

آنالیز و پایش شروع خرابی در اتصالات آلومینیوم/کامپوزیت با استفاده از آکوستیک امیشن

مرتضی احمدی نجف‌آبادی^۱، مجتبی صدیقی^۲، منوچهر صالحی^{۲*}، حسین حسینی تودشکی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، ۱۵۸۷-۴۴۱۳، msalehi@aut.ac.ir

چکیده

اتصال چسبی یک روش جایگزین برای روش‌های سنتی مانند جوش کاری و پرچ کاری می‌باشد که دارای حیطه کاربردی وسیعی در صنایع الکترونیکی، خودرو و هوایی می‌باشد. طراحی این نوع اتصالات با قابلیت اطمینان مطلوب، نیازمند حصول دانش کامل از مقاومت اتصال در مقابل خرابی می‌باشد. در این مطالعه، به پایش شروع خرابی در فصل مشترک لایه از پیش آغشته کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و آلومینیوم ۲۰۲۴ T۳ با استفاده از آکوستیک امیشن پرداخته شده و در ادامه به آنالیز خرابی با استفاده از مدل‌سازی المان محدود با نرم‌افزار آباکوس پرداخته می‌شود. از مدل ناحیه چسبنده، برای مدل‌سازی رشد جدایش استفاده شده است. جهت تکرارپذیری بهتر نتایج نمونه‌های ساخته شده، از لایه از پیش آغشته کامپوزیتی استفاده شده و سطوح آلومینیوم جهت اتصال مطلوب آلومینیوم و کامپوزیت در حمام اسید کرومیک، آنودایز شده است. پایش لحظه شروع خرابی با استفاده از روش منحنی نیرو- جابجایی، روش پردازش سیگنال‌های آکوستیک امیشن و روش استفاده از تابع سنتری صورت گرفته است. با مشخص شدن لحظه شروع خرابی، نیرو بحرانی و به تبع آن چقرمگی شکست، محاسبه شده و مدل‌سازی بر اساس مقادیر چقرمگی شکست بدست آمده، صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، نمودار نیرو - جابجایی بدست آمده با استفاده از روش تابع سنتری، مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد. در این پژوهش نشان داده شده است که با استفاده از روش آکوستیک امیشن پایش شروع خرابی در اتصالات آلومینیوم/کامپوزیت به صورت آنلاین و دقت بالاتری، نسبت به روش‌های دیگر امکان پذیر می‌باشد.

کلیدواژگان

اتصال آلومینیوم کامپوزیت؛ آکوستیک امیشن؛ مدل ناحیه چسبنده

Analysis and detection of failure in aluminium/E-glass prepreg interface with acoustic emission

Morteza Ahmadi Najabadi¹, Mojtaba Sedighi², Manouchehr Salehi^{2*}, Hossin Hossini Toudeshky³

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 4413-1587 Tehran, Iran, msalehi@aut.ac.ir

Abstract

Adhesive bonding is an alternative to traditional joining systems like riveting and welding which has been used extensively in electronic, automotive, and aerospace industries. Design of such reliable bonding, requires knowledge achievement of bonding fracture resistant. In this study interface failure initiation of Al-2024 and glass/epoxy prepreg has been investigated by using acoustic emission (AE) technique. Furthermore, failure analysis simulation is done by commercial FEA software ABAQUS. Simulation was implemented by cohesive zone model (CZM) by using cohesive surface technic. Prepreg was used to reduce variation in specimen production and in order to improve adhesion between Al-2024 and composite layers. Pretreatment by a chromic acid anodizing agent was performed on the surface of aluminium. Failure initiation was identified by monitoring of force-displacement curve, online processed AE signals and using sentry function analyzing method. Critical load and fracture toughness was then calculated to be used as simulation input. Simulation result indicates that force-displacement curve obtained by sentry function method is in better agreement with the experimental result. According to present study AE online monitoring method can detect aluminium/ composite bonding failure more accurately than the other methods.

Keywords

Aluminium/composite bonding, Acoustic emission, cohesive zone model

اتصال چسبی یک روش جایگزین برای روش‌های سنتی مانند جوش کاری و پرچ کاری بوده که دارای حیطه کاربردی وسیعی در صنایع الکترونیکی، خودرو و هوایی می‌باشد. به عنوان مثال یکی از کاربردهای آن تعمیرات سازه‌های هوایی توسط وصله می‌باشد. به طور کلی هنگام اتصال دو جسم، امکان بوجود آمدن عیوب ریز، زیاد بوده و در حین کارکرد احتمال گسترش این عیوب وجود دارد. این امر منجر به ایجاد ترک درمحل اتصال می‌شود [۱]. پایش و تشخیص شروع خرابی در این اتصالات احتمال وقوع خرابی‌های فاجعه آمیز را کم می‌کند.

آزمون‌های معمول برای ارزیابی عملکرد اتصال شامل آزمون‌های برش^۱ بوده ولی این نوع روش‌ها، برای ارزیابی مقاومت در مقابل شکست مناسب نمی‌باشد. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت گسترش مفهوم مکانیک شکست خطی برای آنالیز شکست اتصالات چسبی صورت پذیرفته و نشان داده شده است که طراحی با روش مکانیک شکست، قابل اطمینان و دارای عملکرد مطلوب است [۲]. برای تخمین چقرمگی شکست می‌توان از نمونه‌های آزمون DGB^۲ برای مود یک و ENF^۳ برای مود دو استفاده نمود.

نمونه DGB^۲ جهت بدست آوردن چقرمگی شکست مود یک به صورت گسترده از سال ۱۹۶۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. این نمونه در عمل به راحتی ساخته شده و روند رسیدن به داده‌های دقیق در مراجع [۴] موجود می‌باشد. این روند در طی سال‌ها اصلاح و بهبود پیدا کرده و در نهایت استاندارد [۵] برای آن ارائه گردیده است. یکی از عوامل ایجاد خطا در روند محاسبه چقرمگی شکست، مشخص کردن لحظه شروع خرابی یا رشد ترک می‌باشد [۶].

در [۷] مدل‌سازی المان محدود و آزمون تجربی جهت بررسی جدایش پیشرونده برای دو لایه آلومینیوم متصل شده با چسب اپوکسی تحت مود یک صورت گرفته است. چقرمگی شکست از نتایج آزمون بدست آورده شده و مدل‌سازی جدایش با استفاده از مدل ناحیه چسبیده انجام گردیده است. در مقام مقایسه، نتایج تجربی و مدل‌سازی، دارای انطباق خوبی بوده و نشان داده شده که روش مدل ناحیه چسبیده، روشی مناسب برای بررسی جدایش می‌باشد.

همان طور که اشاره گردید، هنگام اتصال ممکن است عیوبی در فصل مشترک دو جسم ایجاد شود. این عیوب می‌تواند بخاطر ایجاد فاصله هوایی بین لایه‌ها و وارد شدن ذرات خارجی ایجاد گردد [۸]. عدم اتصال^۴ و جدایش بین لایه‌ها جزء عیوب معمول در صنایع ساخت پنل‌های سازه‌های هوایی می‌باشند. ارزیابی دقیق این عیوب، بخاطر تاثیر منفی آن‌ها بر عملکرد و قابلیت اطمینان قطعات لازم می‌باشد. برای تشخیص این عیوب، معمولاً از روش‌های غیر مخرب استفاده می‌گردد.

برای پایش شروع خرابی، تاکنون روش‌های آزمون غیر مخرب گوناگونی از جمله گرمانگاری، روش فراصوتی و اشعه ایکس مورد استفاده قرار گرفته که هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند [۹]. اکثر روش‌های اشاره شده قابلیت تشخیص وقوع عیب را به صورت بلادرنگ ندارند و جهت تشخیص بلادرنگ عیوب می‌توان از روش آکوستیک امیشن^۵ استفاده نمود. گودین و همکارانش آکوستیک امیشن را به عنوان وسیله‌ای برای تشخیص انواع مختلف خرابی‌ها در مواد کامپوزیتی شیشه‌پلی استر به کار گرفتند و با تحلیل سیگنال‌ها، منابع مختلف امواج ساطع شده را تشخیص دادند [۱۰].

انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر وقوع خرابی و یا عبارتی آزاد شدن سریع انرژی کرنشی در جسم را آکوستیک امیشن گویند. از مزایای استفاده از روش آکوستیک امیشن در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت تفکیک انواع مختلف خرابی، همچون ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای اشاره نمود [۱۱]. در پژوهشی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در کامپوزیت پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری مود یک با استفاده از تابع سنتری، محاسبه شده است [۱۲]. همچنین در پژوهشی دیگر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را برای الیاف تک جهته و دو جهته در کامپوزیت پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری مود یک، دو و ترکیبی با استفاده از آکوستیک امیشن و تابع سنتری بدست آورده شده است [۱۳] و نشان داده شده است.

برای تعیین چقرمگی شکست و شناسایی لحظه شروع جدایش در کامپوزیت‌های پایه الیاف شیشه تحقیقات زیادی صورت گرفته و استاندارد مربوطه ارائه شده است. همچنین پژوهش‌هایی در زمینه بررسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن در اتصالات کامپوزیت/کامپوزیت صورت گرفته است ولی تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن در خصوص شروع و رشد خرابی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد. بدین منظور، در این پژوهش ابتدا به بررسی رفتار مکانیکی (منحنی نیرو-جابجایی) و آکوستیک امیشن شروع خرابی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت پرداخته شده و در ادامه با استفاده از روش تابع سنتری، که ترکیب رفتار آکوستیک امیشن و رفتار مکانیکی می‌باشد، لحظه شروع خرابی در فصل مشترک تعیین می‌گردد. با بدست آمدن لحظه شروع خرابی، نیروی متناظر با آن را نیروی بحرانی در نظر گرفته و از آن جهت محاسبه چقرمگی استفاده شده است. سپس آنالیز خرابی با استفاده از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و بهره‌گیری از مدل ناحیه چسبیده انجام می‌گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تعیین چقرمگی شکست

میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک بین‌لایه‌ای را چقرمگی شکست بین‌لایه-ای (نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی) می‌گویند. این خاصیت میزان مقاومت ماده در برابر رشد جدایش بین‌لایه‌ای را نشان می‌دهد. در استاندارد [۱۴] برای تعیین چقرمگی شکست برای اتصالات چسبی دو فلز متصل به هم، تحت مود یک رابطه (۱) ارائه شده است.

$$G_I = \frac{12 P^2 (\alpha a^2 + h^2)}{E b^3 h^3} \quad (1)$$

G_I نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی تحت مود یک

P مقدار نیروی بحرانی متناظر با شروع خرابی در فصل مشترک

b عرض نمونه

a طول جدایش بین‌لایه‌ای

E مدول الاستیک فلز

h ضخامت نمونه

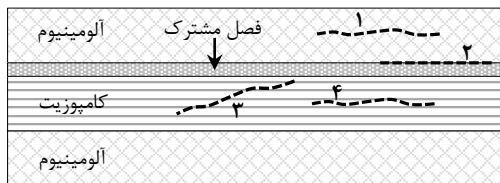
4. Disbond

5. Acoustic Emission

1. Lap shear test, the pin-collar test, and the butt joint test

2. Double cantilever beam (DCB)

3. End notch flexure(ENF)



شکل ۱ رفتار شکست در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت

۲-۳- مدل ناحیه چسبنده CZM

مدل‌سازی المان محدود ایجاد شده و رشد خرابی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت با استفاده از سطوح چسبنده^۲ و TSL^۳ در نرم افزار آباکوس انجام شده است. در روش ناحیه چسبنده، تنش کششی T تابعی از جدایش Δ می‌باشد. مدل‌های زیادی برای ارزیابی اتصالات چسبی پیشنهاد شده است [۱۶]. در تمام این مدل‌ها نیروی کششی چسبنده ابتدا صعودی بوده و بعد از رسیدن به بیشینه خود σ_{CP} تا مقدار صفر کاهش پیدا می‌کند. سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی نشان دهنده انرژی شکست چسبنده در حین رشد جدایش می‌باشد. این مقدار در مکانیک شکست خطی برابر با G_{IC} می‌باشد. با توجه به اینکه شکل مدل چسبنده تغییر چندانی در نتایج ایجاد نمی‌کند [۱۶] در این پژوهش به جهت ساده‌سازی از مدل مثلثی نمایش داده شده در شکل ۲ استفاده شده است.

معیار ایجاد خرابی بر پایه تنش بوده و به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$\left(\frac{\sigma_n}{N_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S_{max}}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

در این رابطه σ_n ، σ_t و σ_s تنش‌هایی اعمالی به المان چسبنده در جهت خارج و داخل صفحه می‌باشد و N_{max} ، T_{max} و S_{max} مقادیر بیشینه تنش (خواص چسبندگی بدست آمده) در همان جهات می‌باشند. معیار رشد خرابی می‌تواند بر پایه انرژی و یا جابجایی تعیین گردد که در این پژوهش بر پایه انرژی انتخاب گردیده است و با توجه به غالب بودن مود یک، معیار رشد مستقل از مود شکست در نظر گرفته شده است.

همان طور که در مرجع [۱۷] نشان داده شده است، در نمونه DCB، قسمت صعودی منحنی $P-\delta$ به مقدار استحکام چسبنده وابسته می‌باشد ولی در قسمت نزولی منحنی انرژی شکست تاثیر گذار می‌باشد.

۲-۴- طراحی نمونه

برای پایش شروع خرابی ضخامت آلومینیوم در نمونه مورد آزمون بگونه‌ای طراحی گردید که آلومینیوم دچار تغییر شکل پلاستیک نشود زیرا تغییر شکل پلاستیک انرژی مصرف می‌نماید و نباید این انرژی در مجموع انرژی لازم برای جدایش لحاظ گردد. همچنین از نظر آکوستیک امیشن نیز در محدوده پلاستیک سیگنال‌هایی تولید می‌گردد که باید به طریقی فیلتر شود و این امر تحلیل داده‌های آکوستیکی را پیچیده تر می‌نماید.

در این رابطه جهت محاسبه چقرمگی نیاز به تعیین نیروی بحرانی می‌باشد. در این پژوهش پایش شروع خرابی با روش آکوستیک امیشن جهت تعیین مقدار نیروی بحرانی با استفاده از سه روش؛ منحنی نیرو-جابجایی، آکوستیک امیشن و تابع سنتری تعیین گردیده است.

الف- پایش شروع خرابی با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی

برای تعیین نیروی بحرانی در استاندارد [۵]، سه روش پیشنهاد شده است. در روش اول نیروی بحرانی متناظر با نیروی لحظه‌ای است که در آن، منحنی نیرو - جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود. در روش دوم متناظر با نیروی لحظه‌ای است که در آن، افزایش ۵٪ نرمی اتفاق می‌افتد و در روش سوم متناظر با نیروی لحظه‌ای است که رشد جدایش بین لایه‌ای به صورت دیداری مشاهده می‌گردد. با توجه به اینکه روش اول نسبت به دو روش دیگر، نیروی بحرانی پایین‌تری را ارائه می‌دهد استاندارد، این روش را ترجیح داده است.

ب- پایش شروع خرابی با استفاده از آکوستیک امیشن

به علت فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه هنگام شروع خرابی، تعداد و انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. برای تعیین لحظه شروع خرابی با استفاده از روش آکوستیک امیشن، می‌توان از نمودار انرژی سیگنال و مجموع انرژی سیگنال آکوستیک امیشن بر حسب جابجایی فک استفاده نمود. در این نمودارها به ترتیب لحظه تولید موج‌ها و تغییر ناگهانی در شیب منحنی متناظر با لحظه شروع خرابی در نظر گرفته شده و نیروی متناظر با آن نقطه، نیروی بحرانی می‌باشد.

ج- پایش شروع خرابی با روش تابع سنتری

به منظور تعیین لحظه شروع خرابی، می‌توان از ترکیب دو روش فوق استفاده نمود. در این روش از تابعی تحت عنوان تابع سنتری استفاده می‌شود. تابع سنتری با رابطه (۲) بیان می‌شود [۱۵].

$$f(x) = \ln\left(\frac{E_s(x)}{E_a(x)}\right) \quad (2)$$

در رابطه فوق، $E_s(x)$ مجموع انرژی مکانیکی بوده و برابر با سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی و $E_a(x)$ نیز برابر با مجموع انرژی سیگنال‌های آکوستیک امیشن می‌باشد.

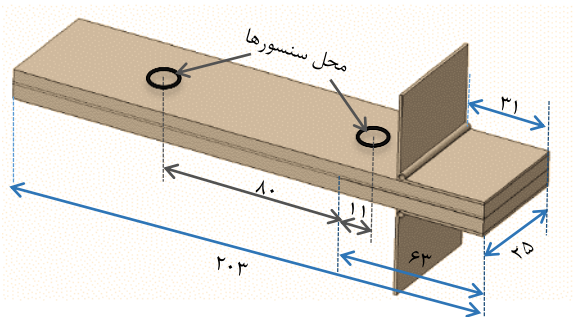
۲-۲- مکانیزم‌های شکست در نمونه

در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت احتمال وقوع یکی از رفتار شکست ذیل وجود دارد که در شکل ۱ هر یک از این رفتارها با شماره مشخص شده برای آن نمایش داده شده است.

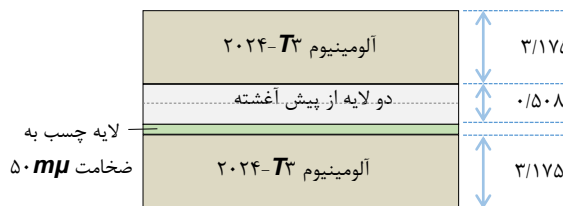
- پلاستیک شدن و ایجاد ترک در آلومینیوم (۱)
- از بین رفتن خواص چسبندگی در فصل مشترک (۲)
- شکست الیاف در لایه کامپوزیتی (۳)
- ترک ماتریس در لایه کامپوزیتی (۴)

در بارگذاری مود یک، در نمونه‌های مورد آزمون با توجه به وجود ترک اولیه و ضخامت آلومینیوم احتمال پلاستیک شدن و ایجاد ترک نمی‌باشد. در ابتدای شروع خرابی احتمال شکست الیاف و ایجاد ترک در ماتریس با توجه به وجود ترک اولیه کم می‌باشد ولی در ادامه امکان وقوع رفتارهای ۲ تا ۴ وجود خواهد داشت.

از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا، با ظرفیت $\Delta 5\text{ton}$ با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری 0.1 تا 500 mm/min برای آزمایش استفاده گردید. در این پژوهش سرعت بارگذاری 1 mm/min انتخاب شده است.



شکل ۳ ابعاد نمونه و محل نصب سنسورها (واحد میلیمتر)

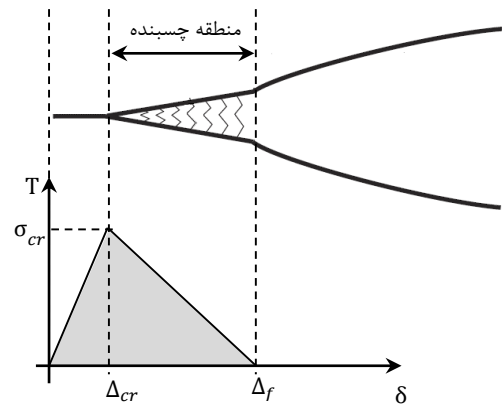


شکل ۴ چیدمان لایه‌ها و ضخامت آن‌ها (واحد میلیمتر)

برای داده برداری آکوستیکی از سامانه پی‌سی‌آی ۲ با نرخ 1MHz ، نرم افزار آ‌ای-وین^۷ و دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو^۸، محصول کمپانی پک^۹، استفاده گردید. فرکانس رزونانسی سنسورها $513/28\text{kHz}$ و محدوده بهینه کاری آن $750-1000\text{kHz}$ می‌باشد. داده‌های دریافتی توسط هر سنسور بوسیله پیش تقویت کننده با ضریب 40dB تقویت می‌گردد. از گریس سیلکون خلا شده برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور استفاده شد. برای حذف نویز زمینه، در حین نمونه برداری حد آستانه 35dB در نظر گرفته شد. چیدمان آزمایش در شکل ۵ و محل قرارگیری سنسورها در شکل ۶ نمایش داده شده است.

جهت اندازه‌گیری محل نوک ترک، سطح جانبی نمونه در فواصل 1mm مدرج گردیده و همزمان با داده برداری با دستگاه کشش و سامانه آکوستیک امیشن از جابجایی نوک ترک نیز فیلمبرداری صورت گرفته است.

با بررسی نتایج مدل سازی از عدم تغییر شکل پلاستیک اطمینان حاصل گردید و در نهایت ابعاد و ضخامت نمونه به صورت شکل ۳ و ۴ طراحی گردید.



شکل ۲ مدل ناحیه چسبیده

۲-۵- توصیف مواد آزمایش و آماده سازی نمونه‌ها

همان طور که در شکل ۳ نمایش داده شده، نمونه‌های مورد استفاده از دو لایه کامپوزیتی و دو ورق آلومینیومی ساخته شده است. ورق آلومینیومی از جنس ۲۰۲۴-T۳ بوده و لایه کامپوزیتی به صورت پارچه^۱ از پیش آغشته^۲ با الیاف عمود بر هم می‌باشد. الیاف لایه کامپوزیتی شیشه از نوع ای^۳ و رزین آن اپوکسی می‌باشد.

برای ساخت نمونه با توجه به تعداد و ابعاد نمونه‌ها دو ورق آلومینیومی برش داده شده و برای اتصال با کیفیت بهتر به لایه کامپوزیتی، سطح ورق آلومینیومی آنودایز کرومیک شده است. جهت ایجاد ترک اولیه روی ورق آلومینیومی یک لایه نوار چسب به ضخامت 50 میکرون به عرض $63/5\text{mm}$ در طول ورق چسبانده شده است. سپس دو لایه کامپوزیتی به همان ابعاد ورق آلومینیوم برش داده شده و بر روی دو سطح آلومینیوم چسبانده می‌شود. در مرحله بعدی فرآیند پخت صورت گرفته است که در این مرحله ابتدا فرآیند بگ^۴ صورت گرفته و نمونه در کیسه خلاء^۵ (فشار خلاء $0/3$) قرار می‌گیرد. این فرآیند به طور کلی جهت رزین گیری و جلوگیری از بهم خوردن تنظیمات نصب نمونه صورت می‌گیرد.

در ادامه، مجموعه بگ در داخل اتوکلاو قرار داده شده و تحت دمای 130°C و فشار محیطی $2/5$ بار به مدت سه ساعت پخت می‌شود و در نهایت دو لولا جهت اعمال بار به دو سطح بالایی و پایینی انتهای نمونه چسبانده شده است.

۲-۶- دستگاه آزمایش

6. PCI-6

7. AEWIn

8. PICO

9. PAC

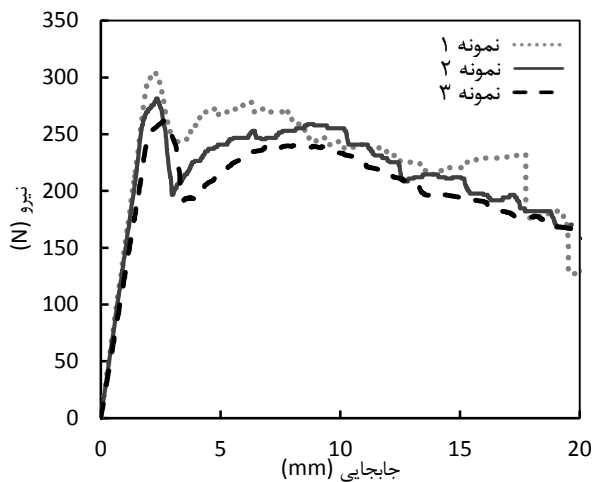
1. Woven

2. Preprag

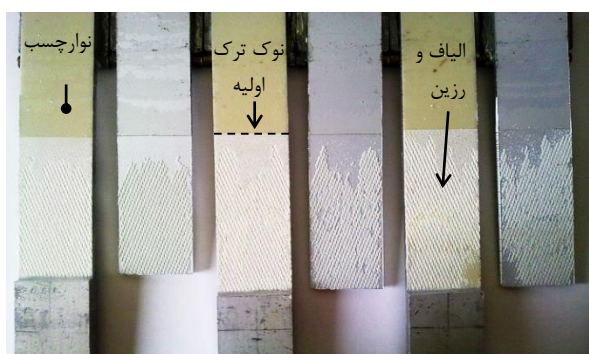
3. E-glass

4. Bag processing

5. Vacuum bag



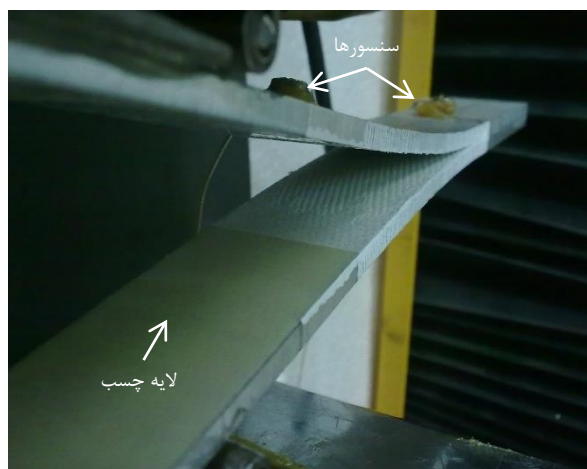
شکل ۷ نمودارهای نیرو برحسب جابجایی فک برای هر سه نمونه



شکل ۸ برش نمونه‌ها جهت مشاهده رفتار رشد جدایش



شکل ۵ چیدمان آزمایش



شکل ۶ محل قرارگیری سنسورها

۳- بحث و نتایج

۳-۱- مشاهدات مکانیکی

در این قسمت نمودارهای نیروی اعمالی و جابجایی فک دستگاه کشش همراه با رشد دیداری ترک ارائه گردیده است. در شکل ۷ نمودار نیرو برحسب جابجایی فک برای هر سه نمونه نمایش داده شده است و همان طور که مشاهده می‌گردد برای هر سه نمونه، نیرو بعد از رسیدن به مقدار بیشینه تا مقداری کاهش پیدا می‌کند و پس از آن دوباره سیر صعودی پیدا کرده است و در انتها مجدداً حالت نزولی پیدا می‌کند. علت این امر نیز می‌تواند تغییر رفتار شکست باشد، زیرا بعد از نیروی بیشینه ابتدا جدایش بین لایه کامپوزیت و آلومینیوم صورت گرفته که در این حالت نیرو افت پیدا می‌کند. سپس جدایش وارد لایه کامپوزیتی می‌شود که این امر باعث اضافه شدن مکانیزم‌های جدایش الیاف، شکست ماتریس و شکست الیاف می‌شود و در این حالت نیرو افزایش پیدا می‌کند. در ادامه گسترش خرابی در لایه کامپوزیتی باعث کاهش تدریجی نیرو تا انتها می‌شود. در شکل ۸ تغییر مکانیزم خرابی قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به تمرکز این پژوهش بر روی شناسایی شروع خرابی در فصل مشترک آلومینیوم و لایه کامپوزیتی، از قسمت ابتدایی این نمودارها جهت بررسی و تحلیل استفاده می‌شود که این قسمت همراه با رشد دیداری ترک در شکل ۹ نمایش داده شده است.

نیرو با جابجایی رابطه‌ای خطی داشته و خرابی ایجاد نشده است در نتیجه سیگنالی ایجاد نمی‌گردد. با افزایش مقدار نیرو در منطقه غیر خطی، مقدار انرژی مکانیکی افزایش می‌یابد ولی به دلیل عدم وقوع یک سازوکار خرابی در فصل مشترک، مقدار انرژی آکوستیک امیشن نزدیک صفر می‌باشد. در نتیجه، در این ناحیه، تابع سنتری دارای مقدار زیادی می‌باشد. در لحظه شروع رشد خرابی که تعداد سیگنال‌های آکوستیک امیشن به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، تابع سنتری به صورت لحظه‌ای افت کرده و مقدارش کاهش پیدا می‌کند. از این تغییر ناگهانی در مقدار تابع سنتری، می‌توان بعنوان روشی برای تعیین شروع خرابی بهره برد.

در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نمودارهای انرژی آکوستیک امیشن، مجموع انرژی آکوستیک امیشن و تابع سنتری همراه با تعیین لحظه شروع خرابی، به ترتیب برای نمونه‌های ۱ تا ۳ نمایش داده شده است. نیروی بحرانی بدست آمده از نمودارهای انرژی آکوستیک امیشن و مجموع آن یکسان بوده ولی با نتایج نمودار تابع سنتری، دارای اختلاف می‌باشد که در جدول ۱ آورده شده است.

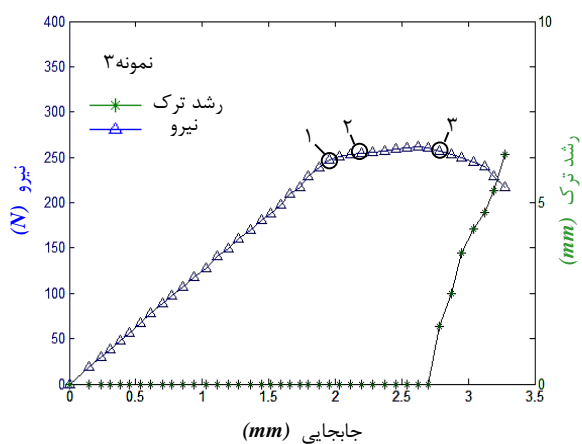
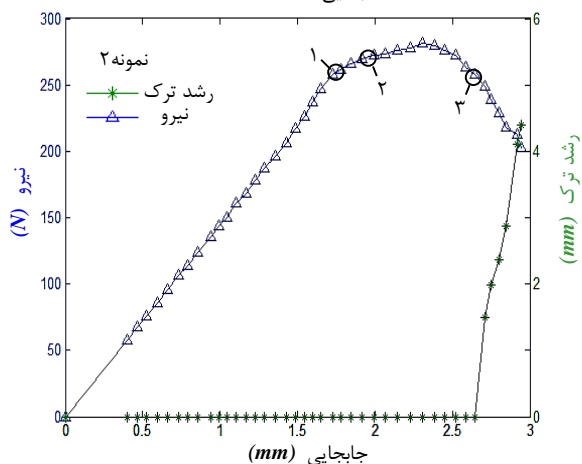
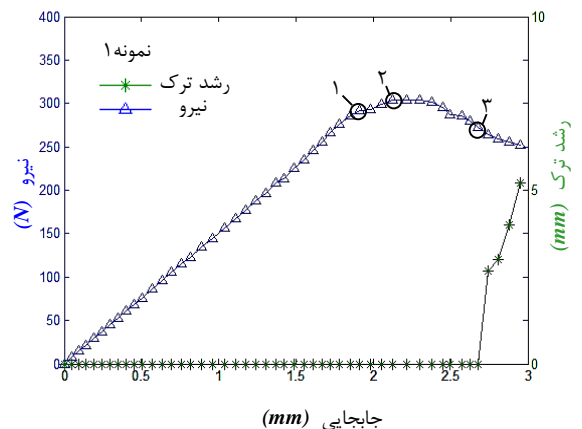
در نمونه های شماره ۱ و ۲ نتایج برای سنسورهای یک و دو مشابه می‌باشد، ولی در نمونه شماره ۳ به دلیل تضعیف سیگنال سنسور یک تفاوت ایجاد شده است. با توجه به نزدیک بودن سنسور دو به نوک ترک سنسور دو، ملاک قرار داده شده است. سه روش آکوستیک امیشن اشاره شده دارای نتایج نزدیک به هم می‌باشند، بنابراین جهت تعیین روش بهتر، یک پارامتر حساسیت تعریف گردید. این پارامتر نسبت شیب تغییرات نمودار در نقطه بحرانی بر متوسط تغییرات شیب نمودار می‌باشد. حساسیت محاسبه شده برای هر یک از روش‌ها در جدول ۲ ارائه گردیده است. مقادیر حساسیت برای سنسور دو به دلیل نزدیک بودن به نوک ترک بیشتر می‌باشد. همچنین حساسیت روش تابع سنتری نسبت به دیگر روش‌ها دارای مقادیر بزرگتری بوده و به همین دلیل این روش را می‌توان از این نظر برتر دانست.

۳-۳- محاسبه چقرمگی شکست

مقادیر چقرمگی شکست با استفاده از رابطه (۱) بدست آمده و مقادیر نیروی بحرانی محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه ترک ابتدا در وسط نمونه رشد می‌کند و بعد به سمت لبه‌ها گسترش پیدا می‌کند، محل نیروی بحرانی بدست آمده از روش رشد ترک دیداری، در قسمت نزولی نمودار بوده و نیروی بحرانی و چقرمگی شکست متناظر با آن در نمونه های ۱ و ۲ مقدار کمتری بدست آمده است و این مقادیر را نمی‌توان بعنوان چقرمگی شکست در نظر گرفت. با بررسی جدول ارائه شده مشخص می‌گردد مقادیر چقرمگی شکست با استفاده از تابع سنتری، دارای مقدار پایین‌تری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

جدول ۱ نیروهای بحرانی (در واحد نیوتن)

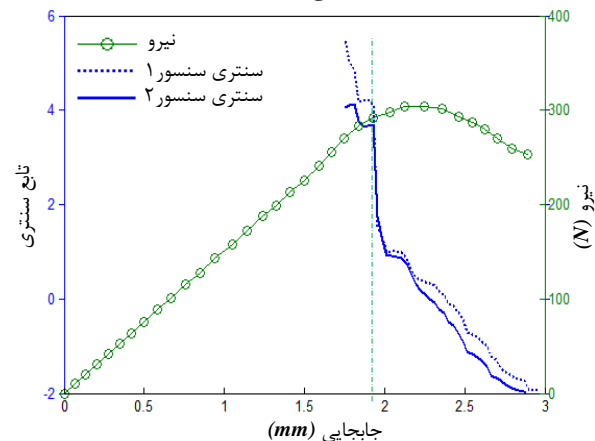
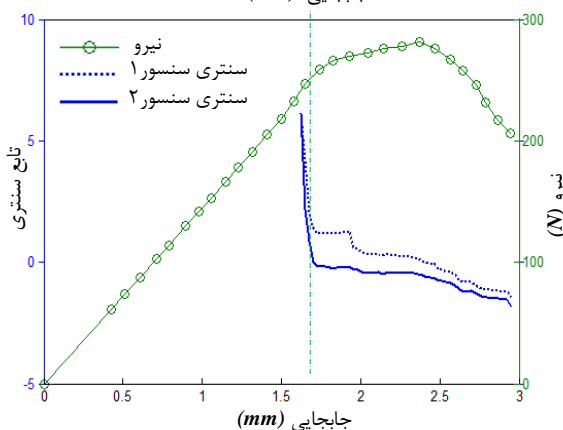
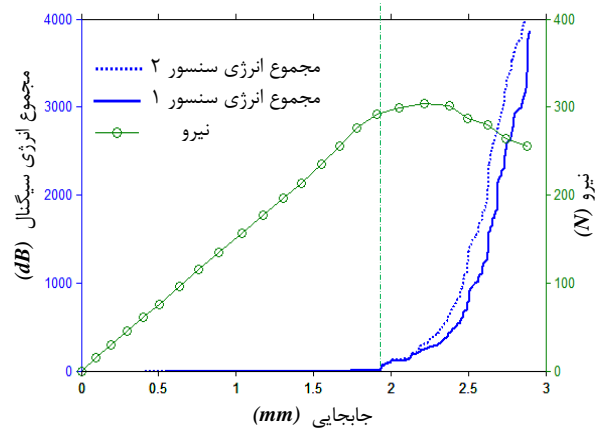
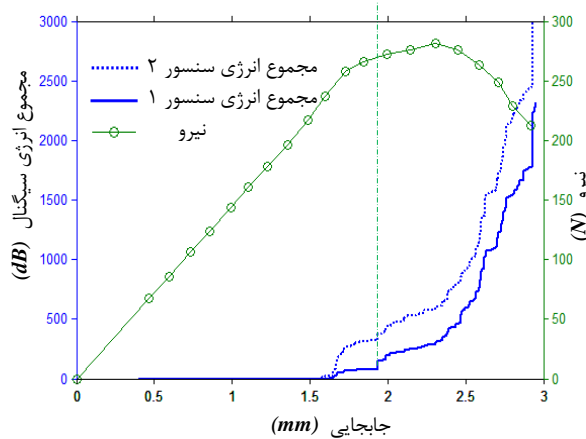
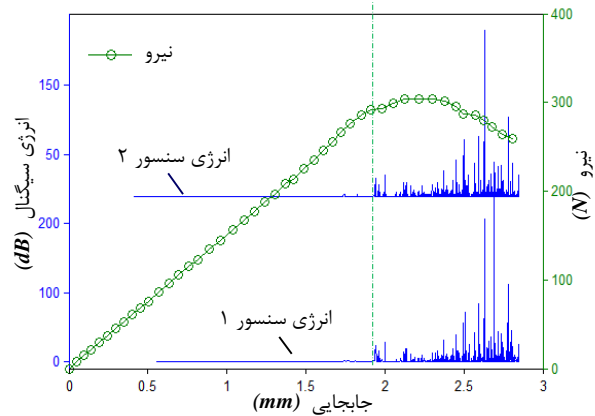
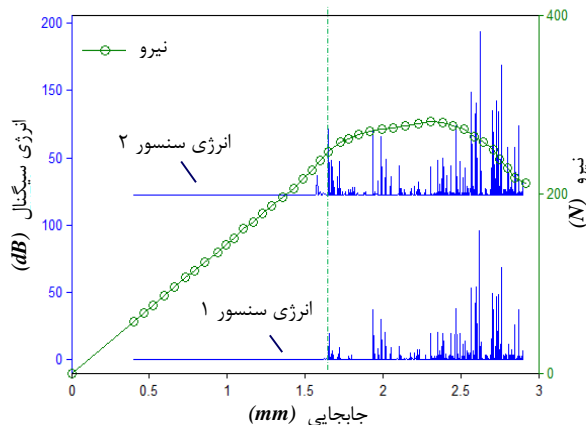
شماره نمونه	۱	۲	۳
غیر خطی شدن	۲۹۲/۴	۲۵۶/۸	۲۴۸/۴
افزایش ۵٪ نرمی	۳۰۲/۹	۲۷۱/۹	۲۵۳/۶
رشد جدایش دیداری	۲۷۲/۱	۲۵۵/۲	۲۶۰/۳
مجموع انرژی سیگنال	۲۹۱/۵	۲۴۸/۴	۲۳۰/۱
تابع سنتری	۲۹۱/۲	۲۴۶/۵	۲۳۵/۷



شکل ۹ نمودار نیرو و رشد ترک برحسب جابجایی فک برای قسمت ابتدایی در هر یک از نمودارهای شکل ۹ نیروی بحرانی محاسبه شده با استفاده از اولین روش ذکر شده (روش الف)، نمایش داده شده است. مقادیر نیروی بحرانی متناظر با هر یک از سه حالت اشاره شده در جدول ۱ ارائه گردیده است. در تمامی نمونه‌ها، حد پایین نیروی بحرانی توسط روش غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی پیش‌بینی شده است.

۳-۲- مشاهدات آکوستیک امیشن

تعیین نیروی بحرانی با استفاده از آکوستیک امیشن به سه روش انرژی سیگنال، مجموع انرژی سیگنال و تابع سنتری مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا



شکل ۱۱ نمودارهای تعیین نیروی بحرانی با استفاده از AE برای نمونه ۲

شکل ۱۰ نمودارهای تعیین نیروی بحرانی با استفاده از AE برای نمونه ۱

۳-۴- نتایج مدل سازی

همان طور که اشاره گردید، برای مدل سازی ایجاد و رشد خرابی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت از سطوح چسبیده نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای بدست آوردن پارامترهای ایجاد و رشد خرابی از مرجع [۱۸] استفاده گردید و پارامترهای لازم، جهت شروع خرابی اشاره شده در رابطه ۳ در جدول ۴ آورده شده است. خواص آلومینیوم و لایه کامپوزیتی در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. چقرمگی شکست مود یک از جدول ۳ استخراج شده است.

جدول ۳ چقرمگی شکست (J/m)

شماره نمونه	۱	۲	۳
غیر خطی شدن	۷۸۳/۲	۶۰۴/۱	۵۶۵/۲
افزایش ۵٪ نرمی	۸۴۰/۴	۶۷۷/۲	۵۸۹/۱
رشد جدایش دیداری	۶۷۸/۲	۵۹۶/۶	۶۲۰/۷

جدول ۲ مقادیر حساسیت

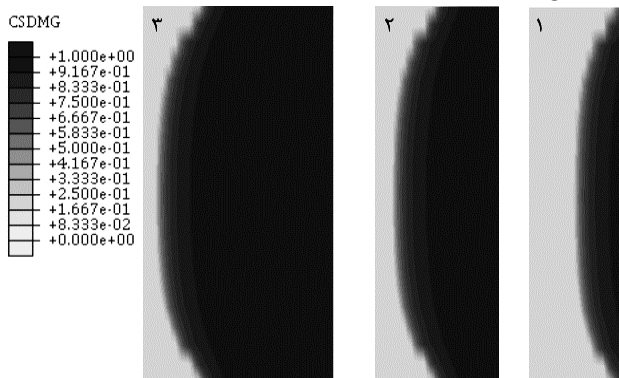
نمونه	نمودار انرژی سیگنال		نمودار مجموع انرژی AE		نمودار تابع سنتری	
	سنسور ۱	سنسور ۲	سنسور ۱	سنسور ۲	سنسور ۱	سنسور ۲
۱	۵/۱۵	۹/۹۴	۱۰/۲۴	۱۷/۱۳	۱۹/۱۵	۲۲/۶۸
۲	۶/۴۲	۷/۳۲	۱۳/۰۷	۱۸/۴۵	۲۲/۹۴	۲۶/۱۱
۳	-	۱۰/۰۳	-	۱۹/۱۵	-	۲۴/۶۴

جدول ۶ خواص مکانیکی لایه از پیش آغشته

$E_1 = E_r (GPa)$	$E_r (GPa)$	ν_{12}	$G_{12} (GPa)$
۷۳٫۱	۰٫۳۳	۳۱۰	۴۸۲

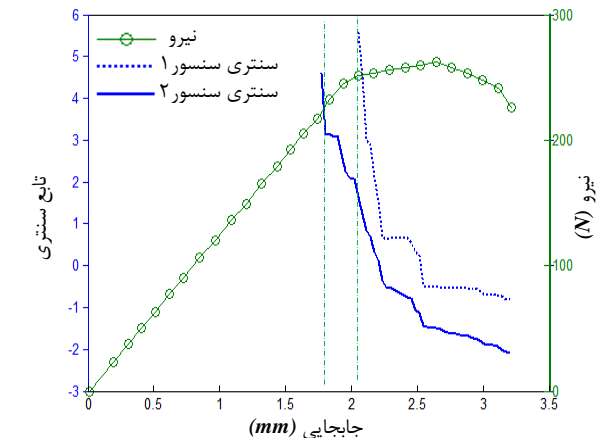
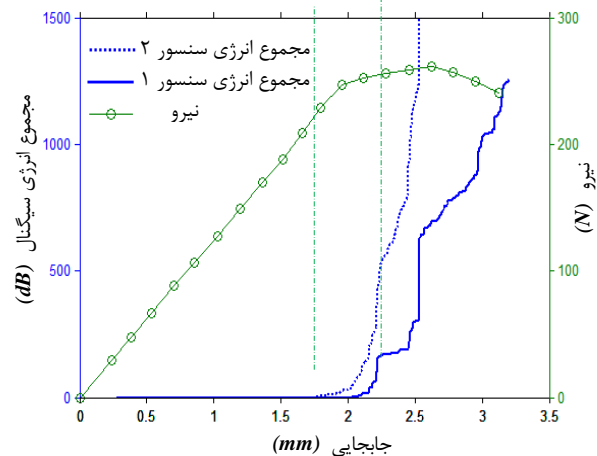
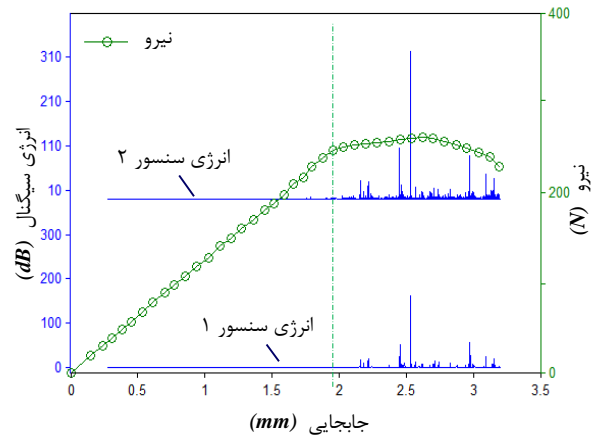
۲۹۷۶۰ المان سه بعدی برای کل نمونه در نظر گرفته شده است که در منطقه رشد خرابی المان‌ها ریزتر (با اندازه ۰/۲mm در جهت طول نمونه) نسبت به دیگر مناطق (با اندازه ۲mm در جهت طول نمونه) قرار داده شده است تا از قرار داشتن حداقل ۵ المان در محدوده چسبیده اطمینان حاصل گردد. در شکل ۱۳ المان‌های نمونه نمایش داده شده است. اندازه و تعداد المان‌ها برای کل نمونه، منطقه رشد خرابی و منطقه چسبیده با استفاده از مرجع [۱۸] و چندین بار مدل‌سازی بدست آمده است. جهت اعمال بار به قطعه آلومینیومی، دو قطعه فولادی متصل شده و به لبه‌های قطعه فولادی جابجایی در جهت عمود به آن اعمال شده است.

برای بررسی جدایش، از پارامتر خرابی المان‌ها CSDMG تعریف شده در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. المان‌هایی که مقدار این پارامتر برای آن‌ها صفر می‌باشند کاملاً سالم بوده و المان‌هایی که مقدار این پارامتر برای آن‌ها یک می‌باشند، کاملاً خواص چسبندگی خود را از دست داده‌اند، المان‌هایی که دارای مقادیر بین ۰ و ۱ هستند، خرابی در آن‌ها شروع شده است. در شکل ۱۳ تغییرات این پارامتر برای المان‌های چسبیده در سه وضعیت نمایش داده شده است. یکی از نتایج بدست آمده از این شکل تعیین جبهه ترک می‌باشد. در وضعیت ۱ اولین المان به مقدار یک می‌رسد و همان‌طور که مشاهده می‌گردد در ادامه در وضعیت ۲ و ۳ جبهه ترک به صورت منحنی پیشروی کرده است. در شکل ۱۴ تنش در جهت عمود بر فصل مشترک σ_{33} نمایش داده شده است. در این شکل، نوع مش‌بندی و شرایط مرزی مشخص می‌باشد. در شکل ۱۵ نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تست و مدل‌سازی با استفاده از مقادیر چقرمگی بدست آمده از سه روش غیر خطی شدن، مجموع انرژی سیگنال آکوستیک امیشن و تابع سنتری برای نمونه دو، نمایش داده شده است. در شکل ۱۶ نمودار رشد جدایش در نمونه با استفاده از پارامتر خرابی المان نمایش داده شده است. در این شکل مدل با توجه چقرمگی شکست به دست آمده از روش تابع سنتری در مدل المان محدود اعمال شده است.



شکل ۱۳ پارامتر CSDMG و جبهه ترک بدست آمده از FEM برای نمونه DCB

۴۸۵/۱	۵۶۵/۲	۷۷۸/۴	مجموع انرژی سیگنال
۵۰۸/۹	۵۵۶/۶	۷۷۶/۸	تابع سنتری



شکل ۱۲ نمودارهای تعیین نیروی بحرانی با استفاده از AE برای نمونه ۳

جدول ۴ تنش‌های بحرانی برای معیار شروع خرابی

$N_{max} (MPa)$	$T_{max} (MPa)$	$S_{max} (MPa)$
۳۰	۳۰	۱۳

جدول ۵ خواص مکانیکی T۳-۲۰۲۴

$E (GPa)$	ν	$\sigma_y (MPa)$	$\sigma_u (MPa)$
۷۳٫۱	۰٫۳۳	۳۱۰	۴۸۲

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به پایش و آنالیز شروع خرابی در اتصالات آلومینیوم/کامپوزیت با استفاده از آکوستیک امیشن و مدل‌سازی الان محدود پرداخته شده است. جهت کاهش خطا در تعیین چقرمگی شکست، نمونه آزمون با استفاده از لایه از پیش آغشته به آلومینیوم متصل گردیده تا خطای ناشی از عملیات ساخت دستی کاهش پیدا کند که این امر منجر به تکرار پذیر بودن مطلوب نتایج گردید. ضخامت آلومینیوم نیز بر اساس عدم وارد شدن به منطقه پلاستیک تعیین گردید. ابتدا با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی و استاندارد، سپس با استفاده از آکوستیک امیشن، مقادیر نیروی بحرانی و به تبع آن چقرمگی شکست بدست آورده شد.

با توجه به نزدیک بودن مقادیر نیروی بحرانی بدست آمده از روش‌های آکوستیک امیشن برای مقایسه این روش‌ها پارامتر حساسیت تعریف گردید و مشخص گردید روش تابع سنتری دارای حساسیت بیشتری می‌باشد. با مقایسه نتایج همه روش‌ها، روش تابع سنتری مقدار چقرمگی شکست کمتری را ارائه می‌نماید.

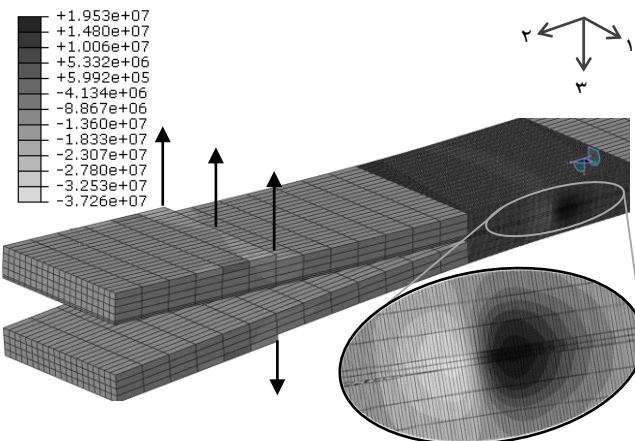
جهت بررسی رفتار شکست در لحظه شروع و رشد آن، از مدل ناحیه چسبیده استفاده گردید. اندازه المان‌ها بگونه‌ای انتخاب گردید که اولاً طول ناحیه چسبیده به گونه‌ای باشد که حداقل ۵ المان در این ناحیه قرار داشته باشد و ثانیاً نتایج مستقل از اندازه المان‌ها گردد. مقدار چقرمگی شکست مود اول لازم در مدل ناحیه چسبیده با استفاده از رابطه ارائه شده توسط استاندارد به دست آمده و نیروی بحرانی مشخص شده در این رابطه با استفاده از روش‌های مختلف به دست آورده شده است. چقرمگی شکست حاصله از روش تابع سنتری، مقدار کمتری حاصل گردید و با بررسی نتایج مدل‌سازی با چقرمگی‌های شکست بدست آمده از روش‌های مختلف، مشاهده گردید نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده با چقرمگی شکست حاصله از روش تابع سنتری، زیر بقیه نمودارها می‌باشد.

جهت بررسی روند حرکت جبهه جدایش از پارامتر خرابی المان استفاده گردید و مشاهده گردید شروع خرابی در محل عیب اولیه از وسط نمونه ایجاد شده و به سمت لبه‌های نمونه گسترش می‌یابد. نتایج تجربی و مدل‌سازی رشد جدایش و نمودار نیرو جابجایی دارای انطباق خوبی می‌باشد و مشاهده گردید روش مدل ناحیه چسبیده روشی مناسب جهت بررسی جدایش در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت می‌باشد.

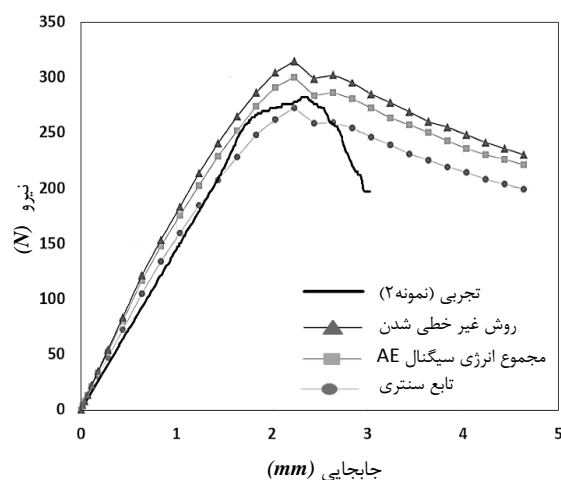
در این پژوهش مشخص گردید روش آکوستیک امیشن با توجه به بلادرنگ بودن و دقت بالای آن می‌تواند لحظه شروع خرابی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت تحت بارگذاری مود یک را، با دقت بیشتری شناسایی نماید.

۵- فهرست علائم

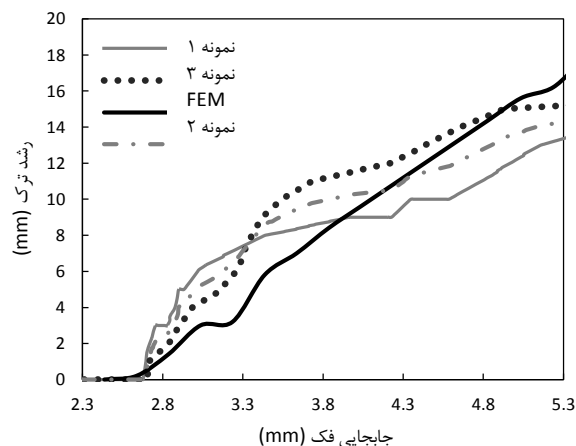
- G_I نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی تحت مود یک
- G_{IC} نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی تحت مود یک
- P نیروی کششی فک دستگاه کشش
- T تنش کششی
- Δ جدایش
- δ جابجایی فک دستگاه کشش



شکل ۱۴ تنش در جهت عمود بر فصل مشترک σ_{33}



شکل ۱۵ نتایج حاصل از تست و مدل‌سازی



شکل ۱۶ نمودار رشد ترک دیداری و مدل‌سازی برحسب جابجایی

با توجه به اینکه چقرمگی شکست بدست آمده در روش تابع سنتری دارای مقدار کمتری می‌باشد در نمودار نیرو بر حسب جابجایی مدل‌سازی شده با استفاده از این روش، در زیر دو نمودار دیگر قرار دارد و این هم بدلیل این است که سطح زیر منحنی با چقرمگی شکست در ارتباط بوده و هرچه چقرمگی بیشتر باشد سطح زیر منحنی بیشتر خواهد شد.

۶- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه تست‌های غیر مخرب دانشکده مهندسی مکانیک و آزمایشگاه شکست و خستگی دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بخاطر فراهم نمودن تجهیزات لازم برای آزمون‌های این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را اعلام نمایند.

۷- مراجع

- [15] A. A. Bakhtiary Davijani, M. Hajikhani, M. Ahmadi, Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, 2011, pp. 3059-3065.
- [16] Alfano, M., Furguele, F., Leonardi, A., Maletta, C., and Paulino, G. H. ., Analysis of Mode I Fracture in Adhesive Joints Using Tailored Cohesive Zone Models ,*Int. J. Fract.*, Vol. 157 ,2009 ,pp. 193-204.
- [17] Yuan, H. and Xu, Y" .,Computational Fracture Mechanics Assessment of Adhesive Joints ",*Comput. Mater. Sci.*, Vol. 43(1), 2008, pp. 146-156.
- [18] Scheider, I. and Brocks, W.,Cohesive Elements for Thin Walled Structures ,*Comput. Mater. Sci.*, Vol. 37, 2006, pp. 101-109.
- [1] Kinloch, J., *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, Chapman & Hall, London, 1987.
- [2] Kinloch, A. J., *Adhesives in Engineering*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Vol. 211(5), 1997, pp.307-335 .
- [3] Mostovoy, S., Crosley, P. B., and Ripling, E. J ,Use of Crack Line Loaded Specimens for Measuring Plane Strain Fracture Toughness, *J. Mater.*, Vol. 2, 1967, pp. 661-668.
- [4] Blackman, B., Kinloch, A. J., Paraschi, M., and Teo, W. S. ,Measuring the Mode I Adhesive Fracture Energy, G_c , of structural Adhesive Joints: The Results of an International Round-Robin ,*Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 23(4), 2003, pp. 293-305.
- [5] 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.
- [6] Imanaka, M., Motohashi, S., Nishi, K., Nakamura, Y., and Kimoto, M ., Crack-Growth Behaviour of Epoxy Adhesives Modified with Liquid Rubber and Cross-Linked Rubber Particles Under Mode I Loading ,*Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 29(1), 2009, pp. 45-55.
- [7] M. Alfano, F. Furguele, L. Pagnotta, and G. H. Paulino, Analysis of Fracture in Aluminum Joints Bonded with a Bi-Component Epoxy Adhesive, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 39, No. 2 .
- [8] Sundaravalli S, Vijayaraghavan G.K. and Majumder M.C., Estimation of required heat input for the evaluation of Disbonds in FMLs Using Thermography, International Conference on Modeling, Optimization and Computing (ICMOC 2010), National Institute of Te .
- [9] Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, J. Aurrekoetxea, Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 5, pp. 1 .
- [10] Yu Y.H., Choi J.H., Kweon J.H., Kim D.H., A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission, *Composite Structures*, Vol.75, 2006, pp.163-169.
- [11] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage Characterization of Glass/Epoxy Composite Under Three-Point Bending Test Using Acoustic Emission Technique, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 7, pp. 1380-1390 .
- [12] A. R. Oskoei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1444 .
- [13] 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, *Moades Mechanicla Engineering*, Vol. 14, Issue 4, June 2014 (In Persian)
- [14] ASTM D3433-93, Standard test method for fracture strength in cleavage of adhesives in bonded metal joints, American Society for Testing and Materials, Philadelphia,PA, 1993.