

Estimation of Delamination in Polymer Composites Reinforced with Metal Pins under Mode I Loading Using Acoustic Emission Method

Gholamreza Gholamiyan Nezhad ¹  | Amir Refahi Oskouei ²  |

1. Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.
2. Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.
E-mail: amir.refahi@sru.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 20 Sep. 2022

Revised 30 Nov. 2022

Accepted 10 Dec. 2022

Keywords:

Delamination,
Metal Z-pins,
Interlayer Fracture
Toughness,
Mode I,
Acoustic Emission.

ABSTRACT

Delamination is one of the most common failure types among polymer composites, which occurs in all types of loading, including mode I. For this reason, composite laminates are used in different ways, including the method of using metal Z-pins along the thickness, in order to delay the Delamination time and increase the strain energy release rate. In the present study, the mechanical performance and Acoustic Emission of Delamination in glass/polyester composite have been investigated using the ASTM D5528-01 standard in the manufacture of DCB samples. First, the force-displacement curve and crack growth resulting from Delamination for Z-pinned steel and copper samples were compared with those without pins. The critical load of each sample to obtain the interlayer fracture toughness for mechanical behavior according to the standard D5528-01, as well as the critical load for the Acoustic Emission behavior, was associated with the increase and growth of some signal energy and the jump of cumulative Acoustic Emission energy. It was found that the strain energy release rate increases by using metal pins along the thickness. Also, the fracture toughness obtained from the mechanical method was verified by the Acoustic Emission method.

Cite this article: Gholamiyan Nezhad. G., Refahi Oskouei, A. (2023). Estimation of Delamination in Polymer Composites Reinforced with Metal Pins Under Mode I Loading Using Acoustic Emission Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (11), 32-51. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.362920.1103>

تخمین جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با پین‌های فلزی تحت بارگذاری مود I با استفاده از روش آکوستیک امیشن غلامرضا غلامیان نژاد^۱ | امیر رفاهی اسکوئی^۲ ✉

۱. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.
۲. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. رایانامه: amir.refahi@sru.ac.ir

چکیده:

جدایش بین‌لایه‌ای یکی از انواع خرابی شایع در بین کامپوزیت‌های پلیمری بوده که در انواع بارگذاری از جمله مود I به وقوع می‌پیوندد. به همین دلیل چندلایه‌های کامپوزیتی به طریق مختلف از جمله روش استفاده از Z-پین‌های فلزی در راستای ضخامت، جهت به تاخیر انداختن زمان جدایش بین‌لایه‌ای و افزایش نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی استفاده می‌شوند. در مطالعه حاضر، به بررسی عملکرد مکانیکی و آکوستیک امیشن جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت شیشه/پلی استر و با به کارگیری استاندارد ASTM D5528-01 در ساخت نمونه‌های آزمون DCB برای مود I پرداخته شده است. ابتدا نمودار نیرو-جابجایی و رشد ترک حاصل از جدایش بین‌لایه‌ای برای نمونه‌های پین گذاری شده از جنس فولاد و مس با نمونه‌های بدون پین مقایسه شد. بار بحرانی هر یک از نمونه‌ها برای بدست آوردن چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای برای رفتار مکانیکی بر طبق استاندارد و همچنین بار بحرانی برای رفتار آکوستیک امیشن متناظر با افزایش ناگهانی و رشد مقداری انرژی سیگنال و جهش انرژی تجمعی آکوستیک امیشن تعیین شد. مشخص شد که نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی با به کار بردن پین‌های فلزی در راستای ضخامت افزایش می‌یابد. همچنین چقرمگی شکست بدست آمده از روش مکانیکی با روش آکوستیک امیشن صحت‌سنجی شد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۶/۲۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۸/۱۹

کلیدواژگان:

جدایش بین‌لایه‌ای،

پین فلزی،

چقرمگی شکست

بین‌لایه‌ای،

مود I،

آکوستیک امیشن.

استناد: غلامیان نژاد، غلامرضا؛ رفاهی اسکوئی، امیر؛ (۱۴۰۱). تخمین جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با پین‌های فلزی تحت بارگذاری مود I با استفاده از روش آکوستیک امیشن. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۱۱)، ۵۱-۳۲.

<http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.362920.1103>

۱- مقدمه

جدایش بین لایه‌ای یکی از شایع‌ترین انواع مکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌باشد. به جهت اهمیت روزافزون استفاده از لمینت‌های پلیمری در مراکز تحقیقاتی و صنعتی از Z-پین‌های در راستای ضخامت به عنوان یکی از روش‌های اصلی تقویت لمینت‌ها در برابر جدایش بین لایه‌ای استفاده می‌شود. Z-پین‌ها باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی لایه لایه شدن می‌شوند [۱]. لمینت‌های دارای Z-پین دستی مهمی از کامپوزیت‌ها با کاربردی برای تقویت بخش‌های ساختاری لمینت‌های کربن/اپوکسی در هواپیمای جنگنده F/A-18 و کاربردهای نوظهور در سایر محصولات مهندسی سبک وزن به شمار می‌روند. Z-پین یک روش شناخته شده برای قرار دادن پین‌های از جنس فلز یا فیبر در راستای ضخامت لمینت‌های پلیمری و ساندویچ پانل‌ها می‌باشند. پین‌های نازک (معمولاً به قطر ۱/۰-۱/۰ میلی‌متر) به صورت متعامد یا در یک زاویه مایل به سطح لمینت‌ها یا ساندویچ پانل‌ها قرار می‌گیرند. جنس Z-پین‌ها تقریباً هر ماده‌ای با کارایی بالا می‌تواند باشد. Z-پین‌ها می‌توانند ویژگی ریزساختاری، خواص مکانیکی، دوام محیطی و سایر ویژگی‌های عملکردی مواد و سازه‌های کامپوزیت‌های پین‌گذاری شده را بهبود ببخشند [۲]. در سال ۱۹۸۷ اولین شواهد مبنی بر بهبود ویژگی‌های به دست آمده با استفاده از فناوری شبیه Z-پین گزارش و ارائه شد. کراسنوف کشف کرد که میله‌های فلزی متمایل به زاویه از جهت ضخامت به طور قابل ملاحظه‌ای در افزایش خواص بین لایه‌ای لمینت‌ها موثر هستند [۳]. توماشفسکی و همکارانش در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ فرایندی را برای وارد کردن الیاف کوتاه با ضخامت شبیه به Z-پین در کامپوزیت‌ها از طریق استفاده از ارتعاشات التراسونیک توصیف کردند [۴]. در طول دهه ۱۹۹۰ شرکت Foster-Miller z-پین‌ها را با عنوان تجاری Z-Fiber TM ثبت کرد [۵،۶].

فناوری آزمون غیر مخرب آکوستیک امیشن^۱ به طور سنتی در سال ۱۹۵۰ با اولین پژوهش جامع جوزف کایزر^۲

پدر فناوری مدرن آکوستیک امیشن در مورد این پدیده آغاز شد. رایج‌ترین تکنیک غیر فعال ارزیابی مکانیزم‌های آسیب روش تست غیرمخرب آکوستیک امیشن می‌باشد. منابع تکنیک غیرفعال ممکن است انتشار آسیب، تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک داخلی و غیره باشند. هدف اصلی پایش سلامت سازه (SHM) استخراج چهار سطح از ویژگی‌ها شامل تشخیص شروع آسیب، تشخیص محل آسیب، شناسایی نوع آسیب و شدت آسیب می‌باشد [۷]. آکوستیک امیشن به عنوان انتقال یک موج تنش الاستیک از طریق مواد که معمولاً از یک منبع داخلی مانند شروع و رشد ترک منشاء می‌گیرد تعریف می‌شود [۸]. برخی از محققین مکانیزم‌های خرابی چند لایه‌های کامپوزیتی را در طول فرآیند بارگذاری به چند حالت طبقه بندی کردند که عبارتند از: ۱- شکست ماتریس ۲- شکست الیاف ۳- جدایش الیاف از رزین ۴- جدایش بین لایه‌ای [۹]. مکانیزم جدایش بین لایه‌ای یک آسیب بین لایه‌ای می‌باشد که ترک ماتریسی منجر به جدا شدن دو لایه شده و عنوان شروع و انتشار بین لایه‌ای تعریف می‌شود [۱۰]. رفاهی اسکویی در سال ۲۰۰۹ با استفاده از تبدیل فوریه امواج آکوستیک امیشن به تعیین محدوده فرکانسی مکانیزم‌های مختلف خرابی و رفتار رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های DCB شیشه/ پلی استر تحت بارگذاری مود I پرداخت [۱۱]. همچنین رفاهی در سال ۲۰۱۱ با استفاده از تابع سنتری^۴ که به عنوان لگاریتم طبیعی نسبت بین انرژی مکانیکی و انرژی آکوستیکی تعریف می‌شود، به مطالعه فرآیند جدایش بین لایه‌ای و ارزیابی چقرمگی شکست بین لایه‌ای در حالت بارگذاری مود I پرداخت [۱۲]. بختیاری و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش آکوستیک امیشن و معرفی تابعی به عنوان تابع سنتری که بیانگر نسبت انرژی مکانیکی به انرژی آکوستیکی نمونه در حین بارگذاری است، موفق شدند لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری مود اول شناسایی کنند [۱۳]. سعیدی فر و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی جدایش بین لایه‌ای و تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در کامپوزیت شیشه/اپوکسی بافته شده و تک جهته با استفاده از روش

³ Structural Health Monitoring

⁴ Sentry Function

¹ Acoustic Emission

² Joseph Kaiser

پژوهشی با طراحی نمونه های FRP^۲ دارای Z-پین و بدون پین گذاری شده با تسلیم یک مکانیزم آسیب خاص که بر رفتار آسیب غالب است، پرداخت. او با ترکیب تشخیص الگوی بدون نظارت با مدلسازی المان محدود از تولید سیگنال، انتشار و تابع انتقال سنسور شناسایی مکانیزم منبع را برای نمونه های FRP با استفاده از آزمون غیرمخرب آکوستیک امیشن در مقیاس آزمایشگاهی به ارمغان آورده است [۱۸]. حبیبی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با تغییر نرخ بارگذاری مواد I به مطالعه رفتار مکانیکی ماده کامپوزیتی با استفاده از امواج آکوستیک امیشن حاصل از این پژوهش پرداختند. در مطالعه آنها با افزایش نرخ بارگذاری، رزین خاصیت الاستیکی خود را از دست داده و نمونه از خود رفتار سخت تری نشان می‌دهد. همچنین مقادیر چقرمگی حاصل از تجمیع سیگنال های آکوستیک امیشن بدست آورده و صحت سنجی کردند [۱۹]. قبل از بیان مسئله پژوهش در این مقاله، پیشینه مطالعات تجربی صورت گرفته بر روی چند لایه‌های کامپوزیتی داری Z-پین پرداخته می‌شود.

پینگ کاراوات^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که بهبود چقرمگی شکست و مقاومت در برابر خستگی مواد I را می‌توان از طریق انتخاب دقیق جنس Z-پین بهینه کرد. صرف نظر از جنس پین، Z-پین ها با تشکیل یک ناحیه پل زدن ترک در مقیاس بزرگ در امتداد ترک های جدایش بین لایه‌های بسیار موثر هستند [۲۰]. مین لی^۴ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ در نتایج تجربی نشان دادند که Z-پین‌های ظریف به طور قابل توجهی چقرمگی شکست بین لایه‌ای را بهبود دادند. Z-پین ها برای حفظ ماندگاری بالای خواص مکانیکی درون صفحه لمینت‌های کامپوزیتی مطلوب بودند [۲۱]. بیشتر مطالعات تجربی صورت گرفته در مورد ویژگی‌های چقرمگی شکست بین لایه ای با استفاده از بارگذاری حالت مواد I نمونه‌های آزمون DCB برای لمینت های Z-پین منتشر شده است. اثر جنس و خواص Z-پین، قطر Z-پین، هندسه Z-پین، زاویه Z-پین در بهبود نرخ آزادسازی انرژی کرنشی حالت بارگذاری مواد I لمینت ها (تقریباً تمام مطالعات انجام شده بر روی کربن/اپوکسی) به

آکوستومکانیکی در انواع بارگذاری مواد I، II و مواد ترکیبی I و II پرداخت. چقرمگی شکست بین لایه ای بدست آمده از روش تابع سنتری پایین ترین حد چقرمگی را در نتایج ارائه کرد [۱۴]. فتوحی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ از روش آکوستیک امیشن برای بررسی مکانیزم های مختلف آسیب جدایش بین لایه‌ای در چند لایه های کامپوزیتی بافته شده و تک جهته شیشه/اپوکسی در انواع بارگذاری مواد بارگذاری مواد I، II و ترکیبی استفاده کرد. تمایز رویداد های AE، ناشی از انواع مختلف مکانیزم های خرابی با استفاده از تبدیل موجک (WPT) و روش خوشه بندی فازی (FCM) مرتبط با تجزیه و تحلیل مولفه اصلی انجام دادند. نتایج فتوحی نشان داد که در همه نمونه‌ها ترک خوردگی ماتریس و جداسازی الیاف از رزین، مکانیزم خرابی غالب می‌باشد. همچنین ماکزیمم درصد شکست الیاف در نمونه‌های تک جهته و حالت مواد I بیش تر از نمونه‌های بافته شده و حالت مواد II بود [۱۵]. مصطفی پور و بهشتی زاده در سال ۲۰۱۶ بر روی آنالیز سیگنال‌های بدست آمده در اثر بارگذاری خمشی سه نقطه بدست آمده کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به روش موجک و چوی ویلیامز کار کردند. استفاده از دو روش موجک و چوی ویلیامز نقاط ضعف و قوت هریک از روش‌ها را مشخص کرد. بر اساس اطلاعات بدست آمده از مقایسه دو نمونه کامپوزیت، مشخص شد که نسبت مدول الاستیک و بیشینه بار قابل تحمل کربن/اپوکسی به شیشه/اپوکسی به ترتیب برابر ۱/۳۶ و ۳/۲۵ می‌باشد و استفاده از روش آنالیز موجک پردازش سیگنال‌های بهتری برای این نوع بارگذاری و مواد دارد [۱۶]. زکی زاده در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی مکانیزم‌های آسیب حاصل از ضربه سرعت پایین بر روی پانل‌های ساندویچی شیشه/پلی استر-فوم با استفاده از روش آکوستیک امیشن پرداخت. نتایج زکی زاده نشان داد که مقاومت به ضربه برای پانل های ساندویچی با زاویه لایه چینی متعامد از بقیه نمونه ها بیش تر بوده و شکست الیاف با انرژی بالا و در نتیجه محدوده فرکانسی بالاتر رخ می‌دهد. همچنین به محاسبه عمر باقی مانده کامپوزیت‌های ساندویچ پانل پرداخت. [۱۷]. آندریاس جی برونر^۱ در سال ۲۰۱۸ در

² Fiber-reinforced polymer

³ Pingkarawat

⁴ Li, M

¹ AndreasJ. Brunner

جدول ۱- طرح لایه چینی با زوایای مختلف برای نمونه‌ها

ابعاد	لایه چینی	کد نمونه
۱۸۰×۲۵×۵	[0] _{6S}	U ₁
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-90/+90] _{2S} 0 _{2S}]	U ₂
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-45/+45] _{2S} 0 _{2S}]	U ₃
۱۸۰×۲۵×۵	[0] _{6S}	SZ ₁
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-90/+90] _{2S} 0 _{2S}]	SZ ₂
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-45/+45] _{2S} 0 _{2S}]	SZ ₃
۱۸۰×۲۵×۵	[0] _{6S}	CuZ ₁
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-90/+90] _{2S} 0 _{2S}]	CuZ ₂
۱۸۰×۲۵×۵	[0 _{2S} [-45/+45] _{2S} 0 _{2S}]	CuZ ₃

صورت تجربی مورد پژوهش قرار گرفته است. میزان بهبود چقرمگی حالت مود I عمدتاً توسط مکانیزم پل زنی ترک و پل زدن الیاف در اثر Z-پین‌ها تعیین می‌شود. با توجه به پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته بر روی چند لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش آکوستیک امیشن، بیش‌تر مطالعات تجربی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی بافته شده و تک جهته صورت گرفته و کم‌تر به نمونه‌هایی با قرارگیری لمینت‌ها و الیاف در زاویه‌های متفاوت با راستای رشد جدایش در مود I پرداخته شده است. از این رو در مطالعه حاضر به بررسی جدایش بین لایه‌ای در چند لایه‌های کامپوزیتی پین گذاری شده در راستای ضخامت از جنس فولاد و مس تحت لایه چینی مختلف و بارگذاری مود I می‌پردازیم.

۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱ آماده سازی نمونه آزمایش

در جدول (۱) طرح لایه چینی و ابعاد و کد گذاری نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است. نمونه‌ها تحت استاندارد ASTM D5528-01 [۲۲] ساخته شده‌اند. نمونه‌ها به دو دسته Z-پین و بدون پین تقسیم شده و دارای لایه چینی زاویه الیاف میانی ۰ و $\pm 45^\circ$ و $\pm 90^\circ$ درجه می‌باشند. در مجموع از بین ۹ نمونه ساخته شده، ۶ نمونه دارای Z-پین بوده و ۳ نمونه بدون پین می‌باشد. به تعداد ۶ لایه الیاف برای هر نمونه به کار رفته است. علائم U و Z و S و CU به ترتیب بیانگر اختصاری Unpinned و Z-pin و Steel و Copper می‌باشد. همچنین اندیس‌های ۱، ۲، ۳ به ترتیب مربوط به زوایای الیاف لایه میانی ۰، $\pm 90^\circ$ و $\pm 45^\circ$ درجه می‌باشد.

از رزین پلی استر ایزوفتالیک با چگالی $\frac{gr}{cm^3}$ 12/1 به عنوان فاز زمینه و الیاف شیشه نوع ای^۱ به عنوان تقویت کننده استفاده شد. از الیاف شیشه به صورت تک جهته با چگالی ۴۰۰ گرم بر متر مربع استفاده شد. با در نظر گرفتن تقریبی ضخامت هر لایه (لمینت) ۱ میلی متر، ضخامت هر یک از نمونه‌های آزمون DCB ۵ میلی‌متر می‌باشد. کامپوزیت‌های شیشه/پلی استر به صورت لایه گذاری دستی ساخته شده‌اند. به منظور ایجاد پیش ترک اولیه در نمونه‌ها یک لایه تفلون به ضخامت تقریبی $20\ \mu m$ در بین دو لایه میانی قرار داده شد. همچنین از کبالت نفتانات ۱٪ به عنوان شتاب دهنده در رزین و متیل اتیل پراکساید ۴٪ به عنوان هاردنر (سفت کننده) با نسبت مخلوط رزین به هاردنر ۱۰۰ به ۱۵ استفاده شده است. ۲۰ دقیقه به عنوان ژل تایم و ۱ ساعت پخت اولیه در دمای محیط و پس از آن به منظور اطمینان از فرایند پخت کامل و دستیابی به بهترین خواص مکانیکی یک ساعت در دمای ۸۰ درجه در کوره پخته شد. قطر Z-پین‌های مورد استفاده در نمونه‌های پین گذاری شده، ۱ میلی متر بوده است. پین مورد استفاده در این لمینت‌ها از مفتول‌های فولادی و مسی تهیه شده و هنگام لایه چینی نمونه‌ها در میان لایه‌ها به کار گرفته شد.

۲-۲ روش انجام آزمایش

آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D5528-01 انجام شد. نمونه‌های پین گذاری شده و بدون پین به ترتیب

¹ E-Glass

آزمایش از سیستم آکوستیک امیشن چهار کاناله شرکت میوا با نرخ نمونه برداری ۶۵ MHz به همراه نرم افزار AE MAP استفاده گردید. از یک سنسور پیزو الکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع استفاده شد. میزان محدوده بهینه کاری سنسور ۱۰۰-۷۵۰ KHz می باشد. رویدادها و فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور به وسیله پیش تقویت کننده با ضریب ۴۰ db تقویت شدند. برای دریافت بهترین سیگنال و اتصال مناسب بین نمونه و سنسور از گریس سیلیکون خلا شده استفاده شد.



شکل ۳- نحوه ی قرارگیری نمونه بر روی دستگاه کشش در بارگذاری مود I



شکل ۴- اجزای دستگاه آکوستیک امیشن شامل سنسور و پیش تقویت کننده و پردازشگر

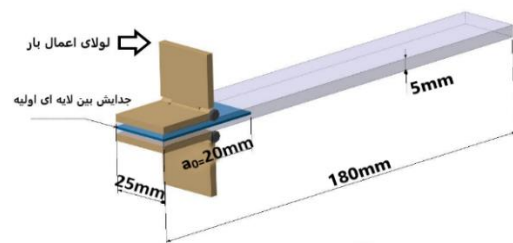


شکل ۵- نمایی از رشد ترک جدایش در نمونه Z-پین

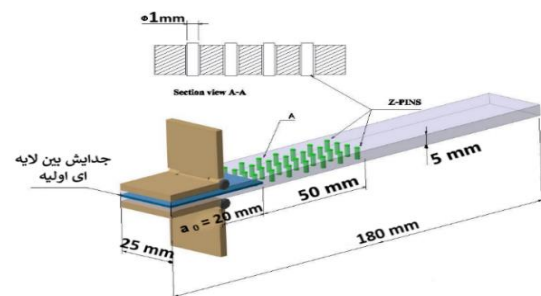
۳- چقرمگی شکست بین لایه‌ای

میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک بین لایه‌ای را چقرمگی شکست بین لایه‌ای (نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی) می‌گویند. این مقادیر و خاصیت میزان مقاومت نمونه در برابر رشد جدایش بین لایه‌ای را نشان می‌دهد.

مطابق شکل های (۱) و (۲) تحت بارگذاری مود I قرار داده شدند. در بارگذاری مود I نمونه های دارای جدایش بین لایه ای اولیه به نحوی تحت اثر بار قرار گرفته، که لایه‌های دارای ترک نسبت به یکدیگر باز می‌گردند و از هم فاصله می‌گیرند. این بازشوندگی در یک صفحه در امتداد یکدیگر رخ می‌دهد و در اثر کشش خالص، قطعه شکسته می‌شود. نرخ پیشروی در آزمایش مود I در ۵ mm/min در نظر گرفته شد. داده‌های مقادیر نیرو و جابجایی توسط دستگاه کشش ثبت شده است. همچنین برای ثبت مقادیر رشد ترک جدایش، قبل از انجام آزمایش بر روی طول هر یک از نمونه‌ها به مانند خط کش به فواصل ۲ mm از هم مدرج شده بود. مقدار رشد ترک جدایش بین لایه ای به صورت چشمی و بصری ثبت گردید.



شکل ۱- شماتیک نمونه DCB بدون بین گذاری در آزمایش



شکل ۲- شماتیک نمونه DCB بین گذاری شده در آزمایش

۳-۲ دستگاه‌های آزمایش

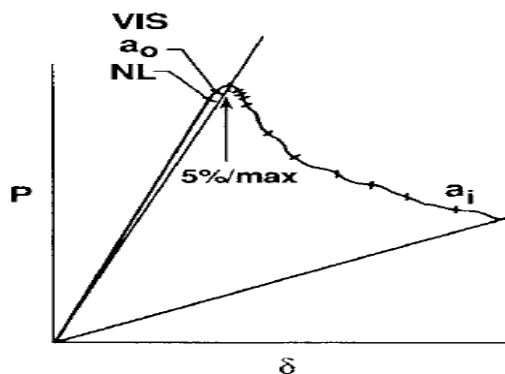
از دستگاه کشش مدل Z100 ساخت کمپانی Zwick/Roell به ظرفیت ۱۰۰ KN استفاده شد. بدین صورت ابتدا بعد از اتصال و چسباندن لولا به نمونه های کامپوزیتی، نمونه‌های چند لایه را از طریق لولا به گیره فک بالایی و پایینی دستگاه وصل کرده و تست بازشوندگی را برای ثبت اطلاعات مود I جدایش بین لایه‌ای انجام داده شد. برای ثبت اطلاعات داده‌های آکوستیکی در هنگام اجرای

نیروی بحرانی بر اساس استاندارد ASTM D5528-01 تعیین می‌شود.

۴-۱-۱ نمودار نیرو-جابجایی-رشد ترک نمونه‌ها

بر اساس استاندارد ASTM D5528-01 می‌توان نمودار نیرو-جابجایی هر نمونه را به سه ناحیه تقسیم کرد: الف) قبل از غیر خطی شدن نمودار، ب) بعد از غیر خطی شدن منحنی تا نیروی ماکزیمم ج) بعد از مقدار نیروی ماکزیمم نمودار. در استاندارد ASTM D5528-01 برای تعیین نیرو بحرانی از سه روش پیشنهادی برای تشخیص شروع رشد ترک بیان شده است. سه روش پیشنهادی استاندارد عبارتند از:

- ۱- مقدار بار بحرانی متناظر با نقطه‌ی غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی (روش NL)
 - ۲- نیروی بحرانی متناظر با تقاطع خطی با نرمی ۵٪ کمتر از نرمی اولیه نمودار نیرو-جابجایی به عنوان نقطه آغاز شروع جدایش یا بار ماکزیمم (روش Max / %5)
 - ۳- تشخیص چشمی و بصری رشد جدایش (روش VIS)
- شکل (۷) موقعیت بار بحرانی را براساس سه روش پیشنهادی استاندارد بر روی نمودار نیرو-جابجایی نشان می‌دهد.



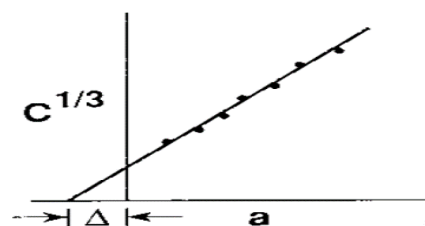
شکل ۷-موقعیت بار بحرانی آغاز رشد ترک در روش های مختلف استاندارد [۲۲]

برای تعیین و محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای (انرژی شکست بین لایه‌ای) مود I سه روش بر اساس استاندارد ASTM D5528-01 وجود دارد:

- ۱- تئوری تیر اصلاح شده^۱
 - ۲- روش کالیبراسیون نرمی^۲
 - ۳- روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده^۳
- طبق استاندارد ASTM D5528-01 نزدیک ۸۰٪ چقرمگی شکست بین لایه‌ای محاسبه شده برای نمونه‌ها از روش تئوری تیر اصلاح شده بدست می‌آید. این روش مورد پیشنهاد استاندارد می‌باشد. با توجه به مکانیزم اعمال نیرو برای مود I و با استفاده از تئوری تیر اصلاح شده، نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی برای هر یک از نمونه‌ها از معادله (۱) به دست می‌آید [۲۲]:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (1)$$

G_{IC} نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی مود I، P نیروی اعمال شده بر روی نمونه، a طول جدایش بین لایه‌ای، b عرض نمونه، $|\Delta|$ مقدار اصلاحی طول ترک و δ مقدار جابجایی متناظر با نقطه اعمال بار در معادله (۱) تعریف می‌شوند. مقدار اصلاحی $|\Delta|$ با استفاده از مقادیر نمودار ریشه سوم نرمی ($C^{1/3}$) در برابر طول ترک به دست می‌آید. نحوه بدست آوردن مقدار اصلاحی $|\Delta|$ در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- نحوه تعیین پارامتر اصلاحی Δ در نمودار $C^{1/3}$ [۲۲]

۴- نتایج و بحث

۴-۱ نتایج مکانیکی

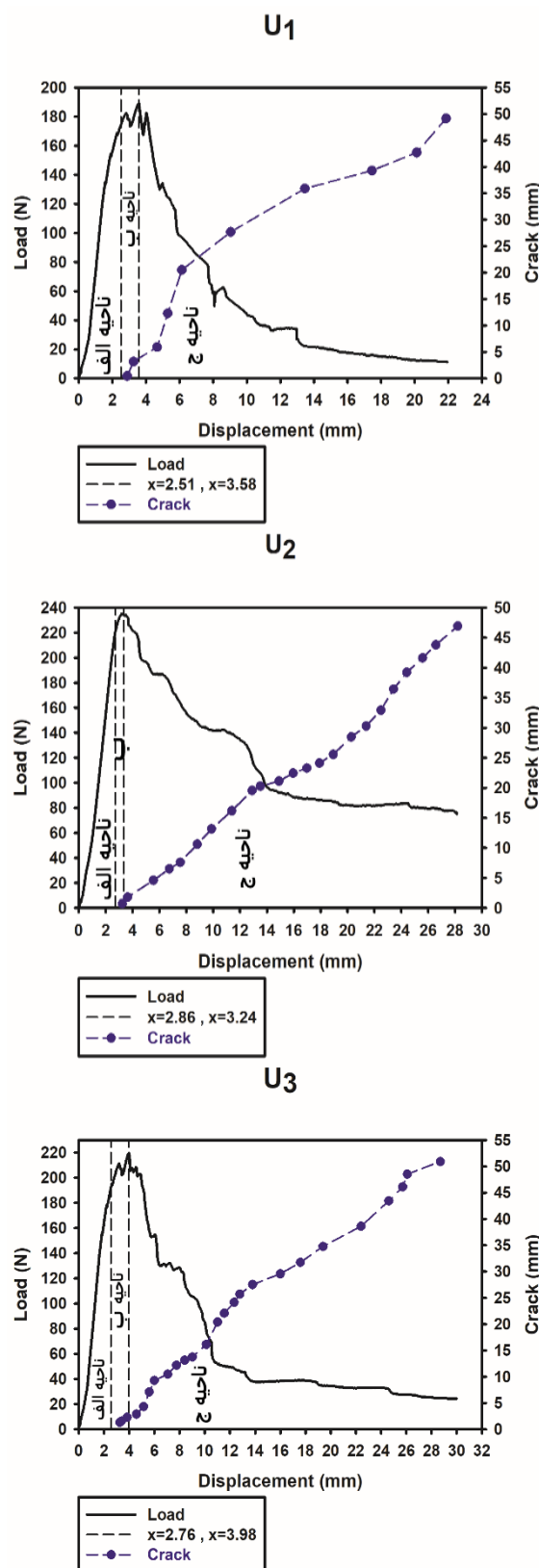
در این بخش به بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی-رشد ترک نمونه‌های مورد آزمایش پرداخته می‌شود. همچنین

¹ Modified Beam Theory

² Compliance Calibration (CC) Method

³ Modified Compliance Calibration (MCC)

در نمودارهای نیرو-جابجایی به ترتیب نقاط متناظر با غیر خطی شدن و نیرو ماکزیمم زیر نمودار نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) ابتدای بارگذاری بازشوندگی مود a، نیرو و جابجایی رابطه خطی دارند. در حالت کلی در قسمت الف نمودارهای نیرو-جابجایی، رفتار تمامی نمونه‌ها مثل هم بوده و رشد ترک مشاهده نمی‌شود. در قسمت الف نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در قطعات کمتر از نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی بوده و جدایش بین لایه‌های رشدی را نداشته است. مقدار نیروی بحرانی نمودار متناظر با نقطه غیر خطی شدن در این قسمت برای نمونه‌های بدون پین با توجه به نحوه‌ی لایه چینی زاویه الیاف میانی، متفاوت می‌باشد. ناحیه الف قسمت الاستیک نمونه بوده که بعد از رسیدن به مقدار نیروی بحرانی، نمودار از حالت خطی خارج شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. تفاوت‌هایی که در ناحیه الف از نمودارها قابل رویت است به خاطر تفاوت مدول الاستیسیته موثر نمونه‌ها با یکدیگر می‌باشد. از این جهت مقدار نیروی بحرانی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در بدو ورود نمونه به ناحیه پلاستیک قابل بررسی است. همچنین جابجایی ناحیه الاستیک که حاکی از مقاومت بیش تر نمونه در برابر جدایش بین لایه‌های دارد، برای نمونه U_2 نسبت به بقیه نمونه‌های بدون پین بیش تر می‌باشد. پدیده پل زنی الیاف در ناحیه ب آغاز می‌شود. بعد از پل زدن الیاف در ناحیه ب، نیرو روند افزایشی را در پیش گرفته تا به مقدار ماکزیمم خود رسیده و بر پل زدن الیاف غلبه کند. از این رو در ناحیه پلاستیک جدایش بین لایه‌های مقداری رشد کرده و با ورود به ناحیه ج با غلبه بر نیروی پل زنی رشد ترک افزایش قابل توجه‌ای می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که از بین نمونه‌های بدون پین در نمونه U_2 با لایه چینی زاویه الیاف میانی $\pm 90^\circ$ به علت متعام بودن راستای رشد ترک با الیاف لایه میانی، مقدار نیروی بحرانی در مقایسه با سایر نمونه‌های بدون پین بیش تر بوده است. همچنین با توجه به راستای رشد ترک، در نمونه‌های U_2 و U_3 با تاخیر در پدیده پل زنی الیاف در ناحیه ب مقدار نیروی ماکزیمم بیشتری نسبت به نمونه U_1 مشاهده می‌شود. در ناحیه ب نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های بدون پین مقدار جابجایی خیلی کمی (کم تر از ۱/۵ میلی متر) مشاهده می‌شود. مقدار آهنگ رشد ترک در



شکل ۸- نمودارهای نیرو-جابجایی-رشد ترک نمونه‌های U_1 ، U_2 و U_3 (نمونه‌های بدون پین)

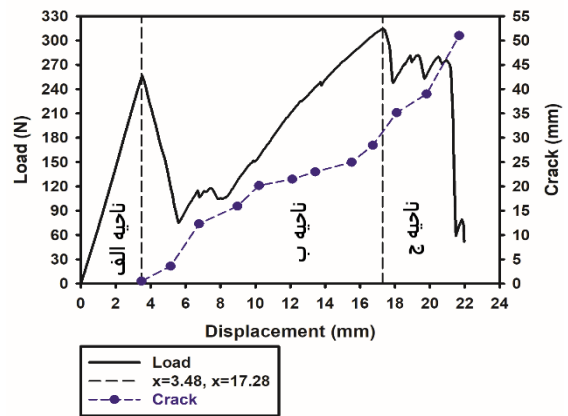
با نمونه‌های بدون پین و یکسان از لحاظ لایه چینی زاویه الیاف میانی مطابق شکل (۸)، مقدار عددی بیش تری را نشان می‌دهد. این افزایش نیروی بحرانی در نمونه‌های دارای Z-پین حاکی از نقش تقویت کنندگی و مقاومتی Z-پین‌های مسی در برابر رشد جدایش بین لایه‌های را دارد. اختلاف نیرو مربوط به ناحیه B به دلیل وجود منطقه پین گذاری شده در نمونه‌های Z-پین مسی در مقایسه با نمونه‌های بدون پین بیش تر است. همچنین در نمونه‌های CuZ_2 و CuZ_3 به دلیل رشد ترک در منطقه پین گذاری شده افت نیرو کمتری در هنگام ورود به ناحیه پلاستیک (ب) مشاهده می‌شود. با توجه به نحوی پین گذاری یکسان در نمونه‌های شکل (۹)، به ترتیب نمونه CuZ_2 با لایه چینی زاویه الیاف میانی $\pm 90^\circ$ به علت قراگیری راستای الیاف میانی در راستای عمود بر رشد ترک، مقدار بار بحرانی بیش تری برای آغاز جدایش بین لایه‌های نسبت به نمونه‌های CuZ_3 و CuZ_1 نشان می‌دهد. در نمونه CuZ_1 با لایه چینی زاویه الیاف میانی 0° درجه، ابتدا با وارد شدن نمودار به ناحیه پلاستیک افت نیرو قابل ملاحظه‌ای مشاهده شده و با توجه به ورود ترک به منطقه Z-پین، باعث مقاومت در برابر رشد جدایش بین لایه‌های و به تاخیر انداختن رشد ترک به واسطه پل زنی الیاف و پل زده شدن ترک می‌شود. در ناحیه پلاستیک نمونه‌های Z-پین علاوه بر پل زنی الیاف، Z-پین‌ها باعث پل زده شدن ترک و رشد زیگزاگ گونه جدایش بین لایه‌های می‌شوند. آهنگ رشد در نمودار نمونه CuZ_1 بیش تر می‌باشد. [۲۳]



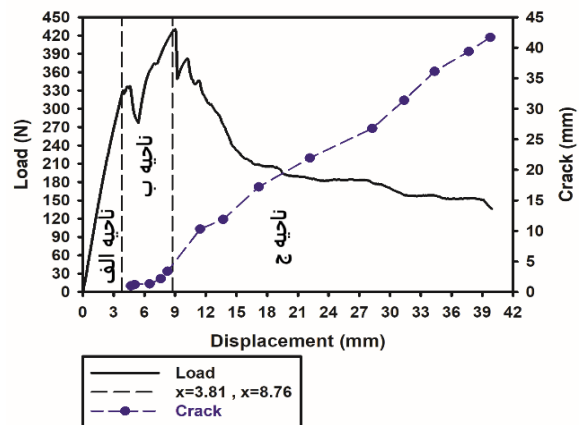
شکل ۱۰- نمایی از ناحیه پین گذاری شده در نمونه Z-پین مسی

نمونه U_1 در بازه‌های ورود به ناحیه ج نسبت به نمونه‌های U_2 و U_3 بیش تر است.

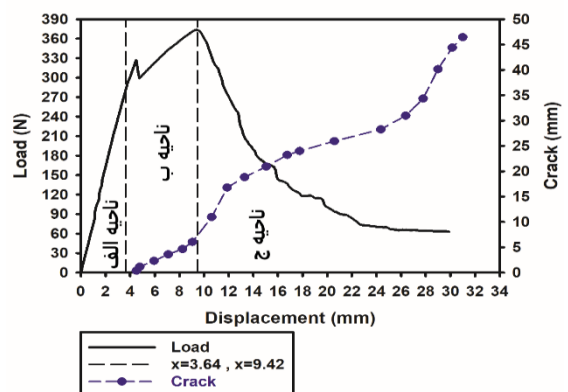
CuZ₁



CuZ₂



CuZ₃



شکل ۹- نمودارهای نیرو-جابجایی-رشد ترک نمونه‌های CuZ_1 ، CuZ_2 و CuZ_3 (پین گذاری مسی)

با توجه به شکل (۹) مقدار نیروی بحرانی متناظر با غیرخطی شدن نمودار و ورود به ناحیه پلاستیک در مقایسه

با توجه به شکل (۱۱) علاوه بر تقسیم نمودار نیرو-جابجایی نمونه های Z-پین فولادی به ۳ ناحیه، مشاهده می شود که مقدار بار بحرانی برای نمونه SZ₂ بیش تر بوده است. همچنین در نمونه SZ₂ مقدار جابجایی ناحیه الاستیک (الف) آن در مقایسه با دو نمونه SZ₁ و SZ₃ بیش تر می باشد. مقدار افت نیرو در ناحیه ج برای نمونه SZ₃ نسبت به دو نمونه دیگر کم تر بوده و به صورت پلکانی افت کرده و در انتها نمودار نیرو-جابجایی روند ثابتی در هنگام جدایش بین لایه‌ای در پیش می‌گیرد. [۲۳]

با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) و (۱۱) نیروی بحرانی، نیروی ماکزیمم و جابجایی ناحیه الاستیک با فرض مقایسه یکسان بودن زاویه الیاف در لایه چینی، در نمونه Z-پین فولادی بیش تر می باشد.

در جدول (۲) مقادیر نیروی بحرانی بدست آمده متناظر با نقطه غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از نمونه‌ها با توجه به نحوی پین گذاری آورده شده است.

جدول ۲- نیروی بحرانی متناظر با نقطه غیر خطی شدن نمودار

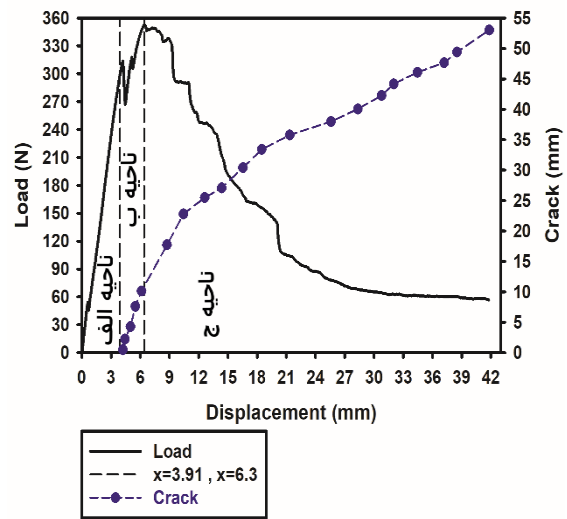
بار بحرانی غیر خطی (N)	نوع پین گذاری	کد نمونه
۱۷۴/۴۶	Unpinned	U ₁
۲۲۶/۸۰	Unpinned	U ₂
۱۹۷/۵۶	Unpinned	U ₃
۲۹۸/۶۶	Steel z-pins	SZ ₁
۴۱۲/۲۶	Steel z-pins	SZ ₂
۳۷۲/۵۸	Steel z-pins	SZ ₃
۲۵۳/۴۱	Copper z-pins	CuZ ₁
۳۲۳/۶۳	Copper z-pins	CuZ ₂
۲۸۱/۲۴	Copper z-pins	CuZ ₃

مطابق با استاندارد ASTM D5528-01 از رابطه (۲) برای محاسبه مدول موثر برای نمونه‌های تحت بارگذاری مود I جدایش بین لایه‌ای استفاده می‌شود [۲۲].

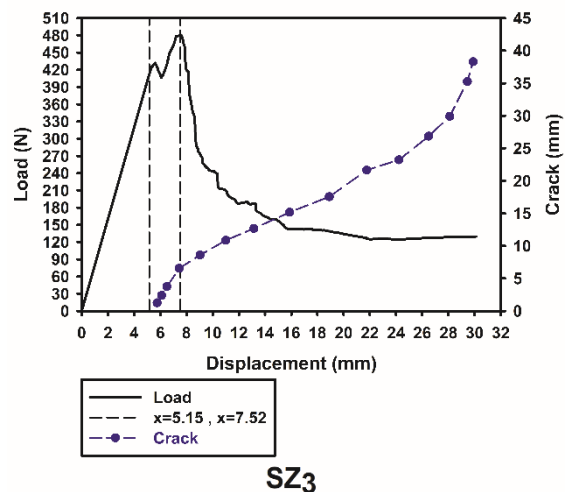
$$E_{eff-mode I} = \frac{8a^3P}{bh^3\delta} \quad (2)$$

در رابطه (۲) نیروی اعمال شده به نمونه، δ جابجایی، h نصف ضخامت نمونه، b عرض نمونه و a طول جدایش بین لایه‌ای نمونه می‌باشد.

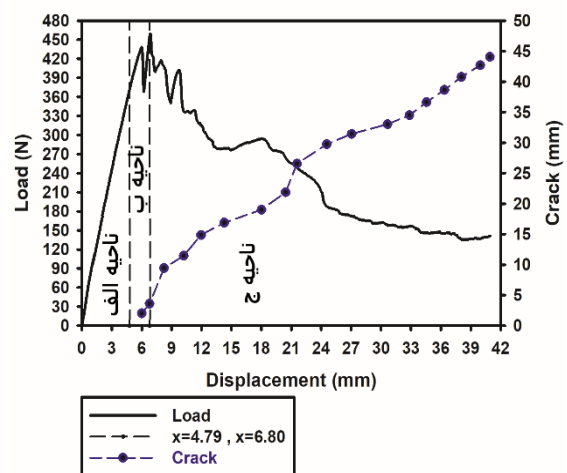
SZ₁



SZ₂



SZ₃



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی-رشد ترک نمونه های SZ₁، SZ₂ و SZ₃ (پین گذاری فولادی)

جدول ۳- مقادیر مدول موثر برای نواحی الف و ب نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها

کد نمونه	مدول موثر ناحیه الف (Gpa)	مدول موثر ناحیه ب (Gpa)	جابجایی در لحظه غیر خطی شدن (mm)
U1	۱۱/۴۰	۳/۹۳	۲/۵۱
U2	۱۳/۰۸	۶/۷۷	۲/۸۶
U3	۱۲	۵/۸۲	۲/۷۶
SZ1	۱۲/۵۵	۶/۲۱	۳/۹۱
SZ2	۱۳/۹۷	۹/۱۳	۵/۱۵
SZ3	۱۲/۸۸	۷/۵۲	۴/۷۹
CuZ ₁	۱۱/۸۷	۶/۰۵	۳/۴۸
CuZ ₂	۱۳/۲۶	۷/۹۸	۳/۸۱
CuZ ₃	۱۲/۶۶	۷/۲۳	۳/۶۴

بار متناظر مربوط به هر یک از سه روش پیشنهادی استاندارد ASTM D5528-01 آورده شده است. بار بحرانی بدست آمده از نقطه غیر خطی شدن نمودار کم ترین مقدار و همچنین بار بحرانی روش چشمی نیز بیشترین مقدار می‌باشد. به همین دلیل استاندارد روش غیرخطی شدن (NL) را ارجحیت می‌دهد.

جدول ۴- نیروی بحرانی استاندارد ASTM D5528-01

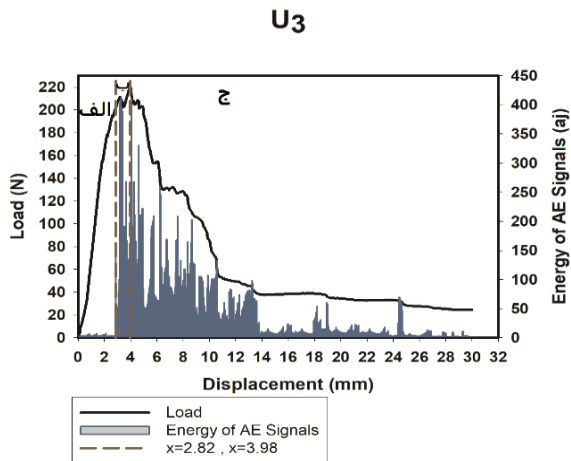
کد نمونه	NL	Max%5	VIS
U ₁	۱۷۴/۴۶	۱۸۰/۱۱	۱۸۲/۳۳
U ₂	۲۲۶/۸۰	۲۳۱/۱۰	۲۳۳/۹۳
U ₃	۱۹۷/۵۶	۲۰۹/۷۶	۲۱۴/۸۱
SZ ₁	۲۹۸/۶۶	۳۰۹/۴۶	۳۱۵/۸۲
SZ ₂	۴۱۲/۲۶	۴۱۴/۰۲	۴۲۵/۵۱
SZ ₃	۳۷۲/۵۸	۴۱۷/۳۳	۴۲۸/۱۵
CuZ ₁	۲۵۳/۴۱	۲۵۸/۶۳	۲۶۳/۷۱
CuZ ₂	۳۲۳/۶۳	۳۲۵/۱۶	۳۳۵/۹۷
CuZ ₃	۲۸۱/۲۴	۳۱۸/۳۴	۳۲۳/۸۱

۴-۲ نتایج تست غیرمخرب آکوستیک امیشن

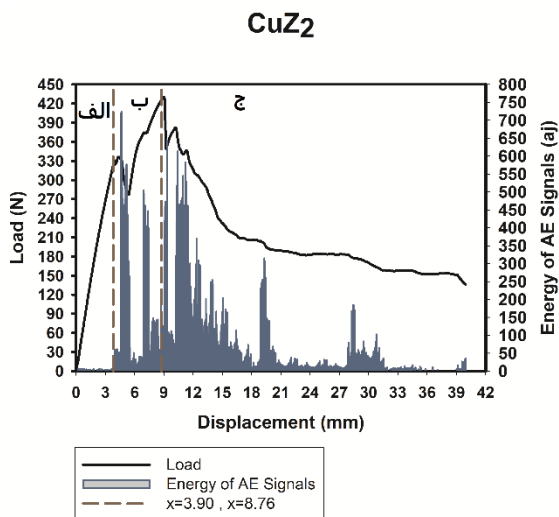
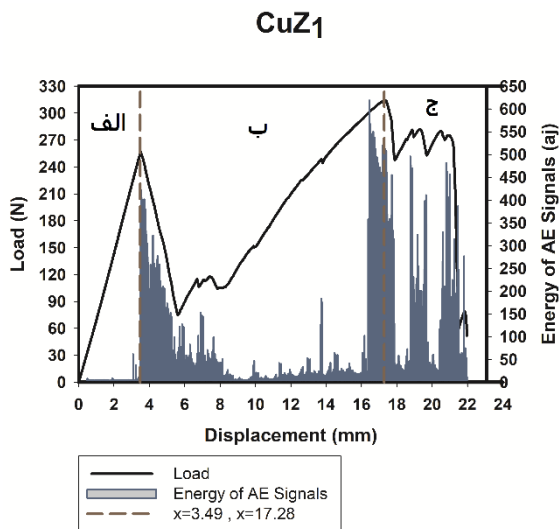
۴-۲-۱ نمودار نیرو-جابجایی-انرژی آکوستیکی

با توجه به نمودار نیرو-جابجایی-انرژی آکوستیکی می‌توان بر اساس پارامتر انرژی سیگنال، نمودار نیرو-جابجایی را به سه ناحیه تقسیم بندی کرد. سیگنال ضعیف اولیه ناشی از جدا شدن تفلون از نمونه و اصطکاک بین لایه‌ها می‌باشد. در حالت کلی در ناحیه الف انرژی سیگنال قابل ملاحظه که نشانگر مکانیزم‌های خرابی باشد، مشاهده نمی‌شود. با ورود نمودار از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک مکانیزم‌های خرابی از جمله ترک خوردگی و شکست ماتریس، انرژی آکوستیکی به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. بنابراین با افزایش قابل توجه مقدار عددی انرژی سیگنال، اولین نقطه جابجایی متناظر با آن را به عنوان نقطه بحرانی برای هر نمونه در نظر گرفته شده و طبق آن نیروی متناظر با آن در نمودار نیرو-جابجایی به عنوان بار بحرانی تشخیص یافته توسط روش انرژی سیگنال در نظر گرفته می‌شود. در نزدیکی بار ماکزیمم با شروع رشد جدایش بین ناحیه‌ای انرژی رویدادهای آکوستیکی افزایش می‌یابد. در ناحیه ج بیشترین مکانیزم‌های خرابی نمونه‌های کامپوزیتی به وقوع می‌پیوندد. انرژی رویدادهای آکوستیک

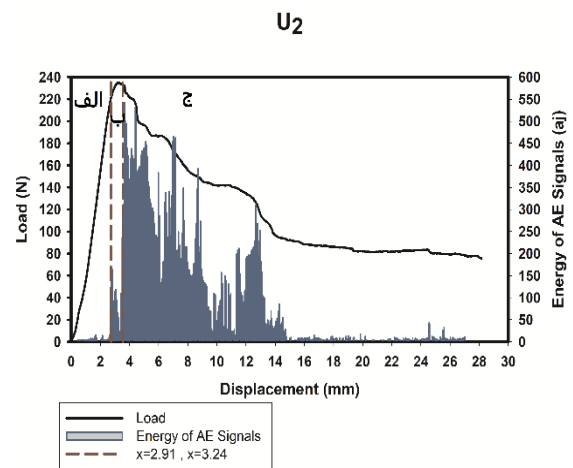
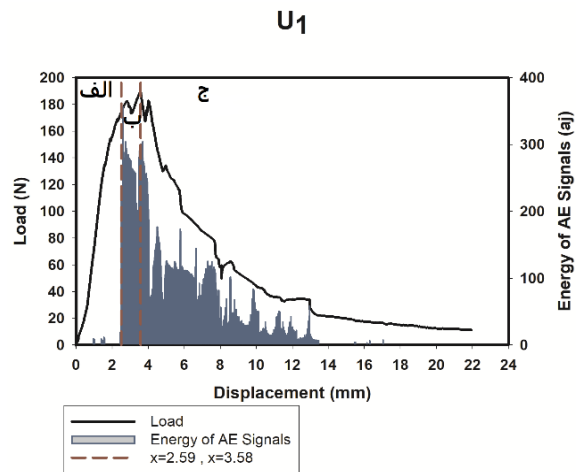
با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود در ناحیه الف با تغییر زاویه میانی الیاف از ۰ به ۴۵ ± و از ۴۵ ± به ۹۰ ± درجه، مدول موثر برای نمونه‌های یکسان از لحاظ پین گذاری افزایش یافته که نشان از مقاومت در برابر جدایش بین لایه‌های نمونه‌های ۹۰ ± درجه نسبت به نمونه‌های ۴۵ ± و سپس ۰ درجه می‌باشد. برای نمونه‌های SZ₂ و CuZ₂ با زاویه الیاف میانی ۹۰ ± به ترتیب مدول موثر ۶ درصد و ۲ درصد افزایش نسبت به نمونه U₂ داشته‌اند. در نمونه‌های SZ₃ و CuZ₃ نیز به ترتیب مدول موثر ۷ و ۵ درصد افزایش نسبت به نمونه U₃ دارند. در حالت کلی می‌توان گفت دو عامل Z-پین و لایه چینی زاویه میانی الیاف در مدول موثر نمونه‌ها تاثیر گذار هستند. در واقع با پین گذاری کردن نمونه‌ها مدول موثر افزایش می‌یابد. در ناحیه ب با غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی که همراه با پل زنی الیاف و پل زدن ترک توسط Z-پین بوده، مقدار مدول موثر در مقایسه با ناحیه الف کاهش پیدا می‌کند. افت مدول موثر در ناحیه ب برای نمونه‌های بدون پین بیش تر بوده است. با توجه به جدول (۳) در نمونه U₁، SZ₁ و CuZ₁ در مقایسه با سایر نمونه‌ها از افت مدول بیش تری برخوردارند. در واقع می‌توان گفت در نمونه‌هایی که زاویه الیاف میانی آنها ۰ درجه می‌باشد با توجه به اینکه پل زنی الیاف در مقایسه با بقیه نمونه‌هایی که لایه چینی زاویه الیاف میانی مختلفی دارند، زودتر اتفاق افتاده و مقاومت کمتری نشان می‌دهند. در نتیجه کاهش مدول موثر آنها نیز بیشتر است. در جدول (۴)

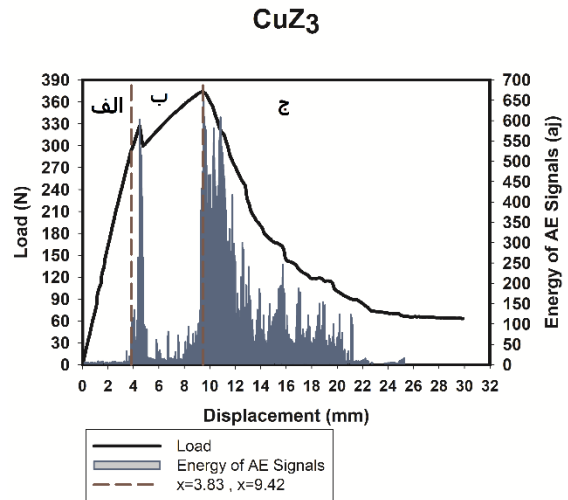
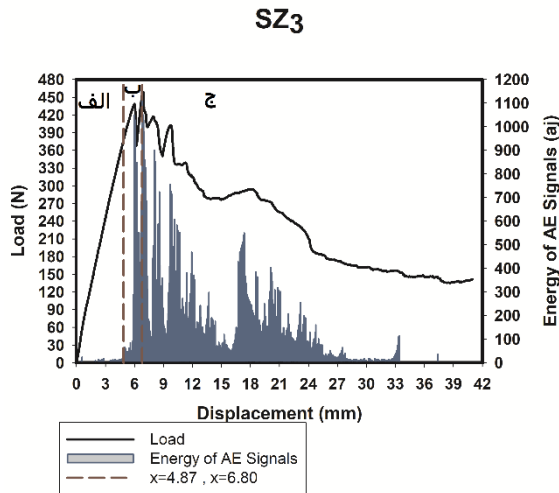


شکل ۱۲- نمودارهای انرژی آکوستیک نمونه های U_1 ، U_2 و U_3



امیشن مشخص شده در نمودار گسسته بوده و مقادیر متفاوتی را در نقاط مختلف نشان می‌دهد. مقادیر انرژی رویدادهای آکوستیکی با افت مقادیر نیرو که کاهش انرژی کرنشی را در پی دارد، افزایش می‌یابد. بنابراین با شروع ناحیه ج تعداد سیگنال‌های آکوستیک امیشن افزایش یافته و به تبع آن مقدار انرژی آکوستیکی در مقایسه با سایر نواحی الف و ب بیش تر است. مکانیزم‌های مختلف خرابی، سیگنال‌های آکوستیکی را با سطح انرژی مختلف ایجاد می‌کنند. در نمودارهای انرژی سیگنال آکوستیکی جابجایی متناظر با بار بحرانی و نیروی ماکزیمم بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی-انرژی آکوستیکی نوشته شده است. [۱۱،۱۰]





شکل ۱۴- نمودارهای انرژی آکوستیک نمونه‌های SZ_1 ، SZ_2 و SZ_3

شکل ۱۳- نمودارهای انرژی آکوستیک نمونه‌های CuZ_1 ، CuZ_2 و CuZ_3

جدول (۵) مقدار نیروی بحرانی بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی-انرژی سیگنال آکوستیک امیشن متناظر با اولین افزایش قابل توجه انرژی سیگنال AE به عنوان معیار برای شروع آسیب را نشان می‌دهد.

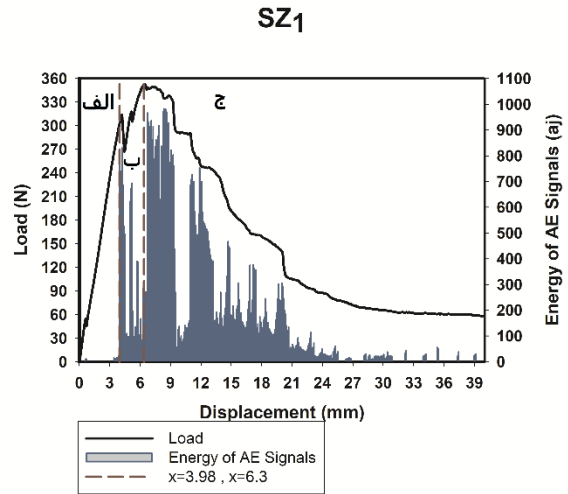
جدول ۵- نیروی بحرانی بدست آمده از نمودار انرژی آکوستیک

امیشن		
بار بحرانی AE Energy(N)	نوع پین گذاری	کد نمونه
۱۷۶/۹۶	Unpinned	U1
۲۲۸/۸۲	Unpinned	U2
۲۰۱/۵۴	Unpinned	U3
۳۰۴/۶۸	Steel z-pins	SZ1
۴۱۷/۲۴	Steel z-pins	SZ2
۳۷۶/۹۹	Steel z-pins	SZ3
۲۵۶/۸۴	Copper z-pins	CuZ ₁
۳۲۸/۸۳	Copper z-pins	CuZ ₂
۲۹۳/۵۶	Copper z-pins	CuZ ₃

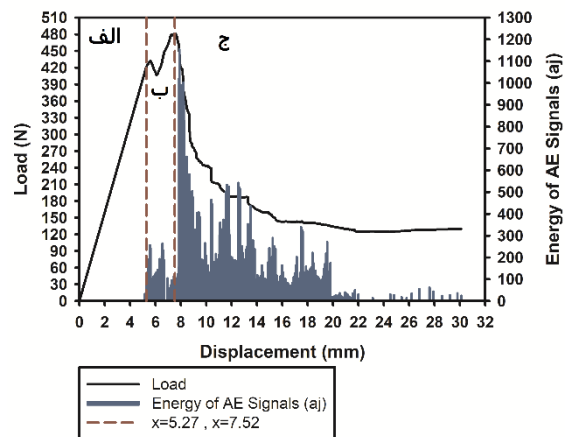
۲-۲-۴ نمودار نیرو-جابجایی-انرژی تجمعی

با تعیین با بحرانی از نمودار مجموع انرژی آکوستیک امیشن می‌توان به تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای پرداخت. افزایش انرژی تجمعی آکوستیک امیشن ناشی از فعال شدن مکانیزم‌های شکست چند لایه‌های کامپوزیتی می‌باشد. به منظور تعیین نیروی بحرانی متناظر با آغاز شروع جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها، اولین لحظه‌ای که شیب نمودار مجموع انرژی آکوستیکی از صفر به مقداری مثبتی افزایش می‌یابد یا افزایش جهش توجهی مشاهده شود، متناظر با شروع جدایش می‌باشد. نیروی متناظر با این

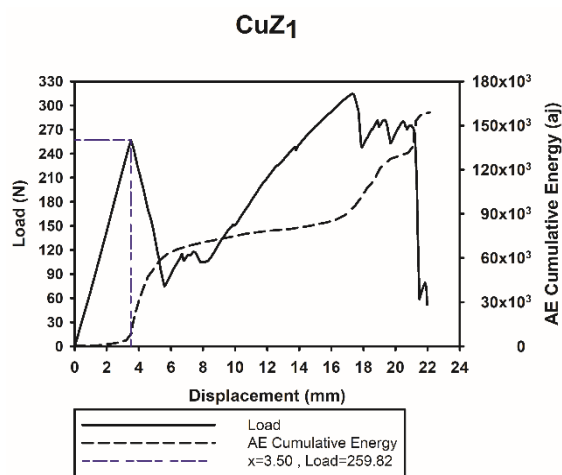
شکل ۱۳- نمودارهای انرژی آکوستیک نمونه‌های CuZ_1 ، CuZ_2 و CuZ_3



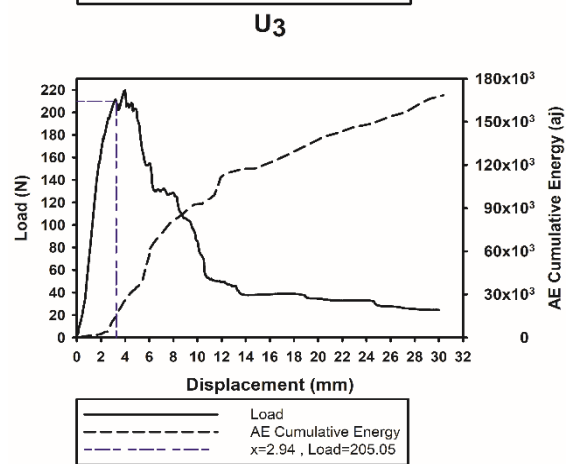
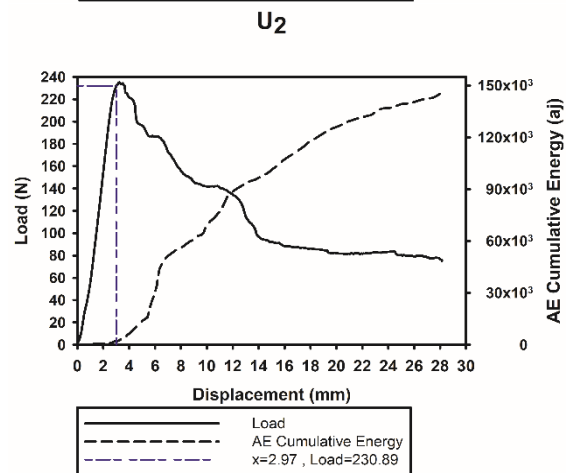
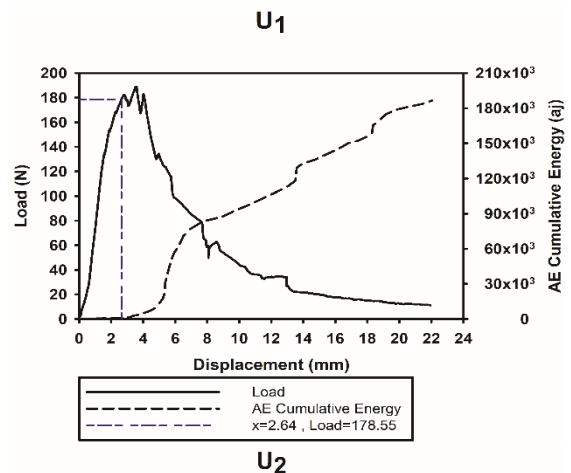
شکل ۱۴- نمودارهای انرژی آکوستیک نمونه‌های SZ_1 ، SZ_2 و SZ_3



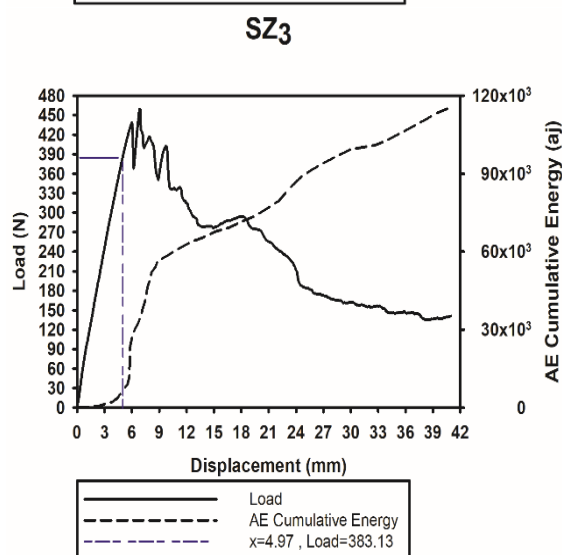
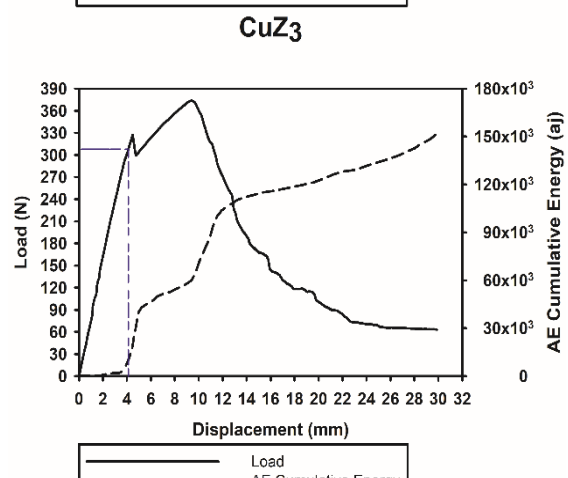
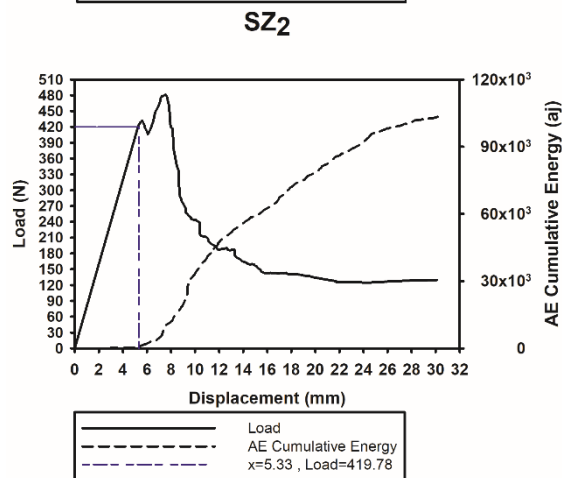
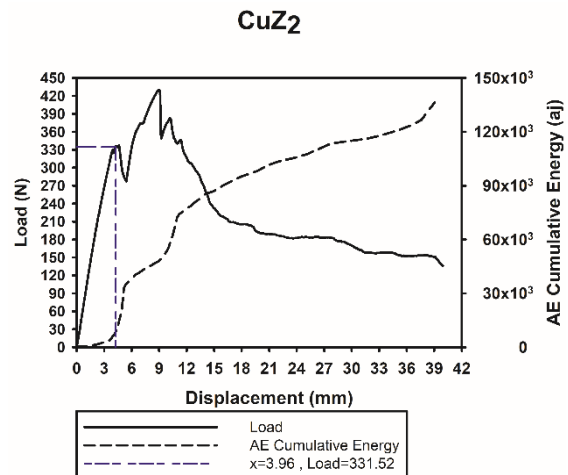
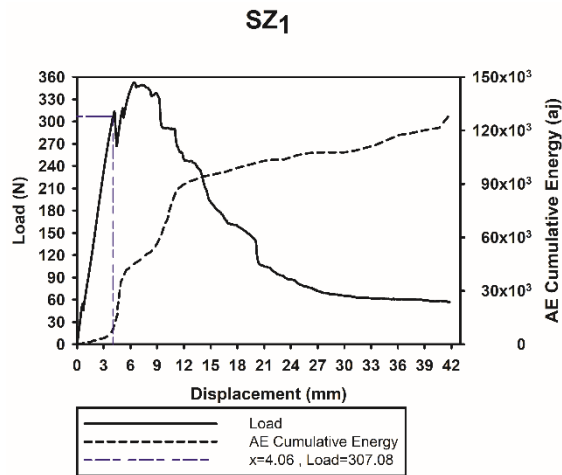
در نمودار انرژی تجمعی آکوستیکی با اولین افزایش قابل توجه در گرادیان و شیب نمودارهای انرژی تجمعی یا جهش ناگهانی به عنوان نقطه نیروی بحرانی در نظر گرفته شده است. مجموع انرژی تجمعی می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی میزان آسیب وارده بر قطعه حاصل از انواع مکانیزم‌های خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده شود. هرچه مجموع انرژی آکوستیکی بیشتر باشد در نتیجه میزان ظرفیت ذخیره سازی انرژی کرنشی نمونه کمتر بوده و مقاومت و استحکام کمتری در برابر جدایش بین لایه‌های دارد. با توجه به شکل (۱۵) با مقایسه میزان مجموع انرژی تجمعی هر سه نمونه می‌توان گفت که نمونه U1 آسیب بیشتری دیده و مقاومت و استحکام آن در مقایسه با بقیه نمونه‌ها کم تر است. همچنین نمونه U2 مجموع انرژی آکوستیکی کم تری را نشان می‌دهد. لایه چینی با زاویه الیاف میانی $\pm 90^\circ$ به دلیل افزایش ظرفیت ذخیره سازی انرژی کرنشی مقدار آسیب کم تری را در نمودار انرژی تجمعی نشان می‌دهد.



رویداد ناگهانی در نمودار نیرو-جابجایی به عنوان نیروی بحرانی در نظر گرفته می‌شود. در این بخش نمودار نیرو-جابجایی و نمودار انرژی تجمعی آکوستیک امیشن-جابجایی ارایه می‌شود. مقدار جابجایی متناظر با نیروی بحرانی بدست آمده از نمودار انرژی تجمعی آکوستیکی نوشته شده است [۲۴،۱۴].



شکل ۱۵- نمودارهای انرژی تجمعی آکوستیک نمونه های U₁ ، U₂ و U₃



شکل ۱۶- نمودارهای انرژی انرژي تجمعی آکوستیک نمونه های CuZ₁ ، CuZ₂ و CuZ₃

با توجه به نمودارهای انرژی تجمعی آکوستیکی شکل (۱۶) مشخص است که مجموع انرژی آکوستیک برای نمونه‌های Z-پین مسی در مقایسه با نمونه های بدون پین در شکل (۱۵) با در نظر گرفتن شرایط با لایه چینی یکسان مقدار عددی کم تری را نشان می‌دهد. در نتیجه نقش Z-پین در بالا بردن ظرفیت ذخیره سازی انرژی کرنشی با توجه به کاهش مجموع انرژی آکوستیکی قابل بیان است.

شکل ۱۷- نمودارهای انرژی تجمعی آکوستیک امیشن نمونه های SZ₁ ، SZ₂ و SZ₃

با توجه به شکل‌های (۱۵) ، (۱۶) و (۱۷) مشاهده می‌شود که مجموع انرژی آکوستیکی در نمونه های Z-پین فولادی در مقایسه با نمونه‌های Z-پین مسی و بدون پین

بیشترین به کمترین میزان چقرمگی شکست به ترتیب برای نمونه‌های با لایه چینی زاویه الیاف میانی $90 \pm$ ، $45 \pm$ و 0 درجه می‌باشد. هر چه زاویه الیاف میانی به 90 درجه و متعامد با راستای جدایش میل کند، چقرمگی شکست بین لایه‌ای به دلیل تاخیر در پدیده پل زنی الیاف افزایش داشته است. با مقایسه نمونه‌هایی با لایه چینی یکسان (دسته بندی نمونه‌ها در ۳ گروه از نظر لایه چینی) مشاهده می‌شود که میزان چقرمگی شکست بین لایه ای برای نمونه‌ی دارای Z-پین فولادی بیش تر از Z-پین مسی بوده و همچنین چقرمگی نمونه بدون پین کم تر از نمونه‌های Z-پین فلزی می‌باشد. Z-پین‌های فلزی نقش موثری در بهبود و بالا بردن نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی از طریق پل زدن ترک و رشد زیگزاگ جدایش بین لایه‌ای نشان می‌دهند.

جدول ۷- مقدار چقرمگی آغازین شکست بین لایه ای محاسبه شده با روش مکانیکی و آکوستیک امیشن (Kj/m^2)

کد نمونه	NL	Max%5	VIS	AE Energy	AE Cum Energy
U1	۰/۳۸۳	۰/۵۱۶	۰/۵۲۲	۰/۴۰۱	۰/۴۱۳
U2	۰/۶۴۸	۰/۷۲۳	۰/۷۳۲	۰/۶۶۵	۰/۶۸۵
U3	۰/۴۹۱	۰/۵۸۶	۰/۶۲۲	۰/۵۱۱	۰/۵۴۳
SZ1	۱/۱۲۳	۱/۲۱۷	۱/۲۷۹	۱/۱۶۶	۱/۱۹۹
SZ2	۲/۱۴۱	۲/۴۱۴	۲/۵۸۱	۲/۲۱۸	۲/۲۵۷
SZ3	۱/۷۴۹	۲/۱۲۷	۲/۴۰۹	۱/۷۹۹	۱/۸۶۶
CuZ ₁	۰/۸۱۵	۰/۸۴۹	۰/۸۶۵	۰/۸۲۹	۰/۸۴۱
CuZ ₂	۱/۳۱۹	۱/۵۹۳	۱/۶۶۸	۱/۳۷۲	۱/۴۰۴
CuZ ₃	۰/۹۹۶	۱/۲۳۹	۱/۴۲۴	۱/۰۹۴	۱/۱۹۷

نمودار چقرمگی شکست بین لایه‌ای در طول فرآیند لایه‌لایه شدن بارگذاری مود I با استفاده از رابطه (۱) قابل رسم می‌باشد. این نمودار میزان انرژی لازم را برای شروع و انتشار رشد ترک جدایش بین لایه‌ای بیان می‌کند. با بدست آوردن مقدار پارامتر اصلاحی طول ترک نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی با استفاده از تئوری تیر اصلاح شده (MBT) محاسبه می‌شود.

گذاری و یکسان از لحاظ لایه چینی نمونه، مقدار کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین ظرفیت ذخیره سازی انرژی کرنشی به ترتیب با به کار بردن Z-پین فولادی و Z-پین مسی افزایش می‌یابد.

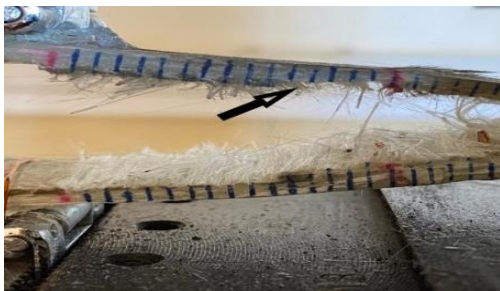
جدول ۶- نیروی بحرانی بدست آمده از نمودار انرژی تجمعی

آکوستیک امیشن		
کد نمونه	نوع پین گذاری	بار بحرانی AE Cum Energy(N)
U1	Unpinned	۱۷۸/۵۵
U2	Unpinned	۲۳۰/۸۹
U3	Unpinned	۲۰۵/۰۵
SZ1	Steel z-pins	۳۰۷/۰۸
SZ2	Steel z-pins	۴۱۹/۷۸
SZ3	Steel z-pins	۳۸۳/۱۳
CuZ1	Copper z-pins	۲۵۹/۸۲
CuZ2	Copper z-pins	۳۳۱/۵۲
CuZ3	Copper z-pins	۳۰۳/۸۲

۳-۴ محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای با روش‌های مکانیکی و آکوستیک امیشن

نیروی بحرانی هر یک از سه روش پیشنهادی استاندارد ASTM D5528-01 و آکوستیک امیشن با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی تعیین شد. با استفاده از رابطه (۱) به محاسبه و تعیین نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از روش‌های مکانیکی و آکوستیکی پرداخته شده است. با توجه به جدول (۷) مشاهده می‌شود که چقرمگی شکست بین لایه‌ای محاسبه شده از طریق روش NL، پایین‌ترین حد میزان نرخ آزادسازی انرژی کرنشی را برای نمونه‌ها ارائه می‌دهد. همچنین چقرمگی شکست بدست آمده از طریق انرژی آکوستیکی اختلاف بسیار کمی با روش NL داشته و مقادیر نزدیکی به آن ارائه می‌دهد. چقرمگی شکست بدست آمده از طریق انرژی آکوستیکی (AE Energy) کم تر از میزان چقرمگی شکست بین لایه‌ای محاسبه شده از طریق انرژی تجمعی آکوستیکی (AE Cum Energy) برای هر نمونه می‌باشد. بیشترین چقرمگی شکست بین لایه‌ای برای هر نمونه مربوط به روش چشمی می‌باشد. نرخ آزادسازی انرژی کرنشی با در نظر گرفتن شرایط پین گذاری یکسان از

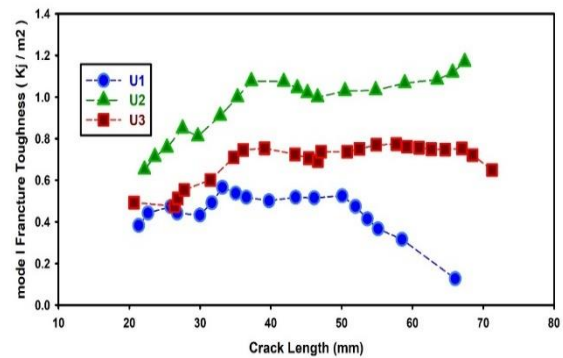
می‌باشند. چقرمگی شکست بین لایه‌ای به دلیل پل زدن الیاف افزایش یافته تا بر نیروی پل زنی الیاف در هنگام بارگذاری فائق آید. هنگامی که الیاف پل زده شده از ماتریس یا همان رزین تحت شرایط کششی جدا شوند، ترک جدایش بین لایه‌ای رشد و انتشار یافته و چقرمگی به رشد پایداری در طول جدایش می‌رسد. برای نمونه‌های پین گذاری شده علاوه بر وقوع پل زنی الیاف، Z-پین‌ها باعث پل زده شدن ترک جدایش بین لایه‌ای می‌شوند. به همین دلیل مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای برای نمونه‌های Z-پین مقدار بیش تری نسبت به نمونه‌های بدون پین گذاری نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) مشاهده می‌شود نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی برای برای نمونه‌های Z-پین فولادی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد [۲۵].



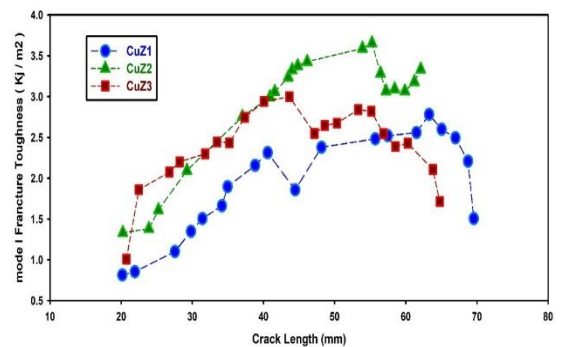
شکل ۱۸- نمایشی از پل زده شدن ترک توسط Z-پین در لایه بالایی در هنگام بارگذاری مود



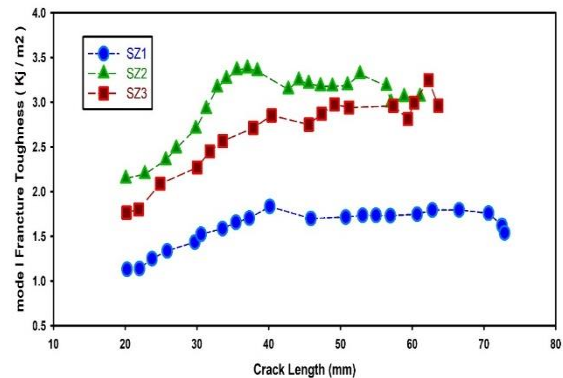
شکل ۱۹- بیرون کشیده شدن Z-پین و رشد زیگزاگی ترک جدایش بین لایه‌ای در نمونه پین گذاری شده



شکل ۱۸- نمودار چقرمگی شکست بین لایه‌ای-طول ترک نمونه‌های U_1 ، U_2 و U_3



شکل ۱۹- نمودار چقرمگی شکست بین لایه‌ای-طول ترک نمونه‌های CuZ_1 و CuZ_2 و CuZ_3



شکل ۲۰- چقرمگی شکست بین لایه‌ای-طول ترک برای نمونه‌های SZ_1 ، SZ_2 و SZ_3

بعد از لایه لایه شدن اولیه، چقرمگی شکست بین لایه‌ای افزایش می‌یابد تا به روند مقداری ثابت و پایداری برسد. در منطقه پشت پیشانی ترک جدایش بین لایه‌ای، پل زنی الیاف رخ می‌دهد. در پل زنی الیاف بالایی و الیاف پایینی که ترک از بین دو لایه عبور کرده، به یکدیگر متصل

متفاوت می‌باشد. چقرمگی شکست بین لایه‌ای یا همان نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در نمونه‌های پین گذاری شده از جنس فولادی نسبت به نمونه‌های پین گذاری شده از جنس مسی بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که در تقویت چند لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از پین راستای ضخامت، جنس پین به کار برده شده حائز اهمیت است. در این مقاله نقش تقویت کنندگی پین فولادی بیش تر است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که هرچه زاویه لایه چینی الیاف به عمود بر راستای رشد ترک نزدیک تر شود، مقاومت در برابر جدایش بین لایه‌ای بیشتر می‌شود. نتایج به دست آمده از داده‌های آکوستیک نشان می‌دهد که در هنگام شروع جدایش و رشد ترک، انرژی حاصل از سیگنال‌های آکوستیکی افزایش می‌یابد که نشان از تشخیص و انتشار روش آکوستیک امیشن در لحظه تشخیص شروع و انتشار جدایش می‌باشد. نتایج چقرمگی شکست بین لایه‌های به دست آمده از روش استاندارد ASTM D5528-01 با استفاده از روش آکوستیک امیشن صحت سنجی شد. تست غیرمخرب آکوستیک امیشن روشی بسیار مهم در تخمین جدایش بین لایه‌ای برای ارزیابی شروع انتشار ترک محسوب شده و نسبت به روش تشخیص چشمی برتری دارد. همچنین روش آکوستیک امیشن کارایی زیادی در تشخیص ترک‌های میکرو دارد.

۶- قدردانی و تشکر

نویسندگان این مقاله از همکاری آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی و همچنین شرکت مهندسان پایش وضعیت امیر کبیر به خاطر در اختیار قرار دادن دستگاه تست غیر مخرب آکوستیک امیشن مراتب قدردانی و سپاس را دارند.

۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

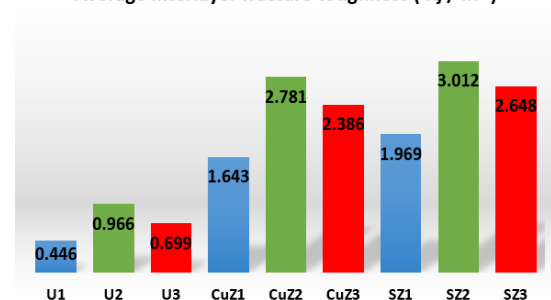
۸- منابع

- [1] Rugg KL, Cox BN, Massabo R. Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers. Composites Part A 2002; 33(2):177.
- [2] Partridge IK, Cartie DDR, Bonnington T.



شکل ۲۳- نمایی از پشت جبهه پیشانی ترک و محل وقوع پل زنی الیاف

Average interlayer fracture toughness (Kj / m²)



شکل ۲۴- میانگین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در طول جدایش بین لایه‌ای

با توجه به شکل (۲۴) مشاهده می‌شود که میانگین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در طول لایه لایه شدن برای نمونه SZ₂ با لایه چینی زاویه الیاف میانی $\pm 90^\circ$ درجه و پین گذاری شده از جنس فولاد، مقدار میانگین بیشتری را نشان می‌دهد. پین‌های فولادی در مقایسه با پین‌های مسی به دلیل استحکام بالا در طول رشد ترک کم تر تغییر شکل الاستیک داده^۱ و شکسته^۲ می‌شوند. Z-پین مسی به دلیل ساختار نرم و استحکام کم در مقایسه با Z-پین فولادی، مکانیزم بیرون کشیدگی پین^۳ از لایه‌ها بیش تر رخ می‌دهد [۶].

۵- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، جدایش بین لایه‌ای که از شایع ترین نوع مکانیزم خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی بوده، بسته به نوع لایه چینی و زاویه لمینت‌ها

¹ Elastic Deformation of Z-pin

² Debonding of Z-pin

³ Pull-out of z-pin

- Ahmadi, Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 3059-3065, 2011.
- [14] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014(In Persian)
- [15] Fotouhi M, Sadeghi S, Jalalvand M, Ahmadi M. Analysis of the damage mechanisms in mixed-mode delamination of laminated composites using acoustic emission data clustering. *J Thermoplast Compos Mater* 2015.30(3):318-40.
- [16] Amir Mostafapour, Nima Beheshtizadeh. 2016. Processing of acoustic signals via wavelet & Choi-Williams analysis in three-point bending load of carbon/epoxy and glass/epoxy composites. *Ultrasonics*. 79. pp 1-8
- [17] Zakizadeh, A.M. Refahi-Oskouei, A. Hamzehlu, R., "Damages evaluation of low velocity impact on Glass/Polyester-foam sandwich panels using the acoustic technique", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 319-329, 2019.
- [18] A.J. Brunner, Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with acoustic emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life, *Constr. Build. Mater.* 173 (2018) 629-637.
- [19] Habibi M, Yousefi J, Ahmadi 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
- [20] Pingkarawat, K. and A.P. Mouritz, Comparative study of metal and composite z-pins for delamination fracture and fatigue strengthening of composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016. 154: p. 180-190.
- [21] Li, M., et al., Tuning interlaminar fracture toughness of fine z-pin reinforced polymer composite. *Materials & Design*, 2021. 212: p. 110293.
- [22] ASTM D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM Standard, 2007, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [23] Kravchenko SG, Kravchenko OG, Carlsson LA, Manufacture and performance of z-pinned composites, in: *Advanced Polymeric Composites*, ed. G. Shonaike and S. Advani, CRC Press, FL, 2003, pp 104-140.
- [3] Krasnov VI, Kuznetsov VA, Maksokov AY. Automated method of transverse reinforcement of composites by short fibres, *Mech Comp Mater*, 1987;3:449-504.
- [4] Tomashevskii VT, Sitnikov SY, Shalgin VN, Yakovlev VS. A method of calculating technological regimes of transversal reinforcement of composites with short-fibre microparticles, *Mech Comp Mater*. 1989;25:400-406.
- [5] Freitas G, Boyce JS, Magee C. Translaminar reinforcement system for z-direction reinforcement of a fiber matrix structure. US Patent 5733404, 1998.
- [6] Mouritz, A.P., Review of z-pinned laminates and sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020. 139: p. 106128.
- [7] Harizi W, Chaki S, Bourse G, Ourak M. Mechanical damage assessment of Glass Fiber-Reinforced Polymer composites using passive infrared thermography. *Compos B Eng* 2014; 59:74-9.
- [8] Ebrahimian, Z.; Ahmadi, M.; Sadri, S.; Li, B.Q.; Moradian, O. Wavelet analysis of acoustic emissions associated with cracking in rocks. *Eng. Fract. Mech.* 2019, 217, 106516.
- [9] Huang, C.; Ju, S.; He, M.; Zheng, Q.; He, Y.; Xiao, J.; Zhang, J.; Jiang, D. Identification of failure modes of composite thin-ply laminates containing circular hole under tension by acoustic emission signals. *Compos. Struct.* 2018, 206, 70-79.
- [10] 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. *J Compos Mater* 2015; 50(22):3133-45.
- [11] Oskouei AR, Ahmadi M. Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites. *J Compos Mater* 2009;44(7):793-807.
- [12] Refahi Oskouei A, Zucchelli A, Ahmadi M, Minak G. An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate. *Mater Des* 2011;32(3):1444-55.
- [13] A. A. Bakhtiary Davijani, M. Hajikhani, M.

- Pipes RB. Influence of throughthickness reinforcement aspect ratio on mode I delamination fracture resistance. *Comp Struct.* 2015;125:13-22.
- [24] Lissek F, Haeger A, Knoblauch V, Hloch S, Pude F, Kaufeld M. Acoustic Emission for interlaminar toughness testing of CFRP: evaluation of the crack growth due to burst analysis. *Compos B Eng* 2018;136:55–62.
- [25] M. Heidarni-Rarani, Modeling of delamination propagation in composite double cantilever beam (DCB) under quasi-static loading, Phd Thesis, Iran University Of Technology Mechanical Engineering Department, Iran, 2012(In Persian).