مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 78-86

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی و پایش جدایش بین‌لایه ای در کامپوزیت‌های فلز/الیاف تحت بارگذاری مود اول و دوم با استفاده از مدل‌سازی عددی و آکوستیک امیشن

مرتضی احمدی نجف‌آبادی[1]، مجتبی صدیقی[2]، منوچهر صالحی[3*] حسین حسینی تودشکی[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
4- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
*تهران، صندوق پستی 1587-4413، msalehi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 خرداد 1394
پذیرش: 22 تیر 1394
ارائه در سایت: 07 مرداد 1394

کلید واژگان:
چند لایه‌های فلز الیاف
آکوستیک امیشن
جدایش بین لایه‌ای
چقرمگی شکست بین لایه‌ای

چکیده

در این پژوهش به بررسی رفتار جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های فلز/الیاف تحت بارگذاری مود اول و دوم با استفاده از مدل‌سازی عددی و تحلیل داده‌های آکوستیک امیشن پرداخته می‌شود. نمونه‌های آزمون با استفاده از لایه کامپوزیت از پیش آغشته (الیاف شیشه/اپوکسی) و آلومینیوم 2024-T3 (آنودایز شده در محلول اسید کرمیک) ساخته شده است. محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای تحت بارگذاری مود یک و دو نیازمند شناسایی لحظه شروع جدایش می‌باشد که با به‌کارگیری روش آکوستیک امیشن این لحظه به‌دست آورده شده است. بررسی شروع و رشد جدایش با استفاده از مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس (استفاده از توابع المان چسبنده) انجام شده است. نمودار نیرو-جابجایی، رشد پیشرونده جدایش و جبهه آن از نتایج مدل‌سازی عددی می‌باشد که با فعالیت‌های تجربی مقایسه شده است. آنالیز فرکانسی روی امواج حاصل از شکست صورت گرفته و با دسته بندی آن بررسی روند رشد جدایش صورت گرفته است و محدوده فرکانسی هر یک از مکانیزم‌های شکست بدست آورده شده است. برای صحه‌سنجی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مکانیزم‌های شکست بررسی و شناسایی گردیده است.

Investigation and monitoring of delamination in FMLs under mode I and II loading with FEM and AE

Morteza Ahmadi Najafabadi[1], Mojtaba Sedighi[1], Manouchehr Salehi[1]*, Hossin Hossini Toudeshky[2]

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 June 2015
Accepted 13 July 2015
Available Online 29 July 2015

Keywords:
Fiber metal laminate
Acoustic emission
Delamination
Interlaminar fracture toughness

ABSTRACT

In this study the delamination behavior of FMLs loaded under mode I and II conditions is investigated by using numerical modeling and acoustic emission (AE) data analysis. Test samples were made of prepreg (glass/epoxy composite) and aluminum 2024-T3 (chromic acid anodized). Detection of delamination initiation moment is required for calculation of interlaminar fracture toughness in mode I and II which is detected by using AE technic. Initiation and propagation of delamination is modeled by Abaqus software by using cohesive element. Load-displacement curve, progressive debonding and delamination face are the results taken from FEM and are compared with test results. Signal frequency processing is done for identifying delamination propagation and classification of fracture mechanism. Delamination mechanism is validated by Scanning electron microscope (SEM) images.

1- مقدمه

اتصال چسبی دارای حیطه کاربردی وسیع در صنایع الکترونیکی، خودرو و هوایی می‌باشد. تعمیرات سازه‌های هوایی توسط وصله یکی از کاربردهای آن می‌باشد. هنگام اتصال دو جسم به هم امکان بوجود آمدن عیوب ریز زیاد وجود دارد و در حین کارکرد گسترش این عیوب ریز می‌تواند باعث ایجاد خرابی گردد [1]. پایش و تشخیص شروع خرابی در این اتصالات احتمال وقوع خرابی‌های فاجعه آمیز را کم می‌کند.

برای تخمین چقرمگی شکست بین لایه‌ای می‌توان از نمونه‌های آزمون مود یک شکست[1] و مود دو شکست[2] استفاده نمود.

از سال 1960 میلادی نمونه مود یک جهت بدست آوردن چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود یک به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [2]. این نمونه در عمل به راحتی ساخته شده و روند رسیدن به داده‌های دقیق در مرجع [3] موجود می‌باشد. این روند در طی سال‌ها اصلاح و بهبود پیدا کرده و در نهایت استاندارد [4] برای آن ارائه گردیده است. یکی از عوامل

1- DCB
2- ENF

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Ahmadi Najafabadi, M. Sedighi, M. Salehi, H. Hossini Toudeshky, Investigation and monitoring of delamination in FMLs under mode I and II loading with FEM and AE, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 9, pp. 78-86, 2015 (In Persian)

ایجاد خطا در روند محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای مشخص کردن لحظه شروع خرابی یا رشد ترک می‌باشد.

مدل‌سازی المان محدود و آزمون تجربی جهت بررسی جدایش پیشرونده برای دو لایه آلومینیوم متصل شده با چسب اپوکسی تحت مود یک در تحقیق [5] صورت گرفته است. از نتایج آزمون چقرمگی شکست بین لایه‌ای بدست آورده شده و با استفاده از مدل ناحیه چسبنده مدل‌سازی جدایش صورت پذیرفته است. انطباق مطلوبی بین نتایج تجربی و مدل‌سازی وجود داشته و روش مدل ناحیه چسبنده بعنوان روشی مناسب برای بررسی جدایش معرفی شده است.

همان طور که اشاره گردید ارزیابی دقیق عیوب ایجاد شده در اتصال بخاطر تاثیر منفی آن‌ها بر عملکرد و قابلیت اطمینان اتصال لازم می‌باشد. برای تشخیص این عیوب معمولا از روش‌های غیر مخرب استفاده می‌گردد. از بین روش‌های آزمون غیر مخرب برای پایش شروع خرابی از جمله آکوستیک امیشن، گرمانگاری، روش فراصوتی و اشعه ایکس که دارای مزایا و معایبی خاص خود هستند [6]، بجز روش آکوستیک امیشن روش‌های دیگر قابلیت تشخیص وقوع عیب را به صورت بلادرنگ ندارند. گودین و همکارانش، تشخیص انواع مختلف خرابی‌ها در مواد کامپوزیتی شیشه/پلی‌استر را با بکارگیری آکوستیک امیشن انجام داده و با تحلیل تحلیل امواج ساطع شده آن، منابع مختلف این امواج را شناسایی کردند [7].

آزاد شدن سریع انرژی کرنشی در جسم و انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر وقوع خرابی را آکوستیک امیشن گویند. از مزایای استفاده از روش آکوستیک امیشن در بررسی خرابی مواد مرکب، می‌توان به قابلیت تفکیک انواع مختلف خرابی، همچون ترک‌خوردگی ماتریس، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای اشاره نمود [8]. در پژوهشی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در کامپوزیت پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری مود یک با استفاده از تابع سنتری، محاسبه شده است [9]. همچنین در پژوهشی دیگر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را برای الیاف تک جهته و دو جهته در مواد مرکب پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری مود یک، دو و ترکیبی ا با استفاده از آکوستیک امیشن و تابع سنتری بدست آورده شده است [10].

سازه‌های کامپوزیتی در حین کارکرد علاوه بر بارگذاری مود یک تحت بارگذاری مود دو و ترکیبی نیز قرار دارند. یوسفی و همکاران در نمونه‌های شیشه/اپوکسی رشد جدایش بین لایه‌ای را تحت بارگذاری مود دو بررسی نمودند و با استفاده از پردازش امواج آکوستیک امیشن موفق به تفکیک امواج مربوط به انواع خرابی‌ها بر اساس محدوده فرکانس امواج ساطع شده برای هر مکانیزم شدند [11].

کامپوزیت‌های چندلایه‌ای فلز/ الیاف شامل ورق‌های نازک به هم متصل شده از آلومینیوم و کامپوزیت می‌باشند که دارای ترکیبی از رفتار فلز و کامپوزیت می‌باشد. این مواد تحمل بالایی در برابر آسیب دارند و به خاطر خصوصیات خستگی خوب و مقاومت بالا در کاربردهای هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای و شناسایی لحظه شروع جدایش در مواد مرکب پایه الیاف شیشه تحقیقات زیادی صورت گرفته و استاندارد برای بدست آوردن چقرمگی شکست بین لایه‌ای ارائه شده است. همچنین پژوهش‌هایی در زمینه بررسی امواج آکوستیک امیشن در اتصالات کامپوزیت/کامپوزیت صورت گرفته است ولی تحلیل امواج آکوستیک امیشن در خصوص شروع و رشد خرابی در مواد مرکب فلز/الیاف نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش ابتدا با استفاده از روابط موجود در تحقیقات مشابه و همچنین آکوستیک امیشن چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود یک و دو بدست آورده شده است. از مقادیر بدست آمده جهت مدل سازی المان محدود دو نمونه استفاده گردیده است. در ادامه نیز تحلیل فرکانسی برای نمونه کامپوزیتی تحت کشش و نمونه‌های مود یک و دو شکست انجام گردید و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از عکس‌های گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی مکانیزم شکست در اتصال مورد بررسی و ارتباط بین نتایج تحلیل فرکانسی و مکانیزم‌های شکست بدست آورده شده است.

2- آکوستیک امیشن

آکوستیک امیشن طبق تعریف موسسه آزمون و مواد آمریکا به دسته‌هایی از پدیده‌های دینامیکی اطلاق می‌شود که در آن‌ها امواج گذرا به دلیل آزاد شدن سریع انرژی کرنشی در منابع موضعی و یا ایجاد تغییر شکل دائم در مواد تحت تنش به وجود می‌آیند.

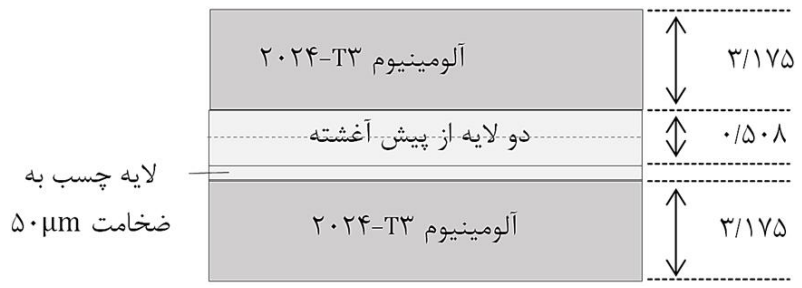
این امواج در محدوده فرکانسی بسیار وسیع منتشر می‌شوند و سنسورهای خاصی را تحریک میکنند. در نهایت این سنسورها ارتعاشات مکانیکی را به امواج الکتریکی تبدیل می‌کنند. ولتاژ خروجی سنسور تقویت و فیلتر می‌شود. در نهایت الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل آماری بر روی سیگنال اعمال و نتایج حاصله تفسیر می‌گردد.

در این پژوهش جهت تحلیل فرکانسی امواج آکوستیک امیشن، با استفاده از کدی که در نرم‌افزار متلب[1] نوشته شده است از امواج آکوستیک امیشن، تبدیل فوریه گرفته شده است و فرکانس‌های غالب برای هر موج بدست آورده شده است. سپس با تعیین محدوده فرکانسی و زمانی، مجموع دامنه فرکانس‌های غالب در هر محدوده زمانی و فرکانسی بدست آورده شده است.

3- مدل‌سازی المان محدود

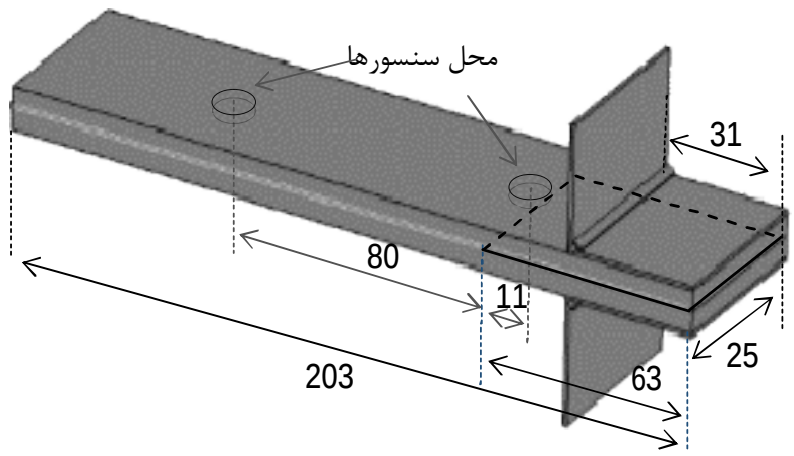
3-1- آماده سازی نمونه آزمون

نمونه‌های مود یک و دو شکست با توجه به استانداردهای ASTM D5528 [4] و ASTM D6671 [12] و عدم وارد شدن به منطقه پلاستیک در حین بارگذاری طراحی گردیده است. در شکل 1 چیدمان لایه‌ها نمایش داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌گردد دو لایه کامپوزیت، بین دو لایه آلومینیوم قرار داده شده است. جهت ایجاد ترک اولیه یک لایه جدا کننده به ضخامت 50 میکرون به طول 63 میلی‌متر قرار داده شده است. در شکل 2 و شکل 3 ابعاد نمونه مود اول و دوم نمایش داده شده است. لایه کامپوزیتی به صورت پارچه از پیش آغشته با الیاف دو جهته عمود بر هم می‌باشد. الیاف لایه کامپوزیتی شیشه از نوع ای با در صد حجمی 50 درصد و رزین آن، اپوکسی می‌باشد که خواص مکانیکی در جدول 1 نمایش داده شده است و ورق آلومینیومی از جنس2024-T3 می‌باشد که خواص در جدول 2ارائه شده است.

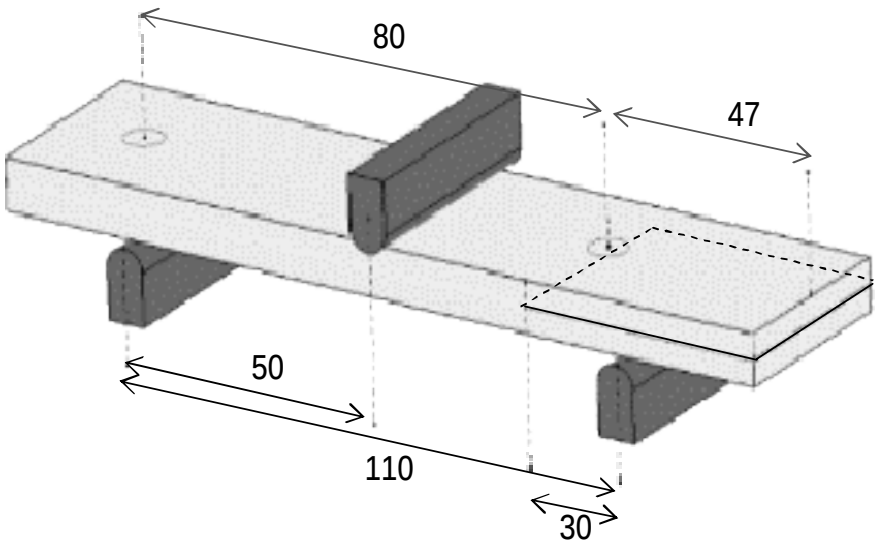


شکل 1 چیدمان لایه‌ها در نمونه‌های مود اول و دوم (در واحد میلی‌متر)

1- Matlab



شکل 2 ابعاد نمونه مود اول (در واحد میلی‌متر)



شکل 3 ابعاد نمونه مود دوم (در واحد میلی‌متر)

جدول 1 خواص لایه کامپوزیتی

$E_1 = E_2$ (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)
26/2	6/51	0/14	3/51

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024-T3

E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
73/1	0/33	310	482

3-2- چقرمگی شکست بین لایه‌ای

با توجه به عدم وجود استاندارد برای تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای برای مواد مرکب فلز الیاف، جهت محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای از دو مرجع استفاده شده است. در روش اول رابطه موجود در استاندارد [13] ASTM D3433 بکار گرفته شده است. این استاندارد مربوط به فلزات متصل شده توسط چسب می‌باشد که در این تحقیق بدلیل نازک بودن لایه کامپوزیت، این لایه بعنوان چسب در نظر گرفته شده است.

$$G_{IC} = \frac{[4F^2][3a^2 + h^2]}{[EB^2h^3]} \qquad (1)$$

که در آن F نیروی متناظر با لحظه رشد ترک (واحد نیوتن)، E مدول الاستیک ماده چسبیده شده (واحد Pa) که در این تحقیق آلومینیوم می‌باشد، B ضخامت نمونه (واحد m)، a طول ترک (واحد m) و h ضخامت چسب (واحد m) می‌باشد.

در روش دوم چقرمگی شکست بین لایه‌ای با بهره‌گیری از رابطه ارائه شده در مرجع [14] محاسبه گردیده است.

$$G_{IC} = \frac{A}{a.W}\left(\frac{\text{J}}{\text{m}^2}\right) \qquad (2)$$

که در آن A انرژی لازم برای رشد ترک یا سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی (واحد J)، a طول ترک (اختلاف طول ترک نهایی و اولیه در واحد m) و W عرض نمونه (واحد m) می‌باشد.

همچنین در این مرجع [14] رابطه‌ای جهت محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود دو نیز ارائه گردیده است.

$$G_{IIC} = \frac{9Pa^2d}{2W(0.25L^3 + 3a^3)}\left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \qquad (3)$$

که در آن d جابجایی فک در لحظه شروع رشد ترک (واحد m)، P نیروی بحرانی لازم برای رشد ترک (واحد نیوتن)، a طول ترک اولیه (واحد m) و L طول نمونه (واحد m) می‌باشد.

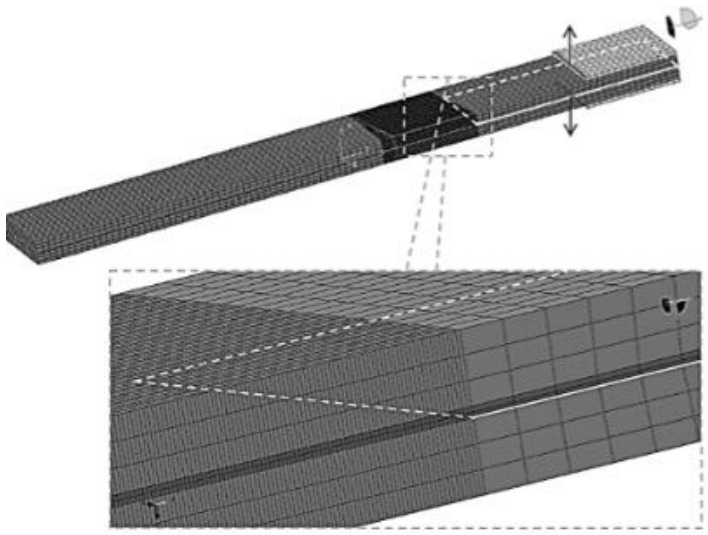
3-3- مدل ناحیه چسبنده

از مدل ناحیه چسبنده برای مدل‌سازی اتصال آلومینیوم/کامپوزیت استفاده شده است. این مدل‌سازی با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار آباکوس به صورت المان چسبنده با ضخامت صفر یا تعریف اتصال سطح امکان پذیر است. با مقایسه نتایج دو روش تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نگردید و نتایج ارائه شده در این تحقیق با استفاده از المان‌های چسبنده صورت گرفته است. خواص ناحیه چسبنده با استفاده از روابط (1) تا (3) بعنوان مقدار اولیه و چندین بار اجراء مدل‌سازی و مطابقت نمودار نیرو برحسب جابجایی حاصل از آزمون و مدل‌سازی بدست آمده است که در جدول 3 ارائه داده شده است.

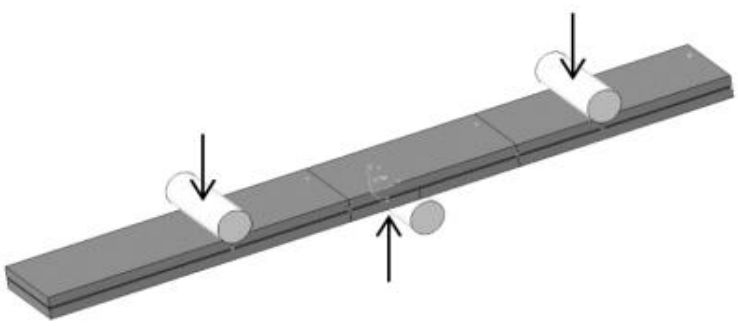
برای نمونه مود یک و مود دو شکست نوع المان‌ها و تعداد آن‌ها و لایه چینی بجز در محل اتصال لولا یکسان می‌باشد. تعداد 20960 المان سه بعدی C3D8R (برای قسمت آلومینیومی، کامپوزیتی و لولا) و تعداد 2360 COH3D8 (برای فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیتی) استفاده شده است. در منطقه رشد خرابی المان‌های ریزتر (با اندازه 0/2mm در جهت طول نمونه) نسبت به دیگر مناطق (با اندازه 2mm در جهت طول نمونه) قرار داده شده است تا از قرار داشتن حداقل 5 المان در محدوده چسبنده اطمینان حاصل گردد. مدل المان محدود برای دو نمونه در شکل 4 و شکل 5 نمایش داده شده است.

جدول 3 خواص مدل ناحیه چسبنده

α	G_{IC} (N/m)	G_{IIC} (N/m)	G_{IIIC} (N/m)
2/25	800	1500	1500
K (N/m³)	N_{max} (MPa)	T_{max} (MPa)	S_{max} (MPa)
10^{13}	5	20	20



شکل 4 مدل المان محدود نمونه مود یک شکست



شکل 5 مدل المان محدود نمونه مود دو شکست

۴-روند آزمون

۴-۱- آماده‌سازی نمونه

برای تولید نمونه‌های مود یک و دو شکست ابتدا دو ورق آلومینیوم و دو لایه کامپوزیت از پیش آغشته با توجه به مجموع ابعاد نمونه‌ها برش داده شده و سطوح آلومینیوم ابتدا اچ شده و سپس در محلول اسید کرمیک آنودایز شده است این فرآیند موجب پدید آمدن یک لایه اکسید روی سطح آلومینیوم می‌شود که باعث زبر شدن سطح و افزایش سطح تماس می‌گردد. در نتیجه با اعمال دو فرآیند استحکام اتصال کامپوزیت به آلومینیوم افزایش پیدا می‌کند. سپس دو ورق آلومینیوم، دو طرف لایه کامپوزیت همراه یک لایه جداکننده به ضخامت ۵۰ میکرون به عرض ۶۳/۵ mm در طول ورق در شرایط کنترل شده چسبانده شده است. در ادامه مجموعه در اتوکلاو تحت شرایط اعلام شده توسط کارخانه سازنده پخت شده است. در نهایت نمونه‌ها با وایرکات به ابعاد مورد نظر برش داده شده و با بازرسی چشمی (با بزرگ‌نمایی) از عدم وقوع جدایش در حین فرآیند برش‌کاری اطمینان حاصل شده است.

نمونه‌های کشش کامپوزیت مطابق با ابعاد نمایش داده شده در شکل ۶ ساخته شده است. این نمونه‌ها نیز با برش از یک ورق(شامل ۱۰ لایه) پخته شده بدست آمده است. محل اتصال به گیره نیز یک لمینت (شامل ۶ لایه) چسبانده شده است.

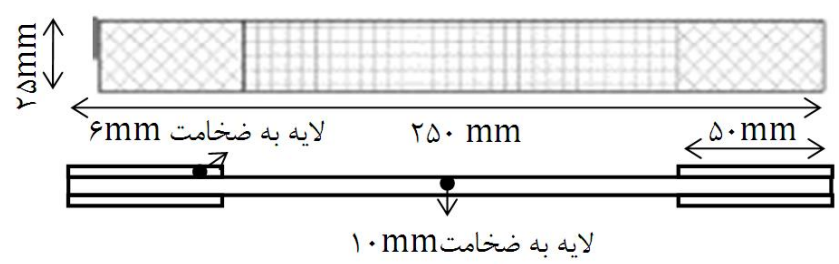
۴-۲- دستگاه‌های آزمون

از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا، با ظرفیت ۵ ton با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری ۰/۱mm/min تا ۵۰۰ برای آزمایش استفاده گردید. در این پژوهش سرعت بارگذاری ۱mm/min انتخاب شده است. برای نمونه‌های کشش از دستگاه دارتک با ظرفیت ۵ تن استفاده شده است.

برای داده‌برداری آکوستیکی از سامانه پی‌سی‌آی۲[1] با نرخ ۱MHz، نرم افزار آ-ای-وین[2] و دو سنسور پیزوالکتریک تک‌کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو[3]، محصول کمپانی پک[4]، استفاده گردید. فرکانس رزونانسی سنسورها ۵۱۳/۲۸kHz و محدوده بهینه کاری آن ۷۵۰-۱۰۰kHz می‌باشد. داده‌های دریافتی توسط هر سنسور بوسیله پیش تقویت کننده با ضریب ۴۰dB تقویت می‌گردد. از گریس سیلسکون خلا شده برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور استفاده شد. برای حذف نویز زمینه، در حین نمونه‌برداری حد آستانه ۳۵dB در نظر گرفته شد. چیدمان آزمایش و محل قرارگیری سنسورها برای آزمون مود یک در شکل ۷ و برای آزمون مود دو در شکل ۸ نمایش داده شده است.

۴-۳ روند آزمون

روند انجام آزمون مطابق با استاندارد [۴] برای نمونه مود یک و استاندارد [۱۲] برای نمونه مود دو با دستگاه کشش مدل هیوا انجام شده است. روند



شکل ۶ ابعاد نمونه کشش

1- PCI-2
2- AEWin
3- PICO
4- PAC

شکل ۷ چیدمان آزمایش مود اول

شکل ۸ چیدمان آزمایش مود دوم

انجام آزمون برای نمونه کشش کامپوزیت مطابق با استاندارد [۱۵] و با دستگاه کشش مدل دارتک انجام گردیده است (شکل ۹).

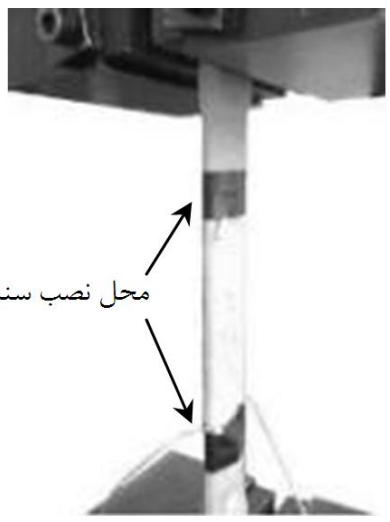
سنسورها در این نمونه‌ها به فاصله ۱۰۰ میلی‌متری نصب شده است. در این پژوهش برای تمامی آزمون‌ها سرعت بارگذاری ۱mm/min انتخاب شده است.

برای نمونه‌های مود یک و دو جهت اندازه‌گیری محل نوک ترک، سطح جانبی نمونه در فواصل ۱mm مدرج گردیده و همزمان با داده برداری با دستگاه کشش و سامانه آکوستیک امیشن از جابجایی نوک ترک نیز فیلم-برداری صورت گرفته است.

۵- نتایج

۵-۱- آزمون کشش

آزمون کشش برای سه نمونه کامپوزیتی(شکل ۶) جهت صحت‌سنجی خواص کامپوزیت و تحلیل فرکانسی امواج‌های آکوستیک امیشن انجام شده است که در شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابجایی نمایش داده شده است. در فرآیند کشش



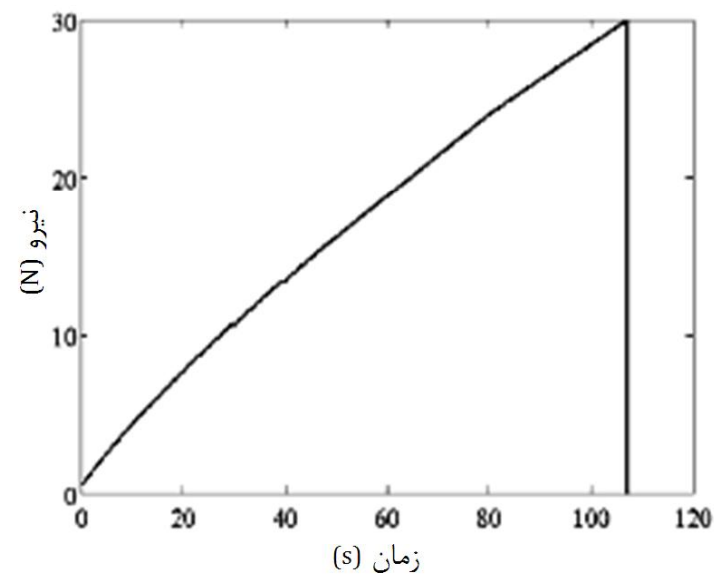
شکل ۹ چیدمان آزمایش کشش کامپوزیت

سه نوع مکانیزم شکست ماتریس، جدایش ماتریس از الیاف و شکست الیاف اتفاق می‌افتد. نتایج تحلیل فرکانسی نشان می‌دهد در ابتدا بارگذاری بیشتر فرکانس‌های تولید شده در محدوده ۵۰ تا۲۰۰ کیلوهرتز تولید شده است. با توجه به این‌که در این محدوده مکانیزم شکست ماتریس و جدایش ماتریس از الیاف مکانیزم‌های غالب می‌باشند، می‌توان این محدوده فرکانسی را مربوط به این نوع مکانیزم‌های شکست دانست. در قسمت انتهایی بارگذاری که مکانیزم شکست الیاف نیز اتفاق می‌افتد، مشاهده می‌گردد که فرکانس‌هایی در محدوده ۴۰۰ تا۵۰۰ کیلوهرتز نیز تولید شده است که این محدوده فرکانسی را نیز می‌توان مربوط به مکانیزم شکست الیاف دانست (شکل ۱۱).

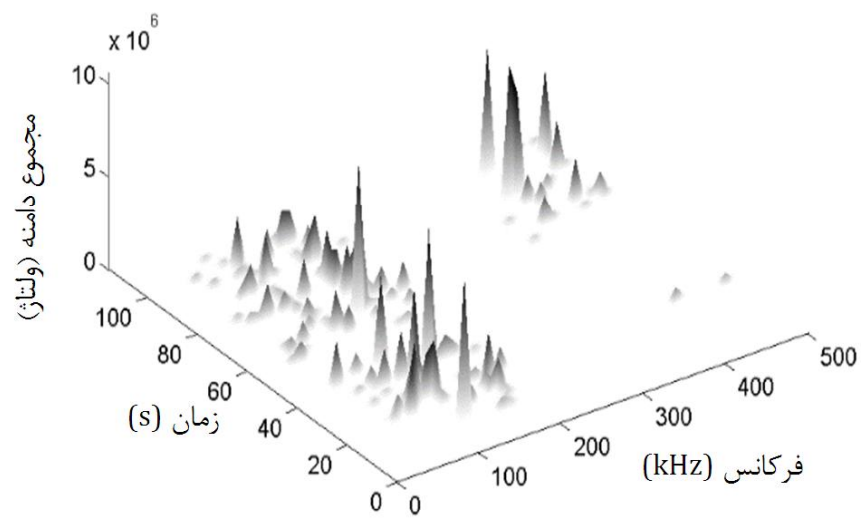
۵-۲- آزمون مود اول

برای مود اول شکست سه نمونه تحت شرایط یکسان مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱۲ نمودار نیرو- جابجایی همراه با رشد ترک جابجایی برای هر سه نمونه نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد در نمودار نیرو- جابجایی، نیرو بعد از رسیدن به مقدار بیشینه کاهش پیدا کرده و سپس سیر صعودی پیدا کرده است. برای توجیه این رفتار سطوح شکست (شکل ۱۳) مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید جدایش ابتدا بین آلومینیوم و کامپوزیت صورت گرفته و در ادامه (بعد از جدایش حدود ۶ میلی‌متر در لبه) وارد لایه کامپوزیت شده است. همچنین ملاحظه می‌گردد در لحظه تغییر مسیر جدایش، نیرو دوباره افزایش پیدا می‌کند و همچنین نمودار رشد ترک- جابجایی دچار تغییر شیب می‌شود.

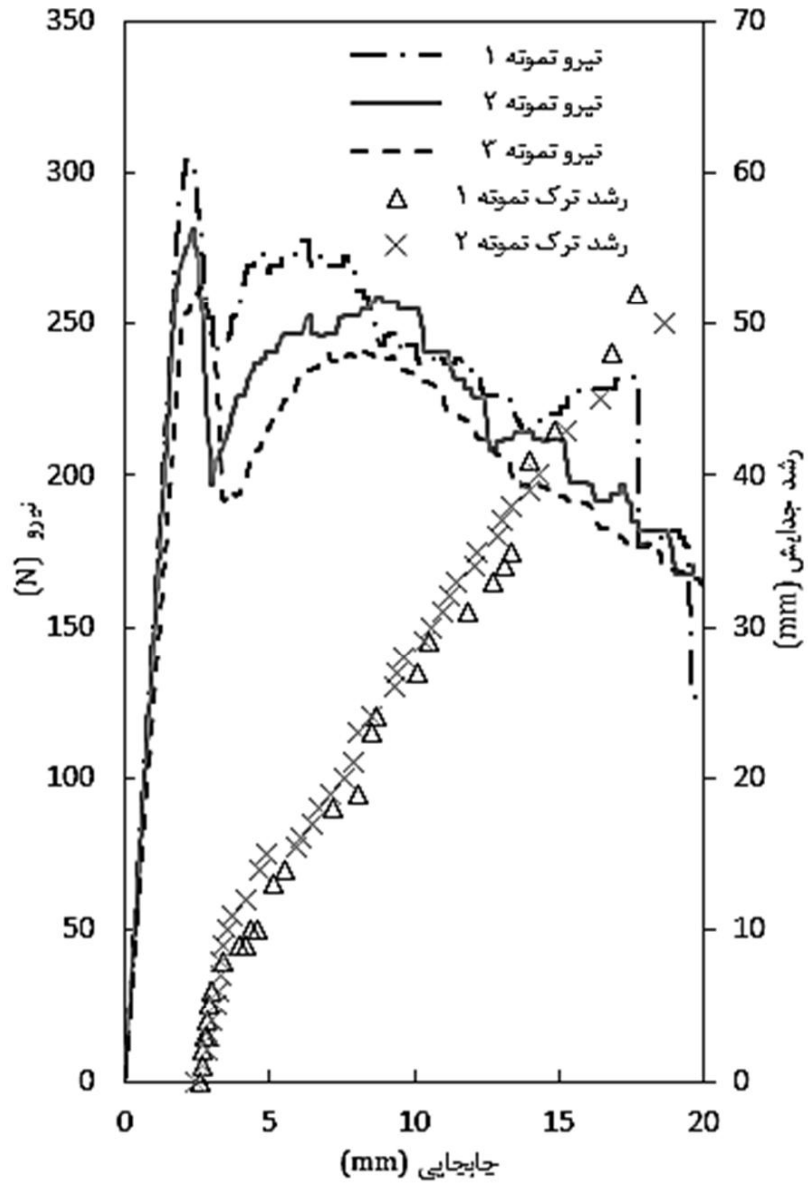
برای شناسایی لحظه شروع خرابی از نمودارهای انرژی و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن استفاده شده است. مشاهده گردید شناسایی لحظه شروع خرابی با استفاده از نمودار انرژی دارای حساسیت بالاتری می‌باشد. در شکل ۱۴ قسمت ابتدایی نمودار شکل ۱۲ نیرو و انرژی امواج آکوستیک



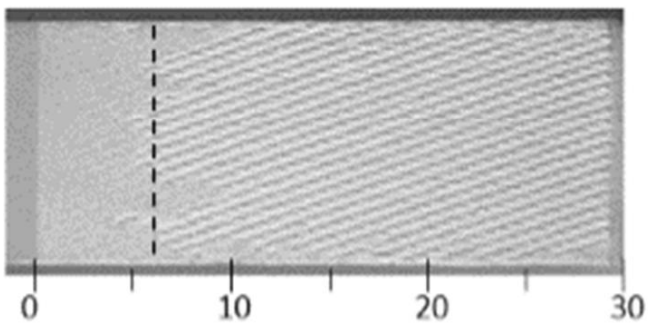
شکل ۱۰ نمودار نیرو-زمان نمونه کشش کامپوزیت



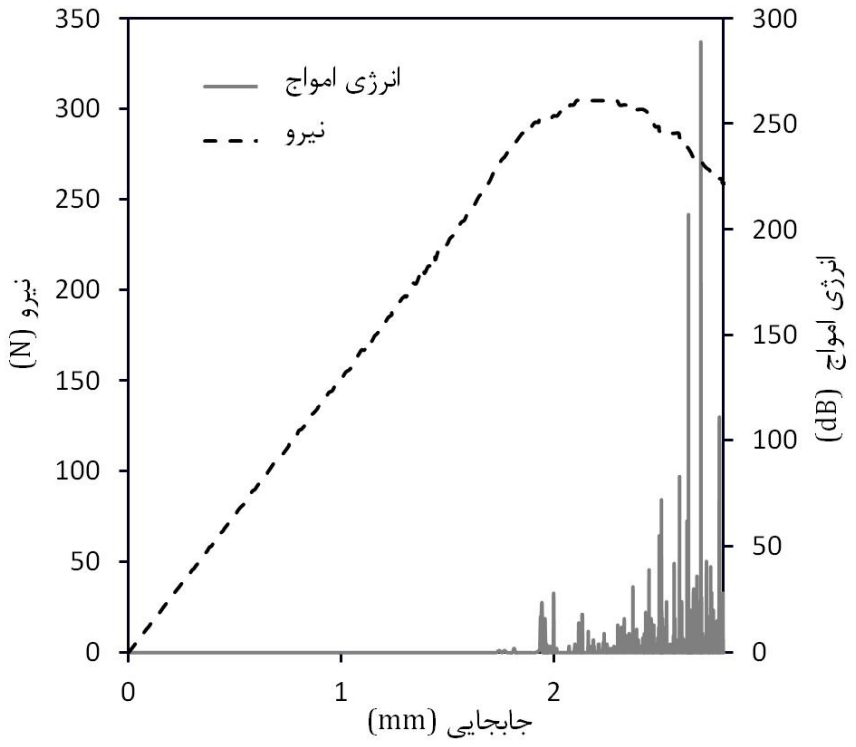
شکل ۱۱ نمودار تحلیل فرکانسی نمونه کشش



شکل ۱۲ نمودار نیرو- جابجایی همراه با رشد ترک جابجایی

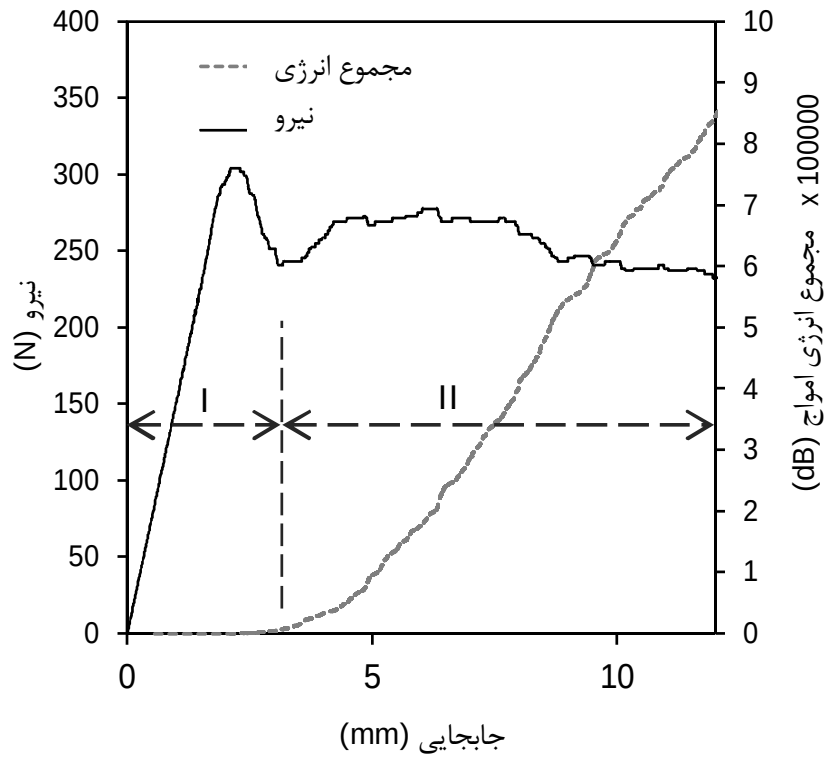


شکل ۱۳ سطح شکست نمونه مود یک (واحد mm)

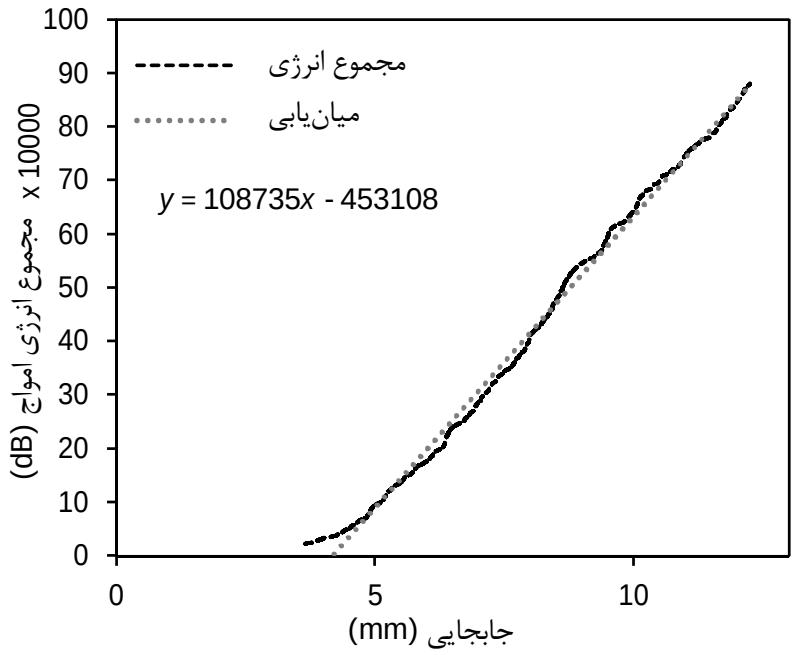


شکل ۱۴ نیرو و انرژی امواج آکوستیک برحسب جابجایی

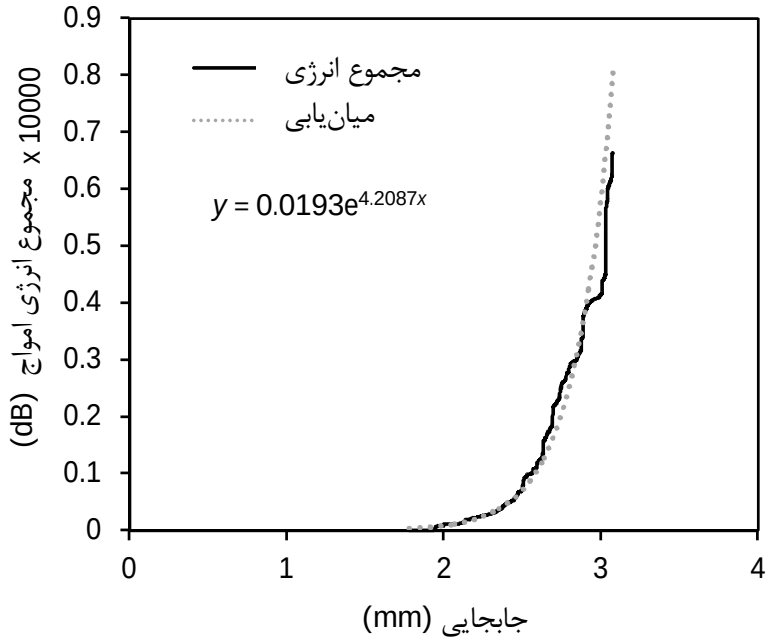
برحسب جابجایی نمایش داده شده است. از نمودار مجموع انرژی جهت بررسی رفتار جدایش استفاده شده است (شکل 15). نمودار با توجه به رفتار جدایش به دو قسمت تقسیم گردیده است. با بررسی نمودار مجموع انرژی مشاهده گردید رفتار این نمودار در منطقه I (جدایش بین آلومینیوم و کامپوزیت) به صورت خطی می‌باشد (شکل 16) و در منطقه II (جدایش در لایه کامپوزیت) به صورت توانی می‌باشد (شکل 17).



شکل 15 نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک برحسب جابجایی

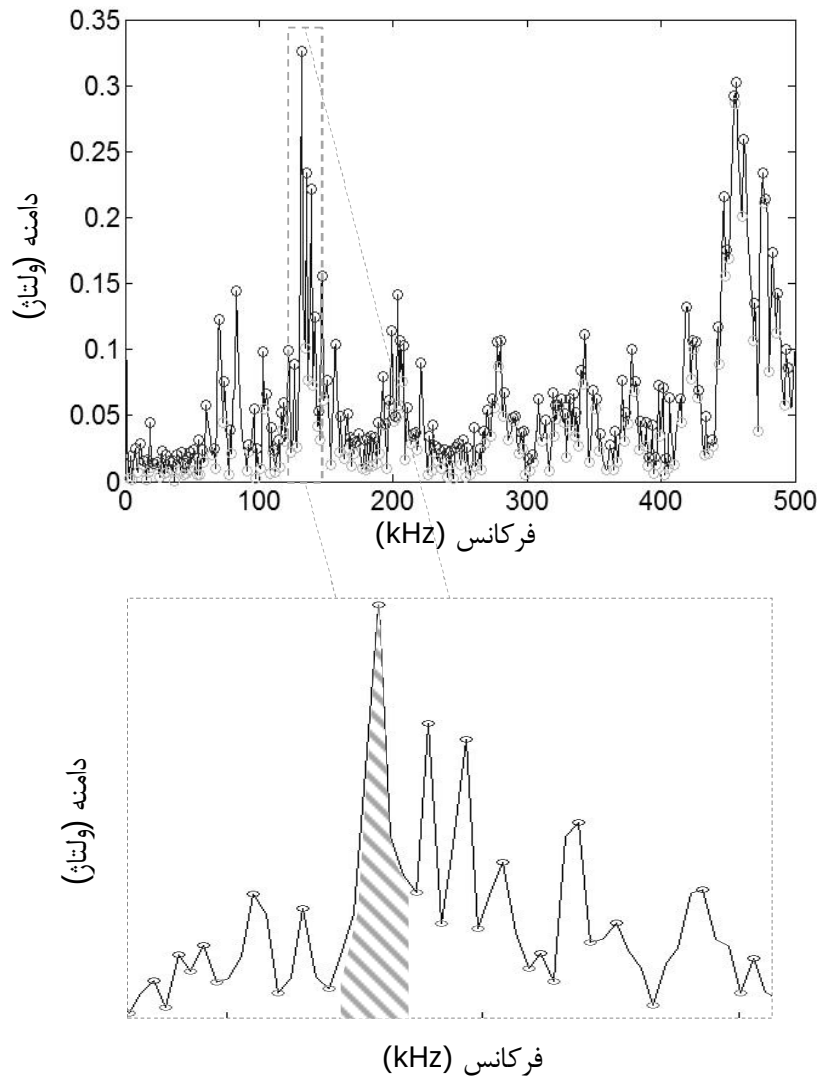


شکل 16 نمودار مجموع انرژی برحسب جابجایی در منطقه I

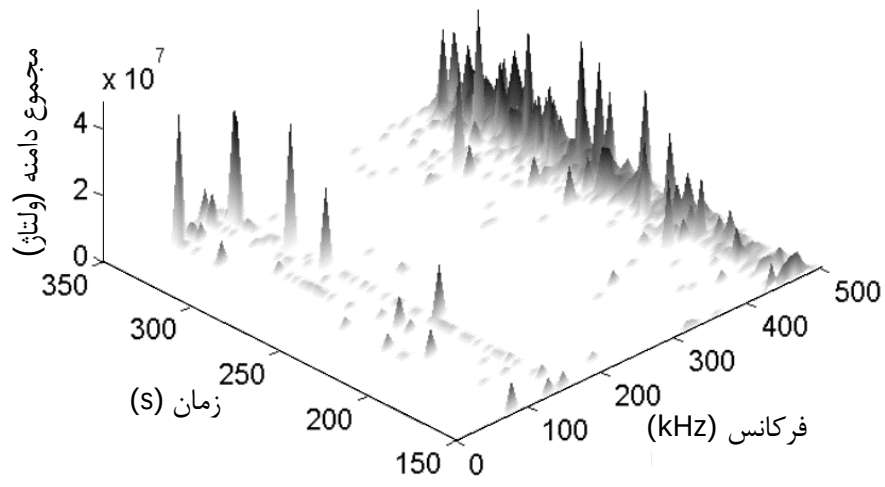


شکل 17 نمودار مجموع انرژی برحسب جابجایی در منطقه II

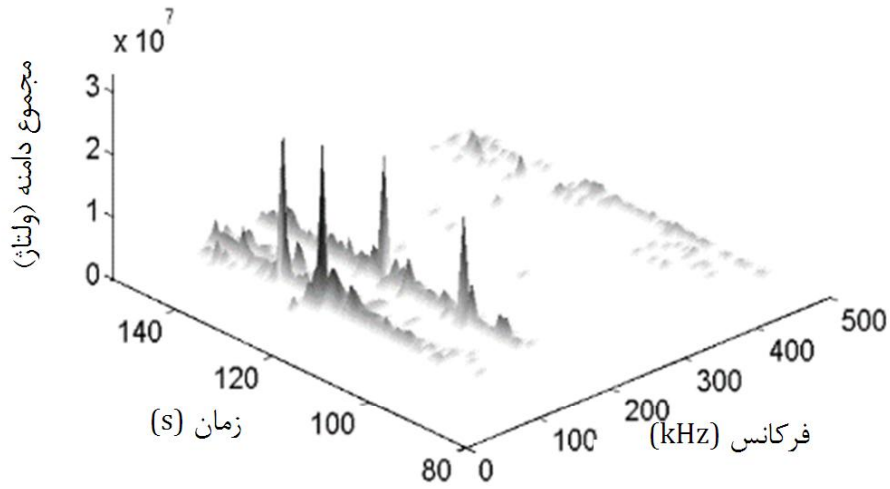
تحلیل فرکانسی با استفاده از تبدیل فوریه روی امواج صورت گرفته است. بعنوان مثال با اعمال تبدیل فوریه روی یک موج در شکل 18 نمایش داده شده است. سپس با یک کد برنامه نویسی نقاط بیشینه دامنه بدست آورده شده و سطح زیر نمودار محدوده آن نقطه محاسبه شده است. با جمع مساحت زیر نمودار فرکانس‌های غالب برای همه امواج در محدوده‌های زمانی مشخص در منطقه I، شکل 19 حاصل شده است. مشاهده می‌گردد فرکانس‌های غالب در محدوده 100 و 200 کیلوهرتز می‌باشند. با تحلیل فرکانسی در محدوده II شکل 20 حاصل گردید و مشاهده می‌گردد محدوده فرکانسی450 تا 500 کیلوهرتز غالب می‌باشد. با توجه به تحقیقات مشابه صورت گرفته [10] و نتایج قسمت 5-1 که محدوده فرکانسی مکانیزم شکست رزین و جدایش الیاف از رزین 50 تا200 کیلوهرتز و شکست الیاف 400 تا500 کیلوهرتز بدست آورده شده است، می‌توان رفتار جدایش پیش‌بینی شده (تغییر مسیر جدایش از بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت به داخل لایه کامپوزیت) را توجیه نمود. به این صورت که با تغییر مسیر جدایش شکست الیاف به مقدار قابل ملاحظه اتفاق می‌افتد و فرکانس‌ها در محدوده 450 تا 500 کیلوهرتز تولید می‌گردد.



شکل 18 تحلیل فرکانسی با استفاده از تبدیل فوریه



شکل 19 تحلیل فرکانسی در محدوده I



شکل ۲۰ تحلیل فرکانسی در محدوده II

برای اطمینان حاصل کردن از وقوع شکست الیاف و رزین سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته شد. تصاویر مربوط به نمونه مود یک در شکل ۲۱ نمایش داده شده است در این اشکال وقوع مکانیزم‌های شکست رزین و الیاف بخوبی قابل مشاهده می باشد.

در شکل ۲۲ سطح شکست سمت آلومینیوم قبل از ورود جدایش به لایه کامپوزیت نمایش داده شده است. لایه اکسید یا آنودایز همراه رزین جداشده در این شکل مشاهده می‌گردد و مشخص می‌گردد جدایش وارد لایه کامپوزیت نشده است.

با استفاده از روابط چقرمگی شکست بین لایه‌ای ارئه شده در بخش ۳-۲ در مود اول محاسبه گردید که در جدول ۴ نمایش داده شده است. در این جدول مشاهده می‌گردد درصد بیشترین اختلاف مقدار چقرمگی شکست بین لایه با استفاده از رابطه (۱) و (۲) به ترتیب ۱۸ و ۳ درصد می‌باشد. با مقدار متوسط مدل‌سازی عددی همان‌طور که اشاره گردید با تغییر پارامترها به صورت مکرر و تطابق نمودار نیرو برحسب جابجایی صورت پذیرفت و نمودار نیرو برحسب جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی عددی در منطقه I در شکل ۲۳ نمایش داده شده است.

برای بررسی جدایش از پارامتر خرابی المان‌ها[1] استفاده شده است. بدین صورت که المان‌هایی که مقدار این پارامتر برای آن‌ها صفر می‌باشند کاملا سالم بوده و المان‌هایی که مقدار این پارامتر برای آن‌ها یک می‌باشند کاملا خواص چسبندگی خود را از دست داده‌اند، المان‌هایی که دارای مقادیر بین ۰ و ۱ هستند خرابی در آن‌ها شروع شده است. در شکل ۲۴ تغییرات این پارامتر برای المان‌های چسبنده 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 همان طور که مشاهده می‌گردد در ادامه در وضعیت ۲ و ۳ جهبه ترک به صورت منحنی پیشروی کرده است.

۶-نمونه مود دوم شکست

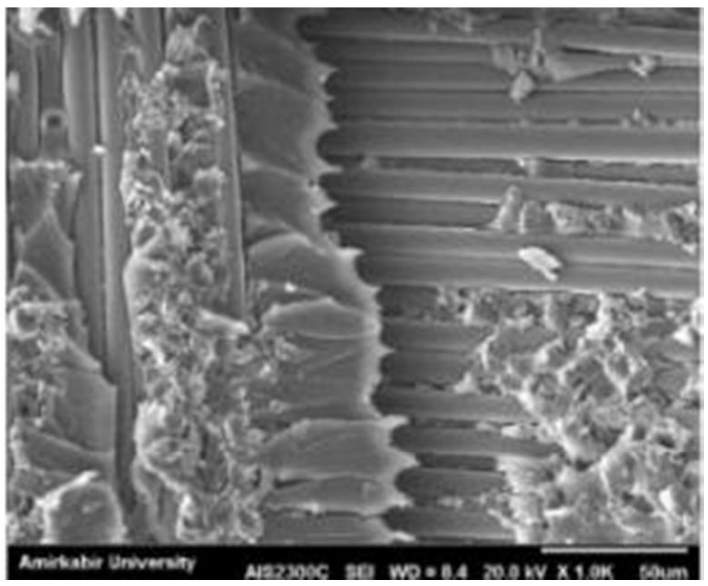
برای مود دو شکست سه نمونه تحت شرایط یکسان مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۲۵ نمودار نیرو-جابجایی همراه با رشد ترک برای هر سه نمونه نمایش داده شده است (رشد ترک برای نمونه سه در حین آزمون ثبت نگردیده است). سطح شکست در شکل ۲۶ نمایش داده شده است و مشاهده می‌گردد که جدایش بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت صورت گرفته است.

برای شناسایی لحظه شروع خرابی از نمودار مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن استفاده شده است. نیروی متناظر با لحظه افزایش ناگهانی مجموع انرژی امواج، بعنوان نیروی بحرانی تعیین شده است (شکل ۲۷).

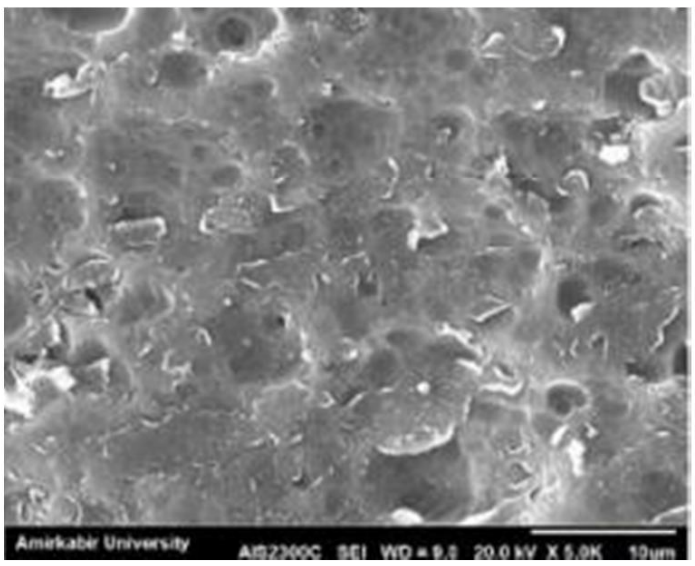
1- CSDMG

جدول ۴ چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود یک (در واحدN/m)

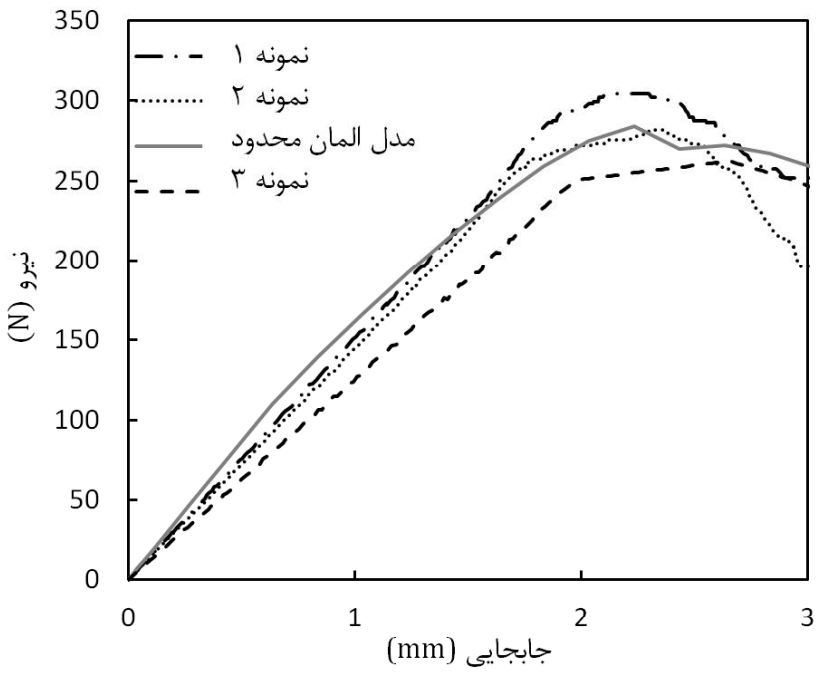
شماره نمونه	رابطه (۲)	رابطه (۱) و با استفاده از آکوستیک امیشن	مدل‌سازی المان محدود
۱	۶۳۱	۷۶۳	
۲	۶۰۵	۶۰۹	۸۰۰
۳	۵۸۹	۵۶۷	



شکل ۲۱ تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی- شکست الیاف و رزین



شکل ۲۲ تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی

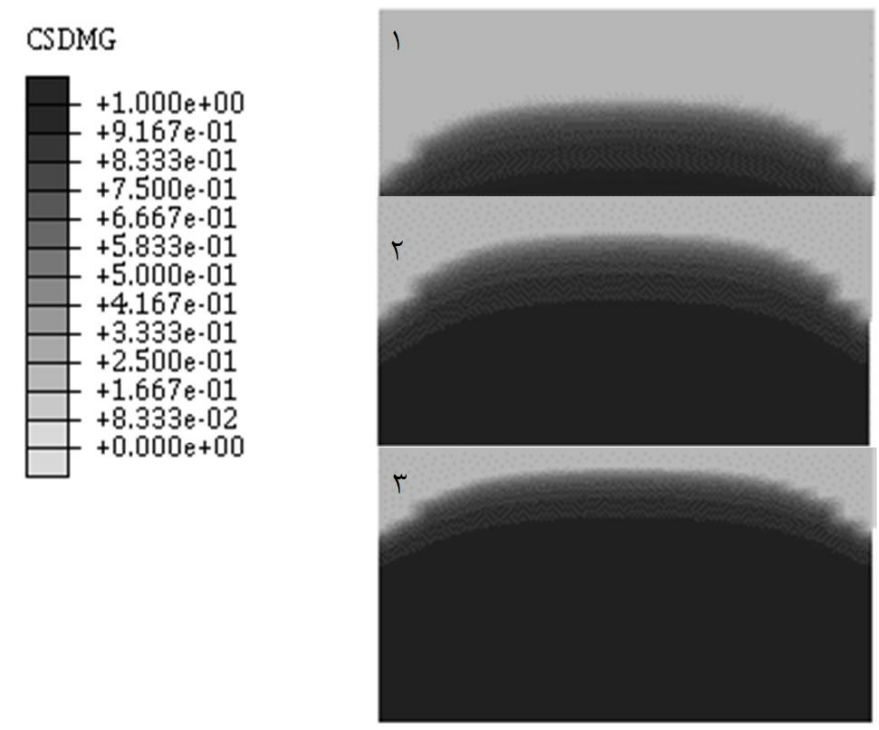


شکل ۲۳ نمودار نیرو- جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی عددی در منطقه I

با تحلیل فرکانسی بر روی امواج ساطع شده از این نمونه شکل ۲۸ حاصل شده است که در این شکل مشاهده می‌گردد فرکانس‌های غالب ۴۰۰-۴۵۰ کیلوهرتز می‌باشد. در شکل ۲۹ سطح شکست نمایش داده شده است که مشاهده می‌گردد لایه اکسید یا آنودایز دچار شکست شده است که برخی از فرکانس‌های تولید شده می‌تواند بخاطر وقوع این نوع مکانیزم شکست باشد.

با استفاده از رابطه (۳)، چقرمگی شکست بین لایه‌ای در مود دوم محاسبه گردید که در جدول ۵ نمایش داده شده است. مدل‌سازی عددی نیز با تغییر پارامترها و تطابق نمودار نیرو برحسب جابجایی صورت پذیرفت که مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود دوم برای مدل سازی در جدول ۵ آورده شده و نمودار نیرو برحسب جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی عددی در شکل ۳۰ نمایش داده شده است.

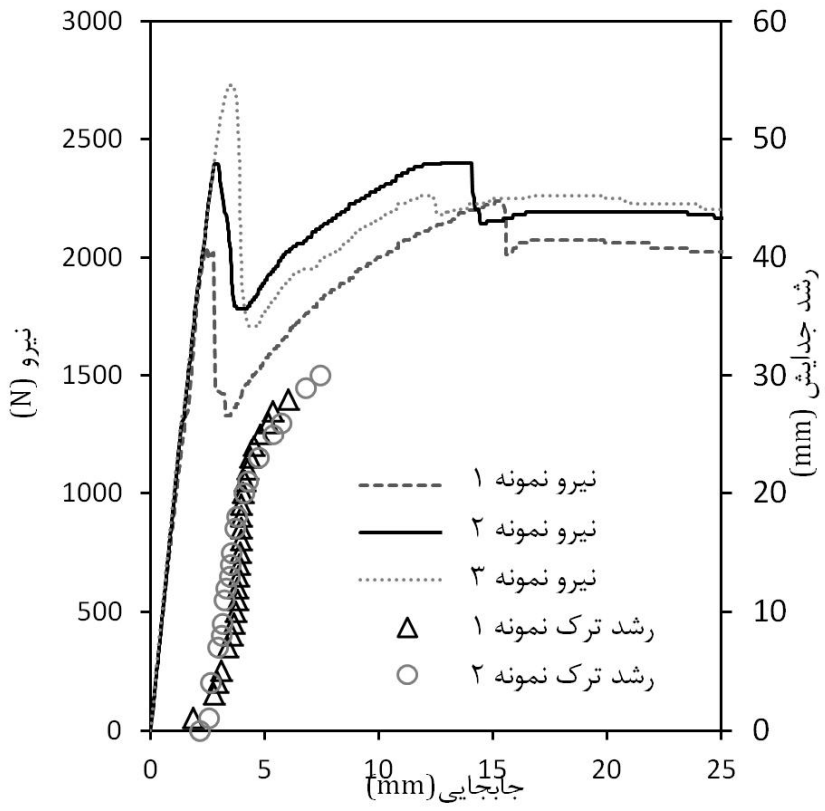
با بررسی نتایج مدل‌سازی عددی در محدوده مورد مطالعه همان طور که مورد انتظار بود در آلومینیوم هیچ المانی وارد ناحیه پلاستیک نمی‌شود. برای بررسی جدایش مانند نمونه مود یک از پارامتر خرابی المان‌ها استفاده شده است. در شکل ۳۱ تغییرات این پارامتر برای المان‌های چسبنده در سه وضعیت نمایش داده شده است که به ترتیب از بالا به پایین جدایش رشد نموده است.



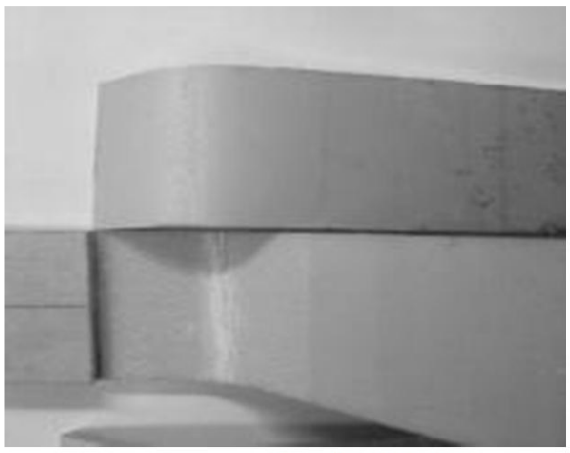
شکل ۲۴ پارامتر خرابی و جبهه ترک بدست آمده از مدل‌سازی عددی برا ی مود یک

جدول ۵ چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود دو (واحد N/m)

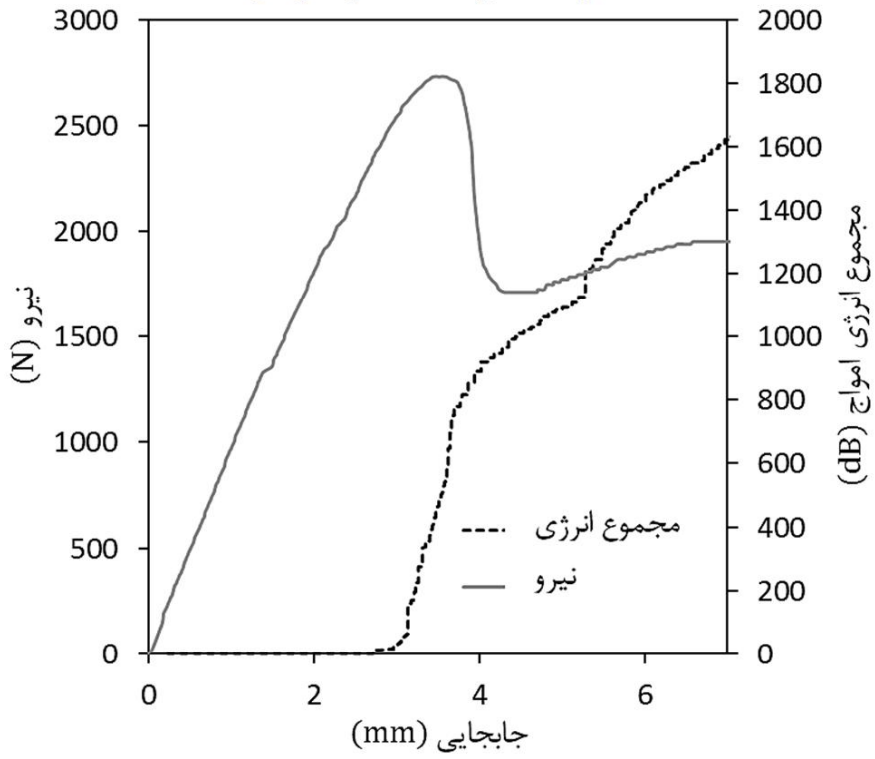
شماره نمونه	رابطه (۳)	مدل‌سازی المان محدود
۱	۱۳۱۰	
۲	۱۴۶۶	۱۵۰۰
۳	۱۳۵۶	



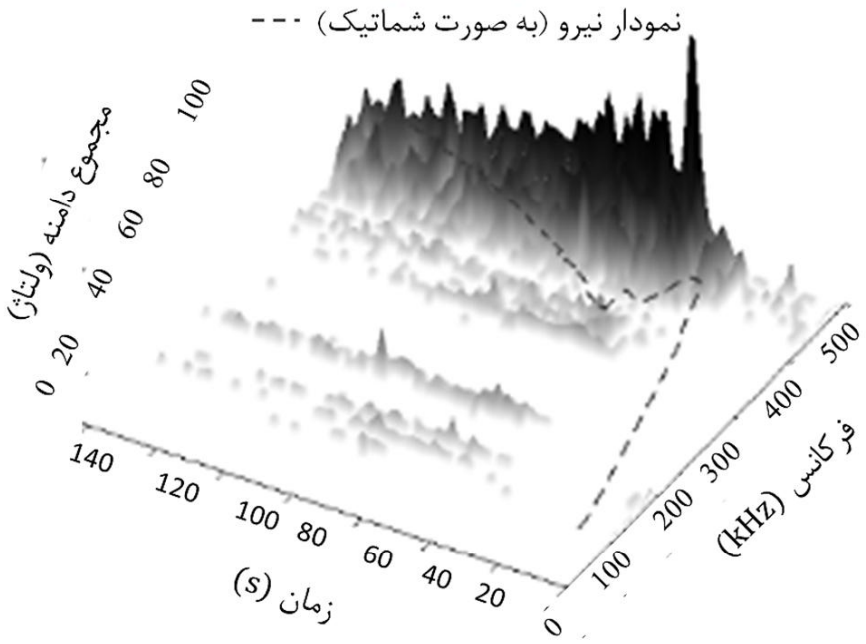
شکل ۲۵ نمودار نیرو-جابجایی همراه با رشد ترک برای مود دوم



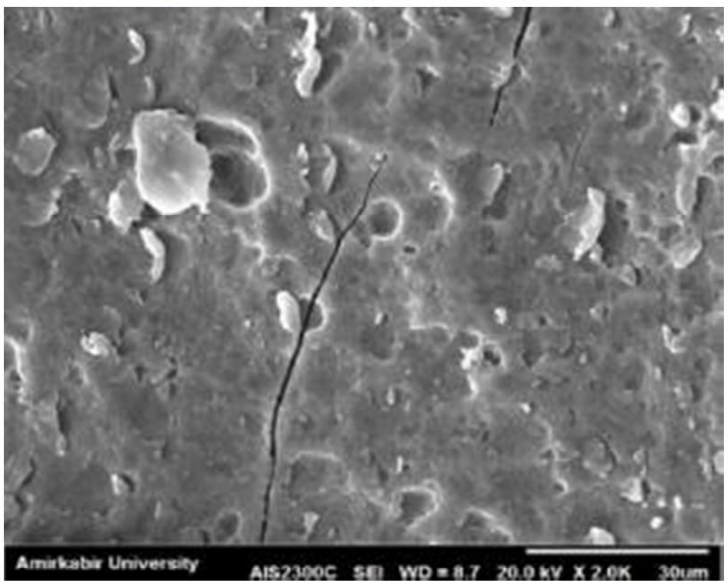
شکل ۲۶ سطح شکست نمونه مود دو



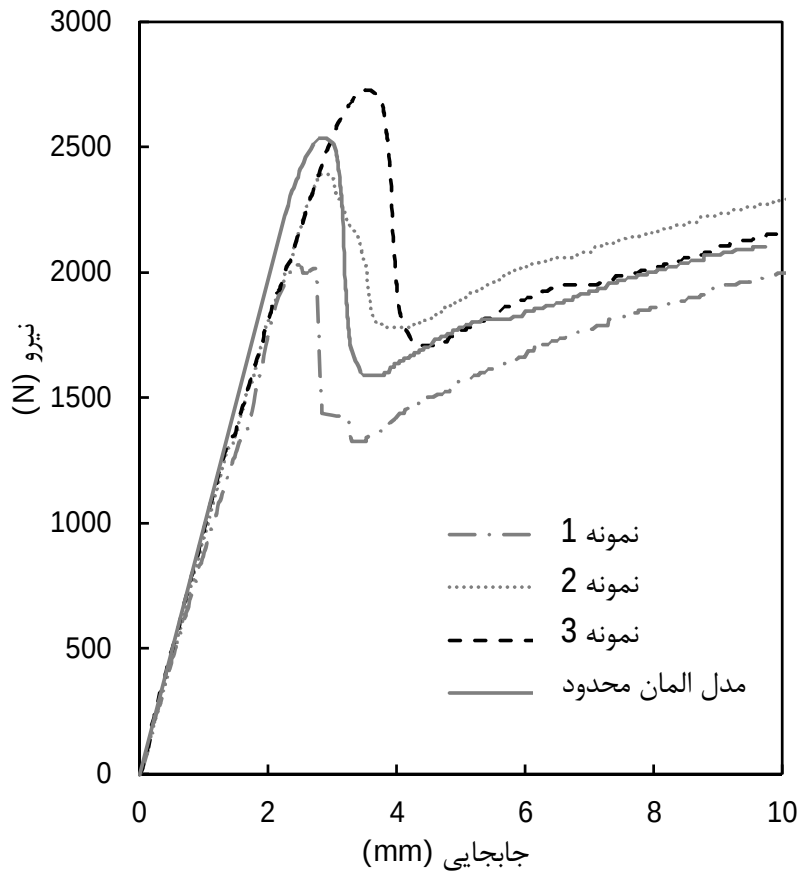
شکل ۲۷ نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج بر حسب جابجایی نمونه مد دو



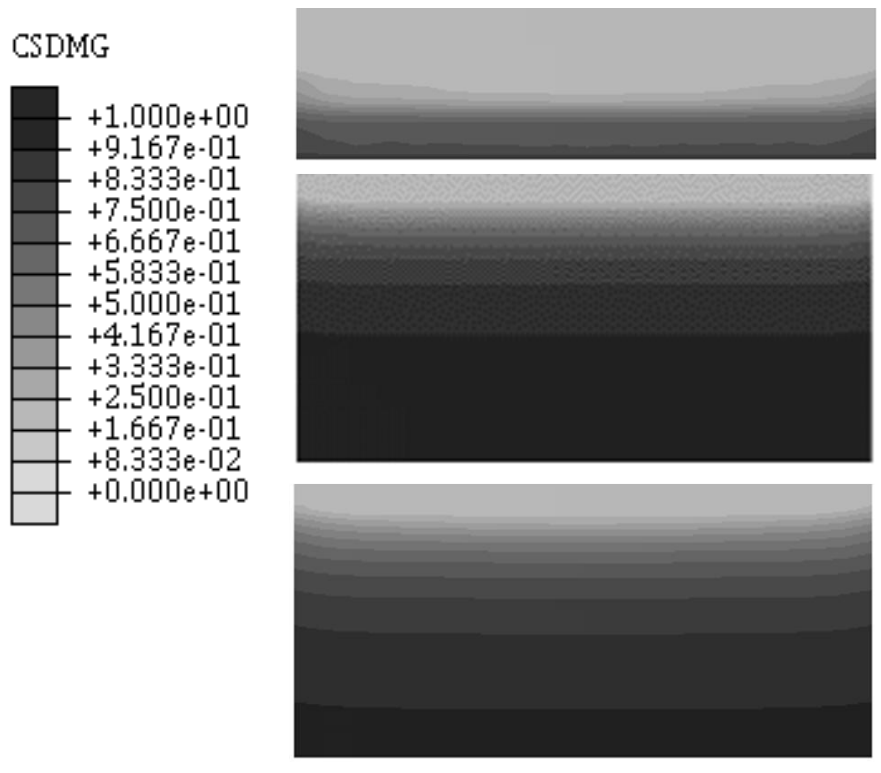
شکل ۲۸ تحلیل فرکانسی نمونه مود دو



شکل ۲۹ تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی- نمونه مود دو



شکل 30 نمودار نیرو برحسب جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی عددی



شکل 31 تغییرات پارامتر خرابی المان برای نمونه مود دو

7-بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا سعی شده است با انجام اقدامات مختلف در طراحی و ساخت نمونه‌ها، نمونه‌هایی با تکرار پذیری مطلوب ایجاد گردد. با انجام آزمون کشش بر روی نمونه کامپوزیتی و تحلیل فرکانس امواج آکوستیک امیشن در محدوده زمانی مختلف مشاهده گردید محدوده فرکانسی 50 تا200 کیلوهرتز برای مکانیزم شکست ماتریس و جدایش ماتریس از الیاف بوده و محدوده فرکانسی400 تا500 کیلوهرتز برای مکانیزم شکست الیاف می‌باشد. در نمونه‌های مود اول شکست، در حین بار گذاری ابتدا جدایش بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت اتفاق افتاده و در ادامه وارد لایه کامپوزیت می‌شود. این امر باعث افزایش نیرو و تغییر شیب نمودار رشد جدایش –جابجایی در حین تغییر مسیر جدایش شده است. صحت‌سنجی تغییر مسیر جدایش با بررسی سطوح شکست به صورت دیداری و عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی انجام گرفته است. لحظه شروع جدایش با نمودار انرژی امواج آکوستیک امیشن شناسایی گردید. با بررسی نمودار مجموع انرژی امواج و رفتار جدایش نمودار به دو قسمت تقسیم گردید و مشاهده گردید نمودار قسمت اول(جدایش بین لایه کامپوزیت و آلومینیوم) به صورت خطی و در منطقه دو (جدایش در لایه کامپوزیت) به صورت توانی می‌باشد. با انجام تحلیل فرکانس بر روی امواج با توجه به مکانیزم‌های شکست مشاهده شد در منطقه یک فرکانس‌های غالب در محدوده 100 و 200 کیلوهرتز بوده و در منطقه دو فرکانس‌های غالب در محدوده فرکانسی450 تا 500 کیلوهرتز می‌باشد. در ادامه با استفاده از روش‌های مختلف چقرمگی شکست بین لایه‌ای محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر مدل‌سازی المان محدود با المان‌های چسبنده انجام گرفته که نمودار نیرو-جابجایی حاصله دارای مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمون می‌باشد. برای نمونه‌های مود دوم شکست مشاهده گردید جدایش بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت صورت گرفته است. شناسایی لحظه شروع جدایش نیز با نمودار مجموع انرژی امواج صورت پذیرفته است و با تحلیل فرکانسی، فرکانس‌های غالب در محدوده 400-450 کیلوهرتز بدست آورده شد که این محدوده فرکانس، می‌تواند مرتبط با مکانیزم جدایش کامپوزیت از آلومینیوم باشد. در این تحقیق نشان داده شده است که شناسایی لحظه شروع خرابی با استفاده از انرژی آکوستیک امیشن به خوبی قابل شناسایی بوده و تعیین مکانیزم جدایش با تحلیل فرکانس امواج با دقت مناسبی ممکن می‌باشد.

8- مراجع

[1] A. J. Kinloch, *Adhesion and adhesives : science and technology,* London ; New York: Chapman and Hall, 1987 .

[2] S. Mostovoy, P. Crosley, E. J. Ripling, Use of crack-line-loaded specimens for measuring plane-strain fracture toughness, *J MATER,* Vol. 2 ,No. 3, pp. 661-681, 1967 .

[3] B. Blackman, A. Kinloch, M. Paraschi, W. Teo, Measuring the mode I adhesive fracture energy, G IC, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin, *International journal of adhesion and adhesives* ,Vol. 23, No. 4, pp. 293-305, 2003 .

[4] A. Standard, D5528-01, *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. American Society for Testing and Materials, USA,* 2002 .

[5] M. Alfano, F. Furgiuele, G. Lubineau, G. H. Paulino, Simulation of debonding in Al/epoxy T-peel joints using a potential-based cohesive zone model, *Procedia Engineering,* Vol. 10, pp. 1760-1765, 2011 .

[6] I. 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. 1298-1305, 2011 .

[7] Y.-H. Yu, J.-H. Choi, J.-H. Kweon, D-.H. Kim, A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission, *Composite structures,* Vol. 75, No. 1, pp. 163-169, 2006 .

[8] 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, 2012 .

[9] A. R. Oskouei, 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. 1444-1455, 2011 .

[10] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, pp. 1-11, 2014. (In Persian)

[11] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, A. R. Oskouei, F. J. Moghadas, Damage Categorization of Glass/Epoxy Composite Material Under Mode II Delamination Using Acoustic Emission Data: A Clustering Approach to Elucidate Wavelet Transformation Analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering,* Vol. 39, No. 2, pp. 1325-1335, 2014 .

[12] A. Standard, D6671/D6671M (2006) Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites, *ASTM International, West Conshohocken, PA. doi,* Vol. 10, pp. D6671_D6671M ,2006 .

[13] A. Standard, D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints, West Conshohocken,* 2012 .

[14] C. V. Katsiropoulos, A. Chamos, K. Tserpes, S. G. Pantelakis, Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 43, No. 2, pp. 240-248, 2012 .

[15] A. ASTM_International, D3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, *ASTM International, West Conshohocken (PA),* 2000 .