌شوند. در مرحله اول، محدوده عاری از خرابی، در طی تست هیچ خرابی مشاهده نشده و رفتار نمونه تحت بارگذاری مود I در این محدوده کاملاً الاستیک بوده است. شیب نمودار کاملاً یک‌نواخت بوده و هیچ گونه افت خاصی مشاهده نمی‌شود. اولین مود خرابی، ترک خوردگی ماتریسی است که در مرحله دوم شروع می‌شود و در صفحه میانی قطعه ایجاد می‌شود. این نقطه در ارتباط با شروع جدایش بین لایه‌ای است که تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در این حالت با افزایش چگالی ترک‌های ماتریسی، رفتار قطعه از محدوده کاملاً خطی خارج می‌شود. زمانی که ترک‌های ماتریسی به حد فاصل الیاف و ماتریس می‌رسد، جدایش بین فیبر و ماتریس آغاز می‌شود (مرحله سوم). در مرحله بعدی (مرحله چهارم) با جدا شدن فیبر از بستر رزینی خود، پدیده پل‌زنی الیاف از تیرچه بالایی به تیرچه پایینی اتفاق افتاده و این پدیده سبب افزایش استحکام نهایی قطعه و جلوگیری از ادامه رشد ترک می‌شود. شکست جزئی در الیاف به دلیل بالا رفتن نیرو از حد تسلیم الیاف، منجر به شکسته شدن دسته فیبرها شده و این منطقه مملو از الیاف شکسته آزاد می‌گردد. با شکست دسته فیبرها عمده‌تاً در این مناطق جدایش بین لایه‌ای به طور قابل توجهی در میانه سطح شکست، رشد می‌کند. تا این مرحله، برش در شکست



شکل ۲) شماتیک از نمونه استاندارد DCB [10]

در این تحلیل به طور معمول فرض می‌شود که انرژی کرنشی ناشی از باز شدن دهانه ترک تنها در بخش‌های باز شده از نمونه ذخیره می‌شود. اگرچه در واقعیت، بخشی از انرژی کرنشی در قسمت ترک‌نخورده نمونه ذخیره می‌شود، زیرا نمی‌توان فرض کرد که این بخش صلب است. قابلیت ارتجاعی تکیه‌گاه بر محاسبه انرژی کرنشی حتی در بخش‌های ترک‌خورده نمونه نیز تأثیر بسزایی دارد. تنش‌های برشی در این تحلیل قابل نظر است. با این وجود، مواردی وجود دارد که غیرممکن بودن ماده سهم تنش‌های برشی را قابل توجه می‌سازد. پیش‌فرض اعمال نیرو به انتهای‌ترین نقطه تیر که برای چرخش آزاد است، قابل اجرا در برخی ابزار اعمال بارگذاری‌ها نیست. اگرچه تمامی گزارشات آزمایش‌های تجربی در مقالات تحت بارگذاری استاتیکی ارائه شده است، دانستن نحوه تأثیر انرژی کرنشی ذخیره شده بر نتایج، زمانی که نمونه تحت بارگذاری با نرخ‌های بالاتر قرار می‌گیرد، مهم است.

به منظور بررسی رشد جدایش بین لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مود I، نمونه‌های استاندارد DCB بر اساس استاندارد ASTM D5528 ساخته شده و در حالت کنترل جابجایی تحت بارگذاری قرار می‌گیرند [20]. با فرض رفتار الاستیک خطی برای کامپوزیت و خمش محدود بازوهای نمونه ($\delta/a < 0.4$)، می‌توان نوشت:

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right) = -\frac{\delta}{2B} \left(\frac{dP}{da} \right) \quad (1)$$

نرم‌شدگی الاستیک تیر DCB با توجه به در نظرگیری این تیر به عنوان تیر یکسر گیردار متقارن و استفاده از روبروت تئوری الاستیک، برابر است با:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (2)$$

با جایگذاری C در معادله (۱) داریم:

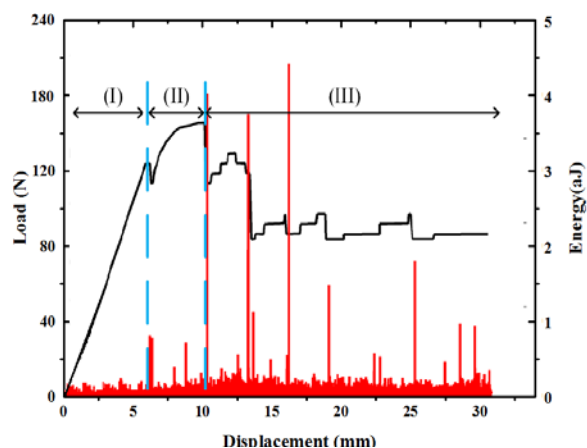
$$G_I = \frac{P^2 a^2}{BEI} = \frac{12P^2 a^2}{B^2 h^3 E} \quad (3)$$

فرم دیگر معادله (۳) به شکل زیر است.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (4)$$

در عمل، چون احتمال چرخش بازوی نمونه DCB در نوک جدایش بین لایه‌ای امکان دارد و تیر فرض شده کاملاً گیردار نمی‌باشد، بنابراین، معادله (۴) نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی را به صورت محافظه‌کارانه ارائه می‌دهد. یک راه حل برای بهبود این تئوری، این است که طول جدایش بین لایه‌ای اندکی بیشتر در نظر گرفته شود ($a + |\Delta|$). پارامتر اصلاح طول ترک (Δ)، به طور عملی و با رسم منحنی حداقل مربعات ریشه سوم نرم‌شدگی ($\sqrt[3]{C}$) بر حسب طول جدایش بین لایه‌ای (a) به دست می‌آید (شکل ۳).

وقایع جزئی مشاهده شده در این ناحیه نیز، می‌تواند ناشی از اصطکاک بین لولاهای متصل به نمونه با فک‌های دستگاه کشش، تغییر فرم پلاستیک موضعی در نمونه یا میکروخرابی‌های موضعی ایجاد شده حین ساخت نمونه باشد. (II) در این ناحیه، با آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای، سیگنال‌های آکوستیک امیشن با انرژی زیاد تولید می‌شوند. اما با توقف مجدد جدایش بین لایه‌ای و بالا رفتن نیرو تا رسیدن به نیروی بیشینه، از تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن کاسته می‌شود. (III) در این ناحیه با رشد پیوسته جدایش بین لایه‌ای و فعال شدن مکانیزم‌های مختلف خرابی از قبیل: شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس، تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار ۲ مشخص است، در ناحیه III، در لحظاتی که نیرو افزایش یافته، رشد جدایش متوقف شده است، تعداد سیگنال‌های آکوستیک امیشن کم بوده و در لحظه‌ای که جدایش رشد کرده و نیرو افت می‌کند، ضرب آهنگ سیگنال‌های آکوستیک امیشن افزایش می‌یابد.



نمودار ۲) نمودار نیرو-جابجایی همراه با سیگنال‌های انرژی آکوستیک برای نمونه‌های تک‌جهته

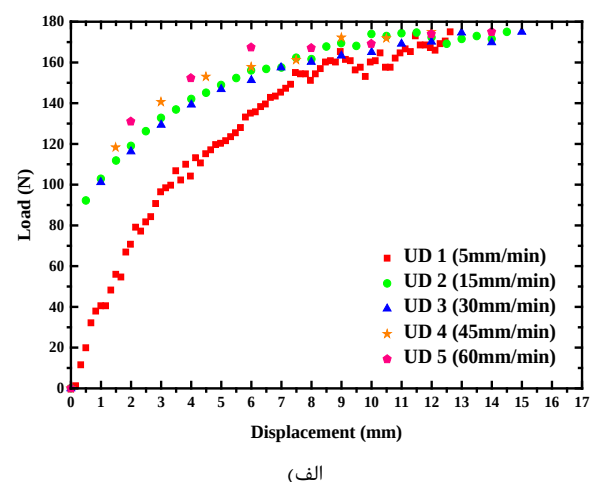
نمودار انرژی تجمعی سیگنال‌های آکوستیک امیشن برای نمونه‌های تک‌جهته با نرخ بارگذاری متفاوت نشان‌دهنده میزان انرژی دریافتی از نمونه‌های تحت بارگذاری به ترتیب از نمونه با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه تا نمونه‌ای با نرخ بارگذاری ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش می‌یابد (نمودار ۳). دلیل این امر وجود خرابی‌های ایجاد شده در نمونه‌ها در اثر از دست رفتن خاصیت الاستیکی رزین است به‌طوری که نمونه از خود رفتار سخت‌تری نشان داده و کاملاً ترد عمل می‌کند. این امر سبب افزایش تعداد منابع ایجاد صوت بوده که منجر به ایجاد سیگنال‌هایی با انرژی بیشتری شده است.

همان‌طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود انرژی سیگنال‌های دریافتی از خرابی در نرخ‌های بالا تقریباً به یک اندازه بوده که صه‌گذار رفتار ترد رزین در نرخ‌های بارگذاری بالا می‌باشد. حال آنکه در سرعت‌های ۵ میلی‌متر بر دقیقه (بارگذاری شبه استاتیکی) میزان انرژی دریافتی از قطعه اندک بود و همچنین سرعت رشد ترک نیز بسیار پایین می‌باشد. در ادامه تابع انرژی تجمعی آکوستیک برای سرعت‌های بارگذاری بالا به‌صورت معادله ۶ استخراج می‌شود:

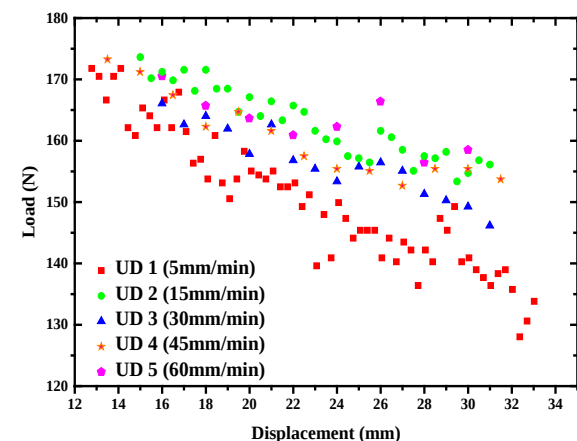
$$y = 0.0044e^{4.2235x} \quad (6)$$

غلبه کرده و ترک ماتریسی در سطح تماس دو لایه میانی مود غالب شکست است. مرحله پنجم همراه با شروع شکست عمده الیاف است که اکثریت شکست در دسته فیبرها رخ می‌دهد. در این مرحله شیب نمودار نیرو-جابجایی به‌طور چشمگیری افت کرده و در نهایت، به‌دلیل شکست بیش از اندازه فیبرها، نمونه قادر به تحمل بار اضافی نبوده و جدایش بین لایه‌ای در قطعه رشد چشمگیری می‌نماید.

رفتار مود I خرابی با نرخ‌های بارگذاری گسترده‌ای (از ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه) مورد بررسی قرار گرفته است. میزان جابجایی و بار اعمالی به لایه نمونه، به‌طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شده است. طول ترک با استفاده از دوربین فیلمبرداری SONY مدل HDR-XR150 با بزرگنمایی اپتیکال ۲۵X و بزرگنمایی دیجیتال ۳۰۰X، در حین رشد جدایش بین لایه‌ای به‌صورت پیوسته تصویربرداری شده است.



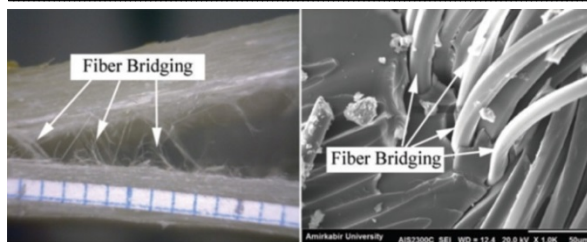
(الف)



(ب)

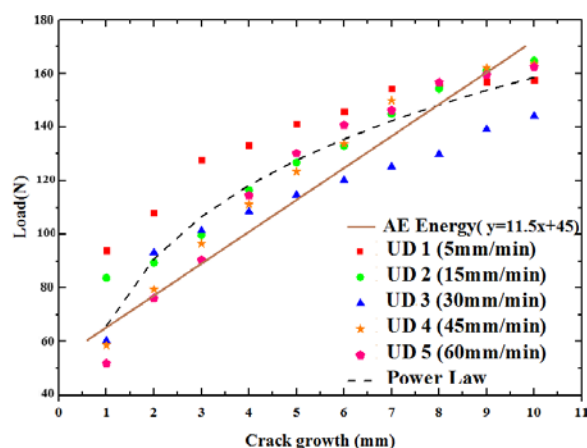
نمودار ۱) مقایسه نیرو-جابجایی تحت بارگذاری با نرخ‌های مختلف برای نمونه‌های تک‌جهته

نمودار ۲) نمودار بررسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن بیانگر تطابق قابل قبولی با داده‌های مکانیکی از نظر وقوع زمان خرابی وجود دارد. به‌طوری که رفتار سیگنال‌های انرژی آکوستیک امیشن نمونه‌های DCB تحت بارگذاری را می‌توان به ۳ ناحیه تقسیم نمود، که این سه ناحیه: I) در این ناحیه، به علت عدم وقوع خرابی در نمونه، واقعه آکوستیک امیشن قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.



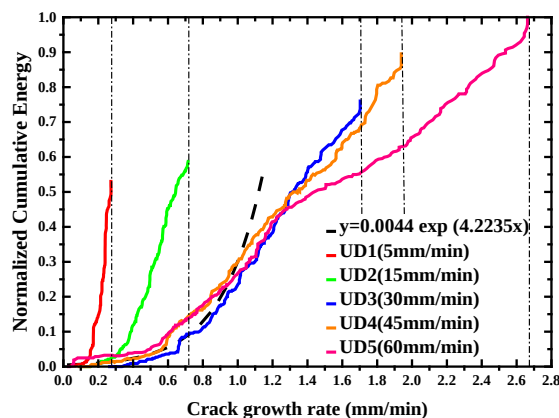
شکل ۴) مشاهدات عینی و SEM از پدیده پل زنی الیاف در نمونه تک جهته [23]

نمودار ۵ نمودار نیرو بر حسب میزان رشد ترک را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی نشان می‌دهد. در این نمودار نیرو با افزایش مقدار جدایش بین لایه‌ای افزایش پیدا می‌کند. با این حال با افزایش نرخ بارگذاری، مقدار نیروی لازم برای شروع و رشد جدایش بین لایه‌ای کاهش پیدا کرده است. این کاهش نیرو به دلیل رفتار ترد رزین در نرخ‌های بالای بارگذاری و عدم مقاومت آن نسبت به رشد ترک است. با گسترش جدایش بین لایه‌ای و افزایش بازوهای ترک، اعمال ممان خمشی به جبهه ترک در نرخ بارگذاری بالا، کمتر شده و قطعه مقاومت خود را در مقابل رشد جدایش بین لایه‌ای به دست می‌آورد. به این دلیل میزان باربری قطعه در طول ترک‌های بالاتر از ۸ میلی‌متر تقریباً یکسان شده و به عددی ثابت (تقریباً ۹۰N) میل می‌کند. در ادامه برای بررسی رشد ترک بر اساس سیگنال‌های آکوستیک امیشن، از داده‌های تجمع انرژی در هر مرحله از رشد ترک استفاده شده است تا یک رابطه مشخصی بین انرژی آکوستیکی و میزان رشد ترک حاصل گردد. همان‌طور که در نمودار ۵ مشخص است سیگنال‌های آکوستیک امیشن توانسته به خوبی روند رشد ترک را نشان دهد.



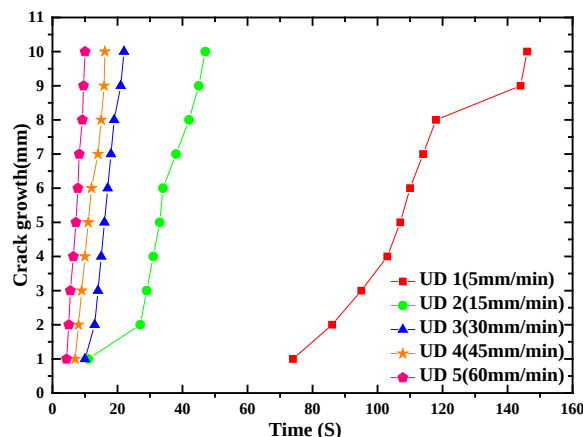
نمودار ۵) نمودار نیرو- رشد ترک برای نمونه‌های تک جهته بر اساس سیگنال تجمع انرژی با نرخ‌های بارگذاری ۵ تا ۶۰ میلی‌متر

نمودار سختی (که همان نسبت نیرو به میزان جابجایی دهانه ترک است) بر حسب نرخ بارگذاری (نمودار ۶) نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری میزان سختی نمونه‌ها کاهش و به عبارتی نرمی افزایش یافته است. در نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه میزان سختی حدوداً برابر با ۸/۵N/mm و در نرخ بارگذاری ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه معادل ۶/۵N/mm است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی با افزایش سرعت بارگذاری افت محسوسی داشته و روند آن از رابطه توانی پیروی می‌کند. با توجه به روند نمودار، می‌توان پیش‌بینی کرد که در سرعت‌های بالاتر از ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، سختی روند ثابتی را طی کند. افزایش در نرخ بارگذاری باعث می‌شود تا سرعت بالای جابجایی نرمی رزین را از



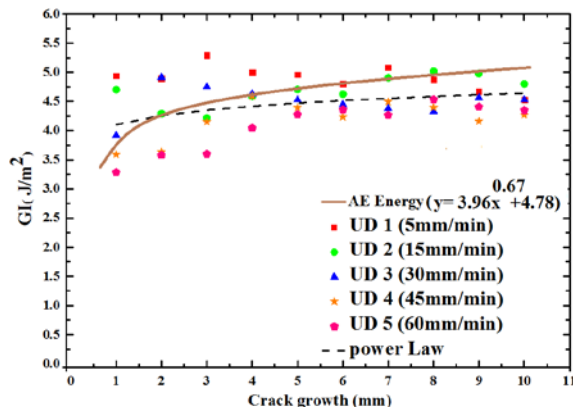
نمودار ۳) نتایج حاصل تجمع انرژی تحت بارگذاری با نرخ‌های مختلف برای نمونه‌های تک جهته

همان‌طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، در نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه، زمان شروع ترک به تعویق افتاده است. این بدین معناست که قطعه در این بازه رفتار کاملاً الاستیک و نرمتری از خود نشان داده و خرابی در قطعه ایجاد نشده است. به مرور زمان و با باز شدن دهانه ترک، ترک‌های ریز ماتریسی ایجاد شده و باعث افت خواص مکانیکی قطعه می‌شود. با ادامه، بارگذاری ترک‌های ماتریسی به یکدیگر متصل شده و جدایش در لایه میانی را ایجاد می‌کند. با تشکیل جدایش بین لایه‌ای، افت چشمگیر خواص ماده (همان‌طور که در نمودار ۱ دیده شد) سبب کاهش تحمل باربری قطعه شده و تشکیل خرابی در قطعه سرعت می‌گیرد (بازه زمانی ۱۰۰ تا ۱۲۰ ثانیه). با افزایش طول ترک و جدایی بین لایه‌ها، پل زنی الیاف مطابق شکل ۴ میان ۲ تیرچه بالایی و پایینی مانع از رشد بی‌رویه جدایش در قطعه شده و از سرعت رشد ترک می‌کاهد (بازه زمانی ۱۲۰ تا ۱۴۰ ثانیه). در ادامه با شکست این دسته فیبرها رشد خرابی سرعت قبلی خود را پیدا کرده سبب افت شدید استحکام نمونه می‌شود. در نرخ‌های بالاتر، محدوده‌ی الاستیک قطعه کمتر بوده و سرعت تشکیل خرابی در نمونه بسیار بالاتر است. به گونه‌ای که در نمونه با نرخ ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت رشد ترک با شتاب ثابت افزایش پیدا کرده و قطعه مشابه جسم کاملاً ترد عمل می‌کند. به عبارت دیگر، رفتار مکانیکی ماده کاملاً تحت تأثیر نوع و سرعت بارگذاری بوده و سرعت زیاد در بارگذاری سبب مشاهده رفتار کاملاً ترد از ماده می‌شود.



نمودار ۴) میزان رشد ترک بر حسب زمان برای نمونه‌های تک جهته تحت نرخ‌های بارگذاری ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه

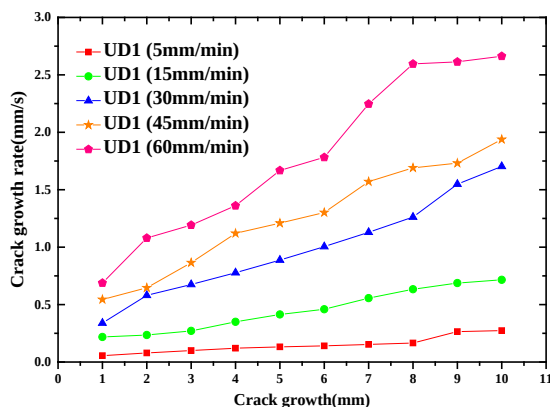
رسیدن به حد آستانه تحمل الیاف، فیبرها شکسته شده و بالابودن نیرو منجر به رشد ناگهانی جدایش در قطعه می‌گردد (به‌عنوان مثال، حد فاصل ۶ تا ۸ میلی‌متر در نمونه با نرخ بارگذاری ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه). پس از آن، با رشد خرابی در قطعه، نیروی باربری قطعه کاهش یافته و همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت رشد ترک نیز کاهش چشمگیری می‌یابد. به‌طور کلی در نرخ‌های پایین بارگذاری، سرعت رشد ترک تقریباً ثابت بوده است. این در حالی است که برای نمونه با نرخ بارگذاری ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت رشد ترک حدوداً ۴ برابر گردیده است.



نمودار ۷) نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بر حسب طول ترک برای نمونه‌های تک‌جهته با نرخ بارگذاری ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه

جدول ۳) مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای برای نمونه‌های تک‌جهته

$G_{IC} \left(\frac{KJ}{m^2} \right)$		Specimen
AE Energy	AE Count	
۰/۴۵۰	۰/۱۷۸	U_S

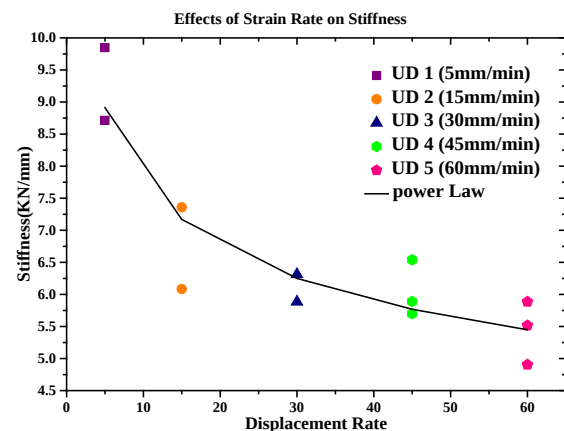


نمودار ۸) نرخ رشد ترک بر حسب طول ترک برای نمونه‌های تک‌جهته با نرخ بارگذاری ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مکانیزم خرابی در مود I شکست برای نمونه‌های تک‌جهته ساخته شده از الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی مطابق استاندارد ساخته شد و با ۵ نرخ مختلف جابه‌جایی تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفت. از زیانه‌های لولایی برای اطمینان از چرخش بدون محدودیت در انتهای آزاد نمونه برای اعمال جابه‌جایی استفاده گردید. داده‌های نیرو، جابه‌جایی و میزان رشد ترک بر

بین ببرد و رزین در برابر بارگذاری خواص کاملاً تردی از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، فنری بودن و مقاومتی که رزین در مقابل رشد ترک در مد I از خود نشان می‌دهد، با افزایش سرعت بارگذاری از بین رفته و میزان سفتی نمونه کاهش می‌یابد.



نمودار ۹) سفتی بر حسب نرخ بارگذاری با نرخ بارگذاری برای نمونه‌های تک‌جهته با نرخ‌های بارگذاری ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه

در نمودار ۶، مقادیر چقرمگی شکست (G_I) بر حسب طول ترک بین لایه‌ای رسم شده است. در تمامی نرخ‌های بارگذاری، ابتدا نرخ آزادسازی انرژی کرنشی با شروع ترک افزایش یافته و با گسترش ترک، نرخ انرژی کاهش می‌یابد.

با بررسی دقیق‌تر نمودار می‌توان دریافت که در سرعت‌های پایین بارگذاری، با رشد ترک در قطعه کامپوزیتی، میزان نرخ انرژی آزاد شده بیشتر از حالتی است که بارگذاری با سرعت بالاتری انجام می‌پذیرد. این نشان از آن دارد که مقاومت سازه در نرخ‌های بالای بارگذاری، افت محسوسی می‌کند. در حالی که با گسترش جدایش بین لایه‌ای و افزایش طول بازوی ترک، مقاومت رزین در مقابل رشد ترک افزایش پیدا کرده و نرخ آزادسازی انرژی کرنشی برای تمامی نرخ‌های بارگذاری مقدار تقریباً یکسانی پیدا می‌کند. با ادامه روند خرابی، پل زنی الیاف میان ۲ تیرچه بالایی و پایینی سبب افزایش مقدار انرژی آزاد شده کرنشی شده و روند افزایشی در نمودار مشاهده می‌شود. با توجه به مطالب فوق، در این بخش برای تعیین مقادیر چقرمگی شکست بر اساس سیگنال‌های آکوستیک امیشن از تجمع انرژی آکوستیک استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار ۷ مشخص است بخاطر اتلاف کمتر انرژی آکوستیکی، معادله حاصل، از دقت بالایی برخوردار است. در ادامه مقادیر چقرمگی شکست بحرانی مطابق جدول ۳ با استفاده از ۲ پارامتر آکوستیکی تعیین می‌گردد: الف) تعداد ضرب آهنگ‌های آکوستیک امیشن و ب) انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن.

با توجه به تغییر نرخ بارگذاری از ۵ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، مشاهده می‌شود که در نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه، تغییرات سرعت رشد ترک تقریباً ثابت بوده و ترک به آرامی و به‌طور یکنواخت در کل فرایند گسترش پیدا می‌کند (نمودار ۸). این در حالی است که با افزایش سرعت بارگذاری، رشد ترک از حالت یکنواخت و خطی خارج شده و افت و خیزهایی نشان می‌دهد. این افت و خیزها به دلیل وجود پدیده پل زنی الیاف اتفاق می‌افتد. با پل زنی دسته‌ای از الیاف میان ۲ تیرچه بالایی و پایینی، الیاف مانع از گسیختگی ۲ بخش قطعه از یکدیگر شده و اصطلاحاً تا حدودی سبب توقف رشد ترک شده و از سرعت آن به شدت می‌کاهد. اما با زیاد شدن نیرو و

- delamination and interlaminar fracture toughness assessment of glass/epoxy composite by acoustic emission. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(4):1-11. [Persian]
- 2- Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. 1921;221:163-198.
- 3- Whitney JM, Browning CE, Hoogsteden W. A double cantilever beam test for characterizing mode I delamination of composite materials. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1982;1(4):297-313.
- 4- De Charentenay FX, Bethmont M, Benzeggagh M, Chrétien JF. Delamination of glass fiber reinforced polyester, an acoustic emission study. In: Miller KJ, Smith RF, editors. Mechanical behaviour of materials: Proceedings of the third international conference held in Cambridge, England, 20-24 August 1979. 3rd Volume. Oxford: Pergamon Press; 1980. pp. 241-251.
- 5- Bascom WD, Bitner JL, Moulton RJ, Siebert AR. The interlaminar fracture of organic-matrix, woven reinforcement composites. Composites. 1980;11(1):9-18.
- 6- De Charentenay FX, Benzeggagh M. Fracture mechanics of mode I delamination in composite materials. In: Bunsell AR, Martrenchar A, Verchery G, Bathias C, Menkes D, editors. Advances in composite materials: Proceedings of the third international conference on composite materials, held in Paris, 26-29 August 1980. Oxford: Pergamon Press; 1980. pp. 186-197.
- 7- Devitt DF, Schapery RA, Bradley WL. A method for determining the mode I delamination fracture toughness of elastic and viscoelastic composite materials. Journal of Composite Materials. 1980;14:270-285.
- 8- Wilkins D, Eisenmann J, Catmin R, Margolis W, Benson R. Characterizing delamination growth in graphite-epoxy. In: Reifsnider K, editor. Damage in composite materials: Basic mechanisms, accumulation, tolerance, and characterization. West Conshohocken PA: ASTM International; 1982. pp. 168-183.
- 9- May M, Lässig T. Rate-dependent mode I delamination in ballistic composites - experimental and simulation. Composite Structures. 2017;180:596-605.
- 10- Aljets D, Chong A, Wilcox S, Holford K. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. Journal of Acoustic Emission. 2010;28:85-98.
- 11- Dalton RP, Cawley P, Lowe MJS. The potential of guided waves for monitoring large areas of metallic aircraft fuselage structure. Journal of Nondestructive Evaluation. 2001;20(1):29-46.
- 12- Loutas TH, Kostopoulos V. Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites, damage assessment by using advanced signal processing techniques, part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution. Composites Science and Technology. 2009;69(2):265-272.
- 13- Mohammadi R, Ahmadi Najafabadi M, Saeedifar M, Yousefi J, Minak G. Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites. Composites Part B Engineering. 2017;108:427-435.
- 14- Rose JL. Ultrasonic guided waves in solid media. New York: Cambridge University Press; 2014.
- 15- Scholey JJ, Wilcox PD, Wisnom MR, Friswell MI. Quantitative experimental measurements of matrix cracking and delamination using acoustic emission.

حسب زمان برای محاسبه نرخ آزادسازی انرژی کرنشی به‌طور پیوسته ذخیره و در محاسبه چقرمگی شکست به‌کار گرفته شد. با بررسی رفتار مکانیکی به‌دست آمده برای هر نرخ بارگذاری، مشخص شد که رفتار مکانیکی ماده کامپوزیتی متناسب با نرخ بارگذاری کاملاً متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری، رفتار ماده کاملاً سخت شده و قطعه کاملاً ترد عمل می‌کند. به گونه‌ای که ترک بدون هیچ توقفی در آن رشد پیدا می‌کند.

به‌طور کلی در نرخ‌های پایین بارگذاری، سرعت رشد ترک تقریباً ثابت بوده است. این در حالی است که برای نمونه با نرخ بارگذاری ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت رشد ترک حدوداً ۴ برابر گردیده است. افزایش در نرخ بارگذاری باعث می‌شود تا سرعت بالای جابه‌جایی، خاصیت الاستیک رزین را از بین ببرد و رزین در برابر بارگذاری خواص کاملاً تردی از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، فنی بودن و مقاومتی که رزین در مقابل رشد ترک در مود I از خود نشان می‌دهد، با افزایش سرعت بارگذاری از بین رفته و میزان سفتی نمونه کاهش می‌یابد.

در ادامه با استفاده از سیگنال‌های آکوستیک امیشن روند خرابی و رشد ترک صحت‌سنجی شد. مقادیر چقرمگی شکست حاصل از تجمع سیگنال‌های انرژی آکوستیک امیشن تطابق خوبی با مقادیر حاصل از رابطه GI، بر اساس استاندارد ASTM D5528^[18] داشته است.

با توجه به اینکه افزایش نرخ بارگذاری باعث از دست رفتن خاصیت الاستیک رزین و تردی نمونه می‌شود این امر سبب افزایش تعداد منابع ایجاد صوت بوده که منجر به ایجاد سیگنال‌هایی با انرژی بیشتری شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولین آزمایشگاه تست خستگی دانشکده هوافضا در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، برای در اختیار قراردادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

فهرست علائم

A	طول ترک (mm)
B	عرض نمونه (mm)
C	نرمی قطعه (mm/N)
S	سفتی قطعه (KN/mm)
E	مدول الاستیک (Nm ²)
Glc	چقرمگی شکست (N/m)
H	ارتفاع نمونه (mm)
I	ممان سطح (m ³)
P	نیرو (N)
U	انرژی پتانسیل (J)
علائم یونانی	
Δ	ضریب اصلاح طول ترک (mm)
δ	جابه‌جایی دهانه ترک (mm)

منابع

- 1- Saeedifar M, Fotouhi M, Mohammadi R, Ahmadi Najafabadi M, Hosseini Toudeshky H. Investigation of

20- Chadegani AR. Strain energy release rate analysis of adhesive-bonded composite joints with a prescribed interlaminar crack [Dissertation]. Wichita KS: Wichita State University; 2008.

21- La Saponara V, Muliana H, Haj-Ali R, Kardomateas GA. Experimental and numerical analysis of delamination growth in double cantilever laminated beams. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002;69(6):687-699.

22- Habibi M. Prediction of residual strength of composite laminates by means of acoustic emission technique [Dissertation]. Tehran: Amir Kabir University of Technology; 2018. [Persian]

23- Yousefi J, Mohamadi R, Saeedifar M, Ahmadi M, Hosseini Toudeshky H. Delamination characterization in composite laminates using acoustic emission features, micro visualization and finite element modeling. *Journal of Composite Materials*. 2016;50(22):3133-3145.

Composites Part A Applied Science and Manufacturing. 2010;41(5):612-623.

16- Heidary H, Ahmadi M, Rahimi A, Minak G. Wavelet-based acoustic emission characterization of residual strength of drilled composite materials. *Journal of Composite Materials*. 2013;47(23):2897-2908.

17- Kumar P, Garg A. Failure modes and fractographic study of glass-epoxy composite under dynamic compression. *Journal of Materials Science*. 1988;23(7):2305-2309.

18- D 5528-01: Standard test method for determination of the mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. Annual book of ASTM standard. 2007.

19- D3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Annual book of ASTM standard. 2006.