



بررسی و پایش جدایش بین لایه ای در کامپوزیت های فلز/الیاف تحت بارگذاری مود اول و دوم با استفاده از مدل سازی عددی و آکوستیک امیشن

مرتضی احمدی نجف آبادی¹، مجتبی صدیقی²، منوچهر صالحی^{3*} حسین حسینی تودشکی⁴

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 4413-1587، 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 لایه های فلز الیاف

آکوستیک امیشن

جدایش بین لایه ای

چقرمگی شکست بین لایه ای

چکیده

در این پژوهش به بررسی رفتار جدایش بین لایه ای در کامپوزیت های فلز/الیاف تحت بارگذاری مود اول و دوم با استفاده از مدل سازی عددی و تحلیل داده های آکوستیک امیشن پرداخته می شود. نمونه های 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 لایه ای تحت بارگذاری مود یک و دو نیازمند شناسایی لحظه شروع جدایش می باشد که با به کارگیری روش آکوستیک امیشن این لحظه به دست آورده شده است. بررسی شروع و رشد جدایش با استفاده از مدل سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس (استفاده از توابع المان چسبنده) انجام شده است. نمودار نیرو-جابجایی، رشد پیشرونده جدایش و جبهه آن از نتایج مدل سازی عددی می باشد که با فعالیت های 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 مکانیزم های شکست بدست آورده شده است. برای صحنه سنجی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مکانیزم های 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 Najafabadi¹, Mojtaba Sedighi¹, Manouchehr Salehi^{1*}, Hossin Hossini Toudeshky²

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 می باشد. تعمیرات سازه های هوایی توسط وصله یکی از کاربردهای آن می باشد. هنگام اتصال دو جسم به هم امکان بوجود آمدن عیوب ریز زیاد وجود دارد و در حین کارکرد گسترش این عیوب ریز می تواند باعث ایجاد خرابی گردد [1]. پایش و تشخیص شروع خرابی در این اتصالات احتمال وقوع خرابی های فاجعه آمیز را کم می کند.

برای تخمین چقرمگی شکست بین لایه ای می توان از نمونه های آزمون

مود یک شکست¹ و مود دو شکست² استفاده نمود.

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

1- DCB

2- ENF

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 متلب¹ 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- مدل سازی 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 جنس 2024-T3 می‌باشد که خواص در جدول 2 ارائه شده است.



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

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.

همان‌طور 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 معمولاً 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 ترک خوردگی 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 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

بین لایه ای مود دو نیز ارائه گردیده است.

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

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) می باشد.

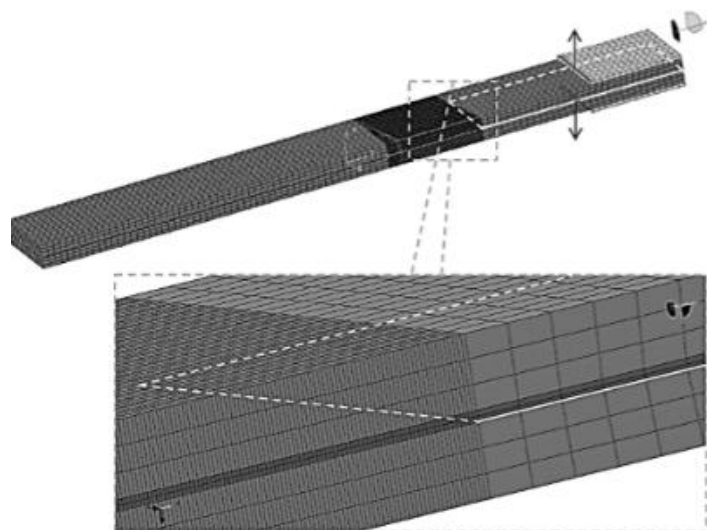
3-3- مدل ناحیه چسبنده

از مدل ناحیه چسبنده برای مدل سازی اتصال آلومینیوم/کامپوزیت استفاده شده است. این مدل سازی با استفاده از توابع موجود در نرم افزار 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 المان های چسبنده صورت گرفته است. خواص ناحیه چسبنده با استفاده از روابط (1) تا (3) بعنوان مقدار اولیه و چندین بار اجراء مدل سازی و مطابقت نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از آزمون و مدل سازی بدست آمده است که در جدول 3 ارائه داده شده است.

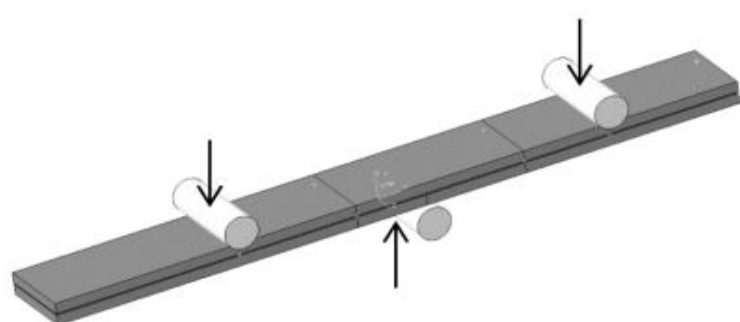
برای نمونه مود یک و مود دو شکست نوع المان ها و تعداد آن ها و لایه چینی بجز در محل اتصال لولا یکسان می باشد. تعداد 20960 المان سه بعدی C3D8R (برای قسمت آلومینیومی، کامپوزیتی و لولا) و تعداد 2360 COH3D8 (برای فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیتی) استفاده شده است. در منطقه رشد خرابی المان های ریزتر (با اندازه $0.2mm$ 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

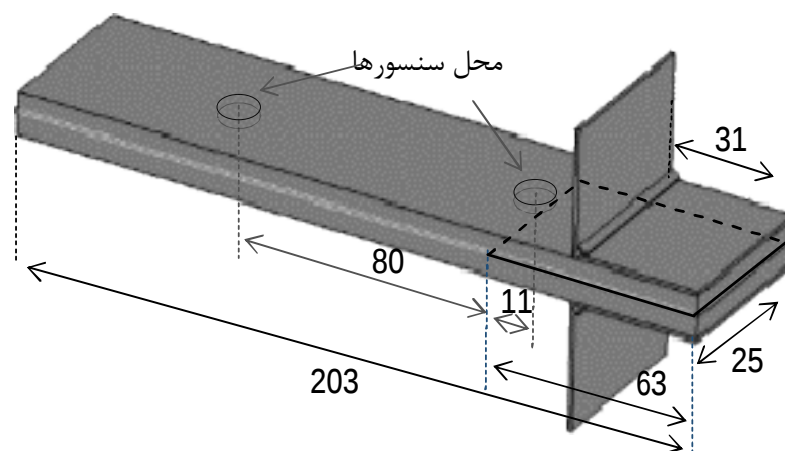
α	G_{IC} (N/m)	G_{IIC} (N/m)	G_{IIIC} (N/m)
2/25	800	1500	1500
$K(N/m^3)$ 10^{13}	N_{max} (MPa) 5	T_{max} (MPa) 20	S_{max} (MPa) 20



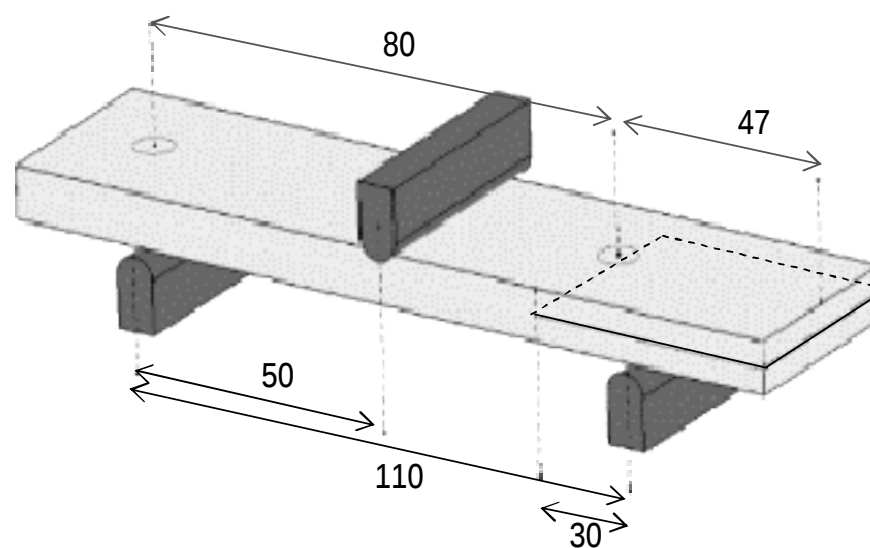
شکل 4 مدل المان محدود نمونه مود یک شکست



شکل 5 مدل المان محدود نمونه مود دو شکست



شکل 2 ابعاد نمونه مود اول (در واحد میلی متر)



شکل 3 ابعاد نمونه مود دوم (در واحد میلی متر)

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 لایه ای

با توجه به عدم وجود استاندارد برای تعیین چقرمگی شکست بین لایه ای برای مواد مرکب فلز الیاف، جهت محاسبه چقرمگی شکست بین لایه ای 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 می باشد که در این تحقیق بدلیل نازک بودن لایه کامپوزیت، این لایه بعنوان چسب در نظر گرفته شده است.

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

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 می باشد، B ضخامت نمونه (واحد m)، a طول ترک (واحد m) و h ضخامت چسب (واحد m) می باشد.

در روش دوم چقرمگی شکست بین لایه ای با بهره گیری از رابطه ارائه شده در مرجع [14] محاسبه گردیده است.

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

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) می باشد.

همچنین در این مرجع [14] رابطه ای جهت محاسبه چقرمگی شکست



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 دار تک انجام گردیده است (شکل ۹).

سنسورها در این نمونه ها به فاصله ۱۰۰ میلی متری نصب شده است. در این پژوهش برای تمامی آزمون ها سرعت بارگذاری ۱mm/min انتخاب شده است.

برای نمونه های مود یک و دو جهت اندازه گیری 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 صحت سنجی خواص کامپوزیت و تحلیل فرکانسی امواج های 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

۴- روند آزمون

۴-۱- آماده سازی نمونه

برای تولید نمونه های مود یک و دو شکست ابتدا دو ورق آلومینیوم و دو لایه کامپوزیت از پیش آغشته با توجه به مجموع ابعاد نمونه ها 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 می شود که باعث زبر شدن سطح و افزایش سطح تماس می گردد. در نتیجه با اعمال دو فرآیند استحکام اتصال کامپوزیت به آلومینیوم افزایش پیدا می کند. 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 نمونه ها با وایرکات به ابعاد مورد نظر برش داده شده و با بازرسی چشمی (با بزرگنمایی) از عدم وقوع جدایش در حین فرآیند برش کاری اطمینان حاصل شده است.

نمونه های کشش کامپوزیت مطابق با ابعاد نمایش داده شده در شکل ۶ ساخته شده است. این نمونه ها 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.

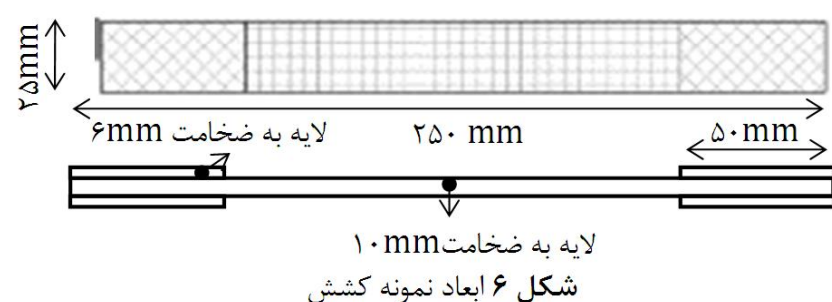
۴-۲- دستگاه های آزمون

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 نمونه های کشش از دستگاه دار تک با ظرفیت ۵ تن استفاده شده است.

برای داده برداری آکوستیکی از سامانه پی سی آی ۲ با نرخ ۱MHz، نرم افزار آی-وین ۲ و دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو ۲، محصول کمپانی پک ۴، استفاده گردید. فرکانس رزونانسی سنسورها ۵۱۳/۲۸kHz و محدوده بهینه کاری آن ۷۵۰-۱۰۰kHz می باشد. داده های دریافتی توسط هر سنسور بوسیله پیش تقویت کننده با ضریب ۴۰dB تقویت می گردد. 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 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.

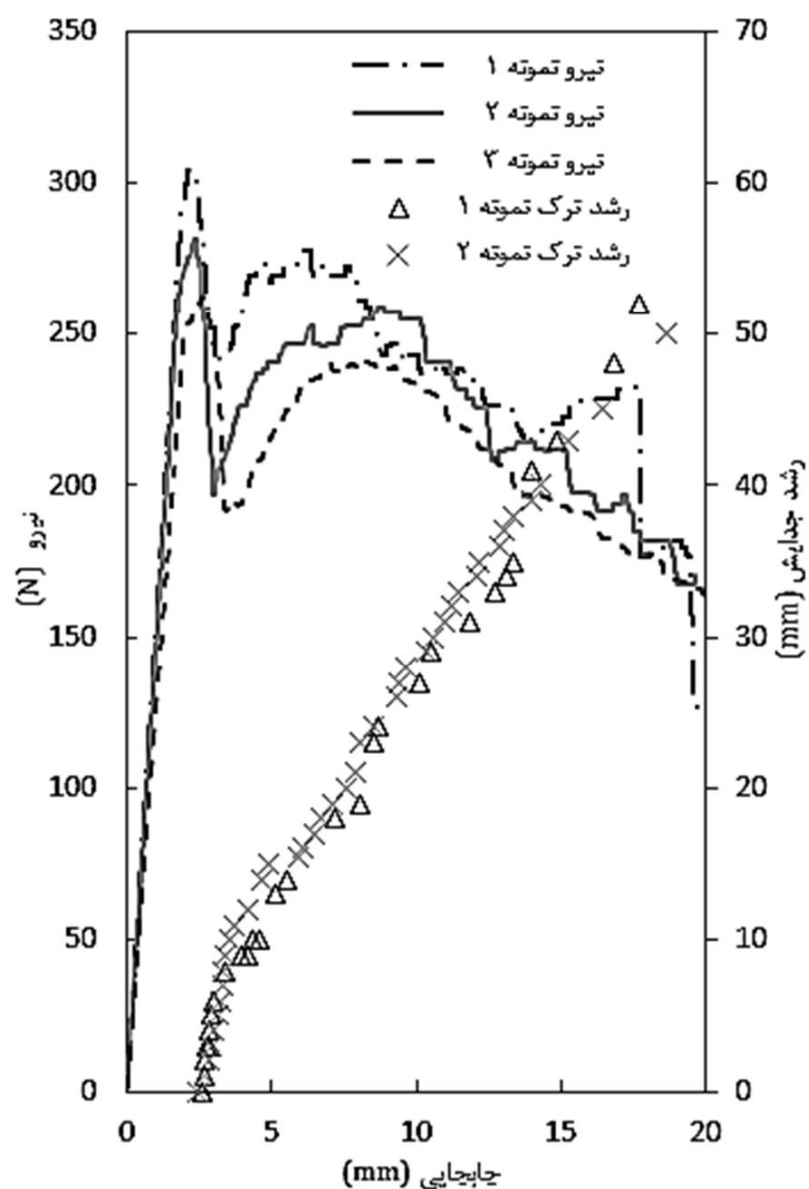
۴-۳- روند آزمون

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

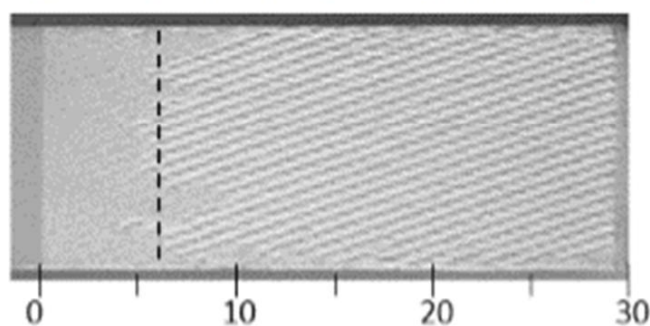


- 1- PCI-2
- 2- AEWIn
- 3- PICO
- 4- PAC

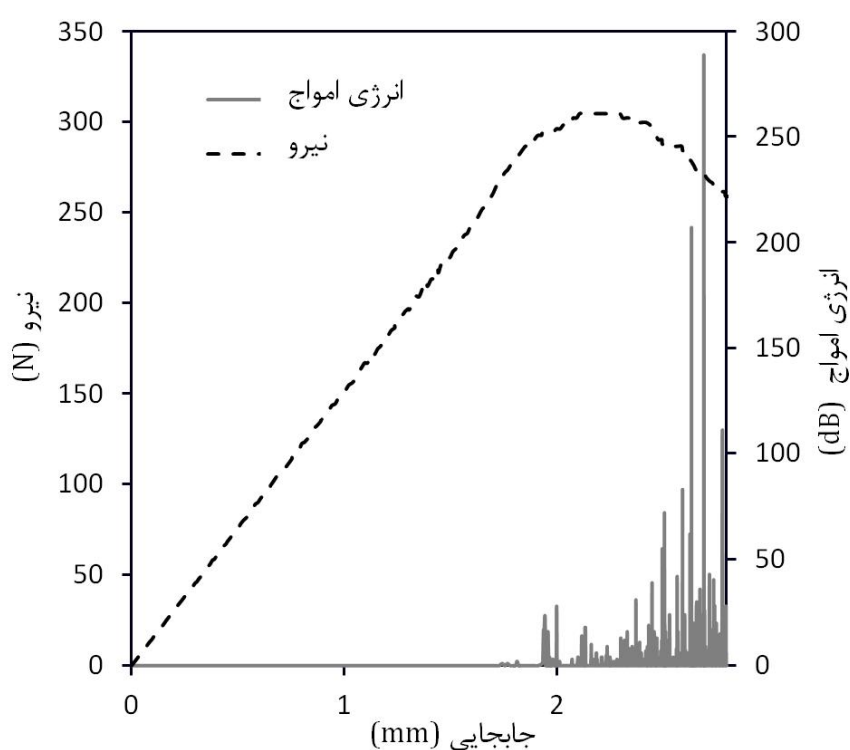
شروع خرابی با استفاده از نمودار انرژی دارای حساسیت بالاتری می باشد. در شکل ۱۴ قسمت ابتدایی نمودار شکل ۱۲ نیرو و انرژی امواج آکوستیک



شکل ۱۲ نمودار نیرو-جابجایی همراه با رشد ترک جابجایی



شکل ۱۳ سطح شکست نمونه مود یک (واحد mm)



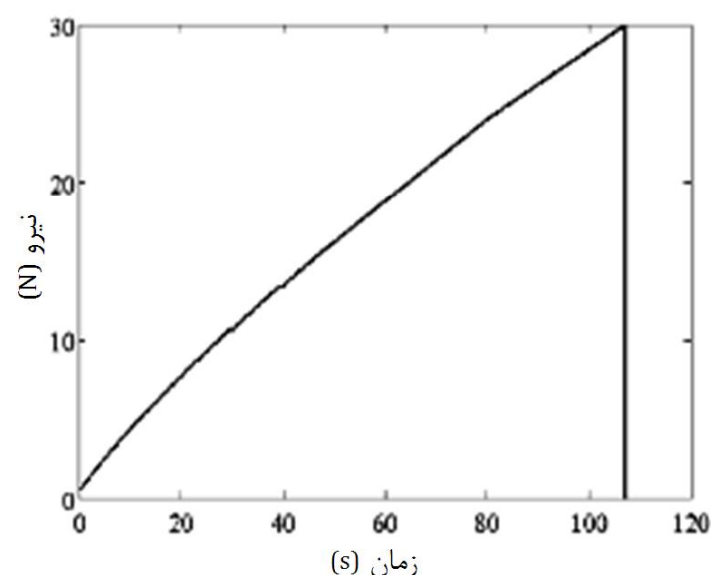
شکل ۱۴ نیرو و انرژی امواج آکوستیک بر حسب جابجایی

سه نوع مکانیزم شکست ماتریس، جدایش ماتریس از الیاف و شکست الیاف اتفاق می افتد. نتایج تحلیل فرکانسی نشان می دهد در ابتدا بارگذاری بیشتر فرکانس های تولید شده در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز تولید شده است. با توجه به این که در این محدوده مکانیزم شکست ماتریس و جدایش ماتریس از الیاف مکانیزم های غالب می باشند، می توان این محدوده فرکانسی را مربوط به این نوع مکانیزم های شکست دانست. در قسمت انتهایی بارگذاری که مکانیزم شکست الیاف نیز اتفاق می افتد، مشاهده می گردد که فرکانس هایی در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز نیز تولید شده است که این محدوده فرکانسی را نیز می توان مربوط به مکانیزم شکست الیاف دانست (شکل ۱۱).

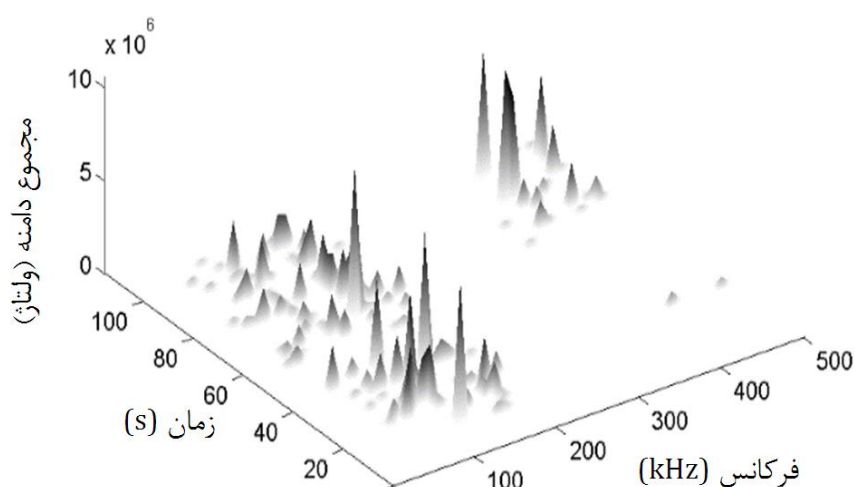
۵-۲-آزمون مود اول

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 می گردد 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 میلی متر در لبه) وارد لایه کامپوزیت شده است. همچنین ملاحظه می گردد در لحظه تغییر مسیر جدایش، نیرو دوباره افزایش پیدا می کند و همچنین نمودار رشد ترک-جابجایی دچار تغییر شیب می شود.

برای شناسایی لحظه شروع خرابی از نمودارهای انرژی و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن استفاده شده است. مشاهده گردید شناسایی لحظه

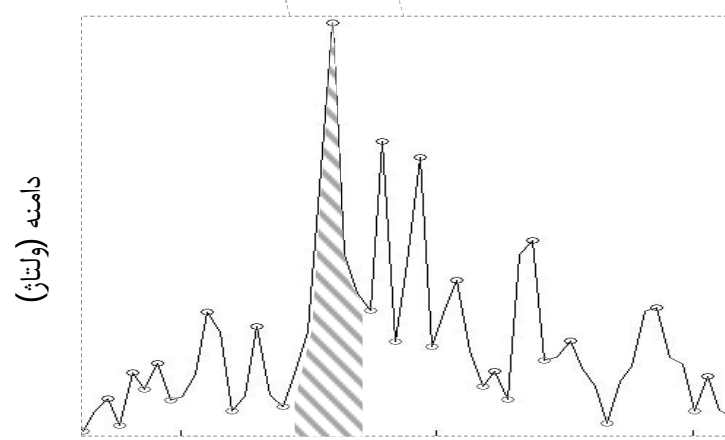
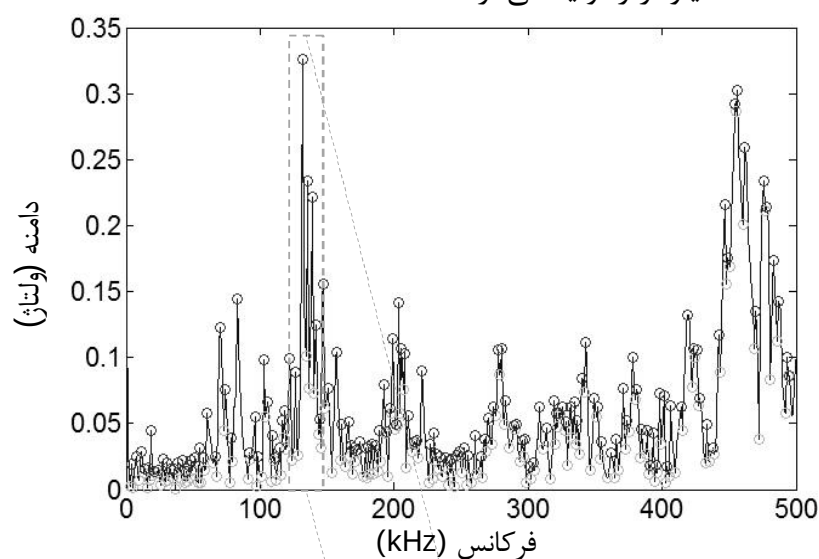


شکل ۱۰ نمودار نیرو-زمان نمونه کشش کامپوزیت

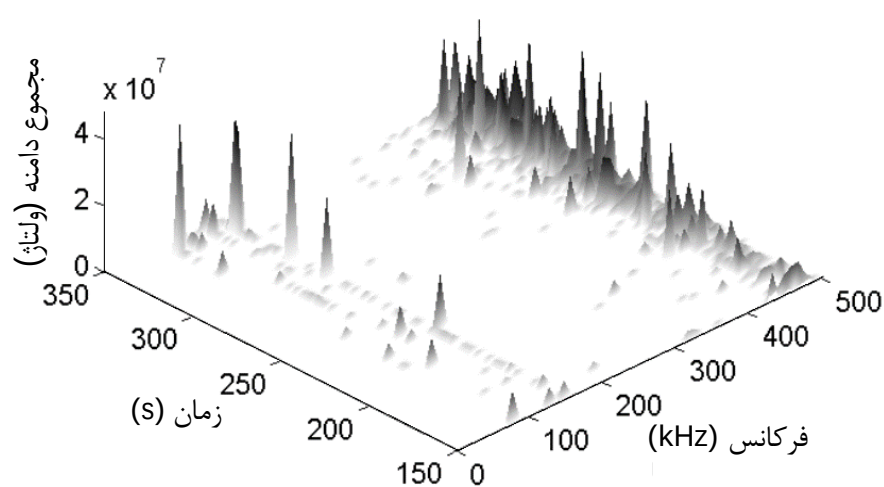


شکل ۱۱ نمودار تحلیل فرکانسی نمونه کشش

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 فرکانسی 450 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 تا 200 کیلوهرتز و شکست الیاف 400 تا 500 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.

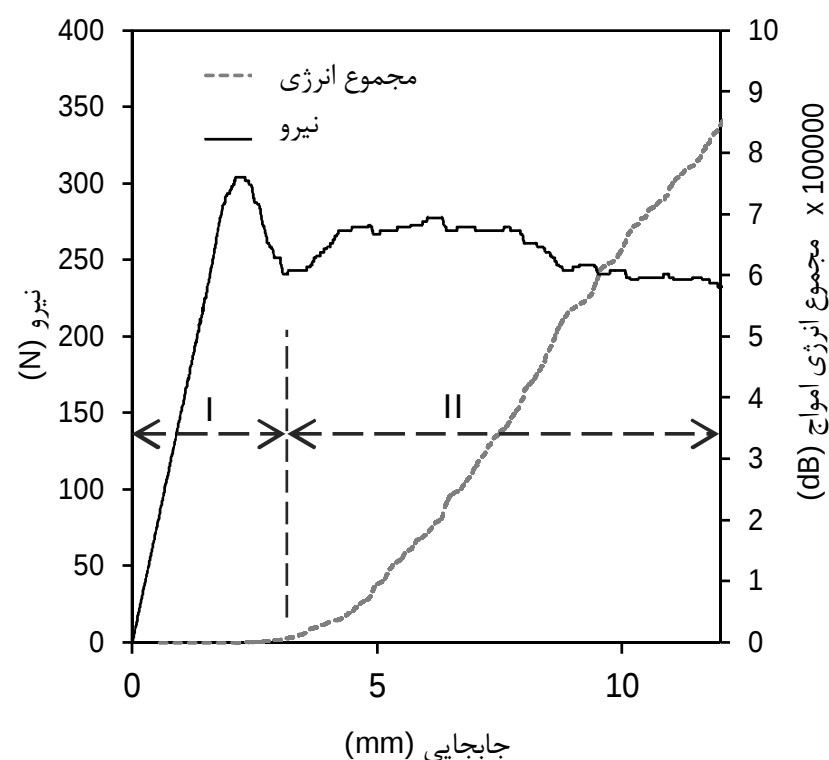


شکل 18 تحلیل فرکانسی با استفاده از تبدیل فوریه

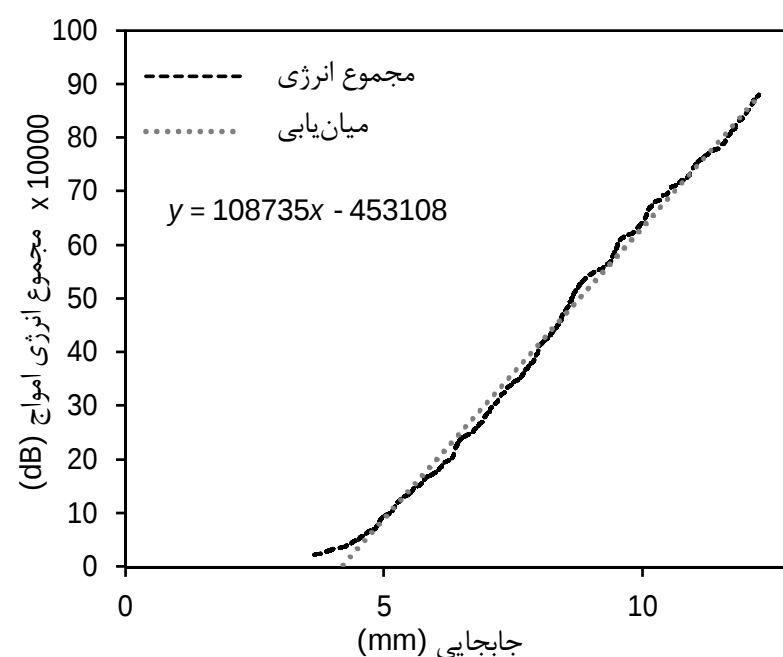


شکل 19 تحلیل فرکانسی در محدوده I

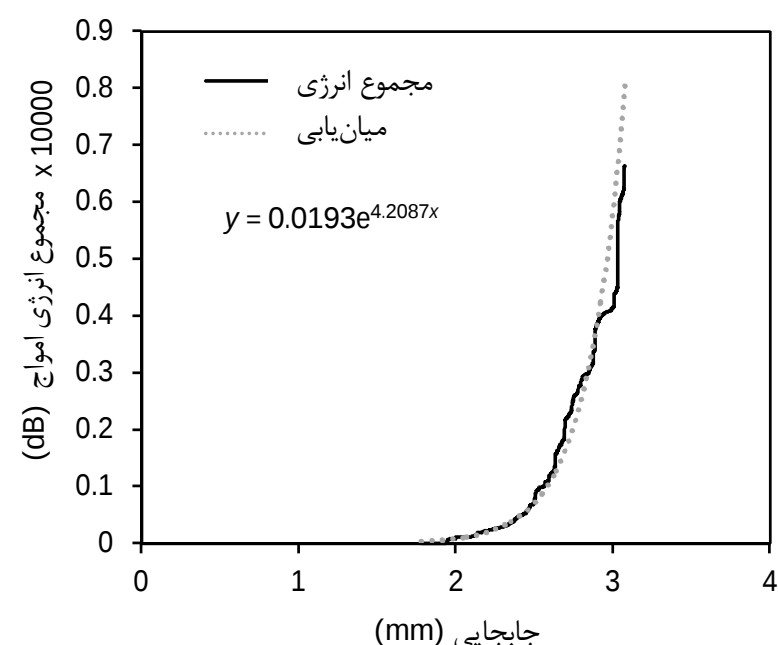
برحسب جابجایی نمایش داده شده است. از نمودار مجموع انرژی جهت بررسی رفتار جدایش استفاده شده است (شکل 15). نمودار با توجه به رفتار جدایش به دو قسمت تقسیم گردیده است. با بررسی نمودار مجموع انرژی مشاهده گردید رفتار این نمودار در منطقه I (جدایش بین آلومینیوم و کامپوزیت) به صورت خطی می‌باشد (شکل 16) و در منطقه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



شکل 15 نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک برحسب جابجایی



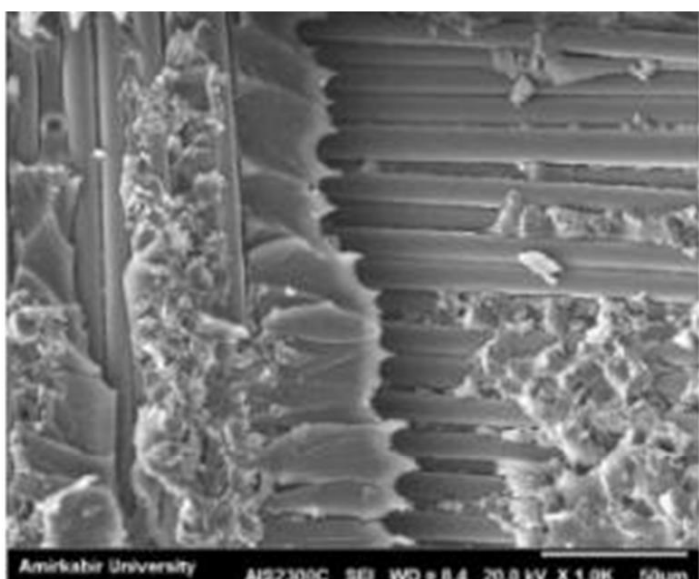
شکل 16 نمودار مجموع انرژی برحسب جابجایی در منطقه I



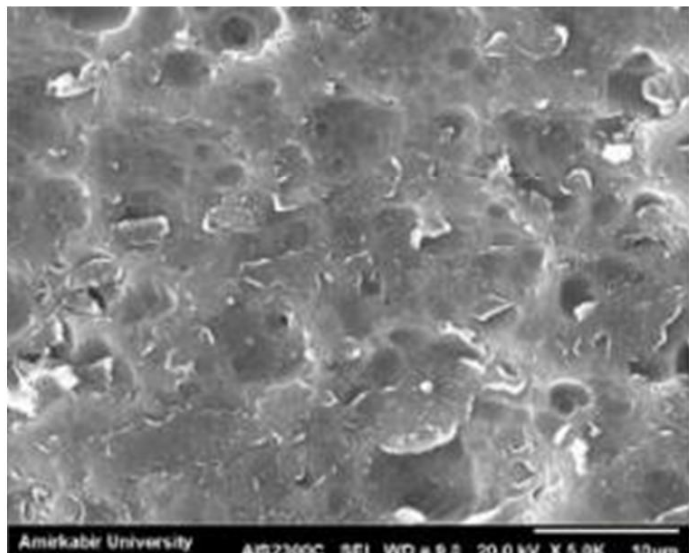
شکل 17 نمودار مجموع انرژی برحسب جابجایی در منطقه II

جدول ۴ چقرمگی شکست بین لایه ای مود یک (در واحد N/m)

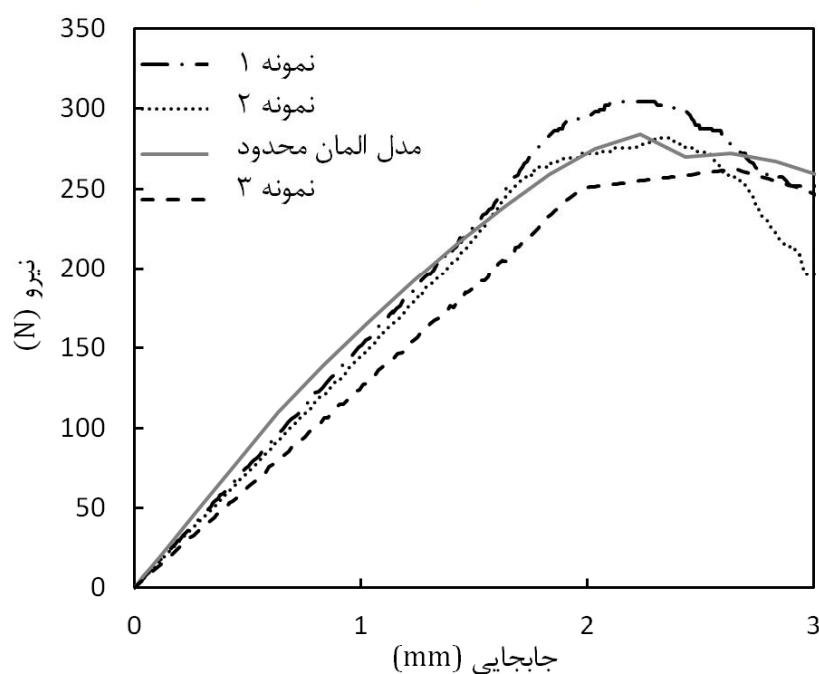
شماره نمونه	رابطه (۲)	رابطه (۱) و با استفاده از آکوستیک امیشن	مدل سازی
۱	۶۳۱	۷۶۳	المان محدود
۲	۶۰۵	۶۰۹	۸۰۰
۳	۵۸۹	۵۶۷	



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

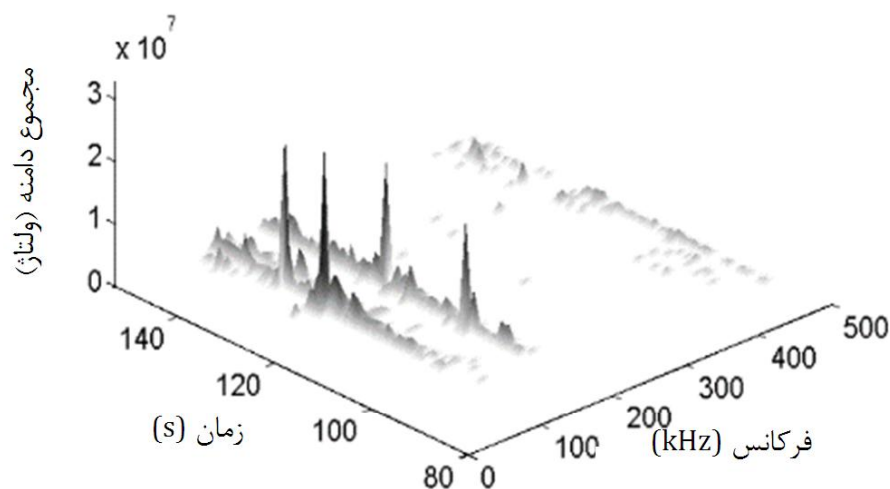


شکل ۲۲ تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی



شکل ۲۳ نمودار نیرو-جابجایی تجربی و حاصل از مدل سازی 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 می گردد فرکانس های غالب ۴۵۰-۴۰۰ کیلوهرتز می باشد. در شکل ۲۹ سطح شکست نمایش داده شده است که مشاهده می گردد لایه اکسید یا آنودایز دچار شکست شده است که برخی از فرکانس های تولید شده می تواند بخاطر وقوع این نوع مکانیزم شکست باشد.



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 مکانیزم های 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 جدا شده در این شکل مشاهده می گردد و مشخص می گردد جدایش وارد لایه کامپوزیت نشده است.

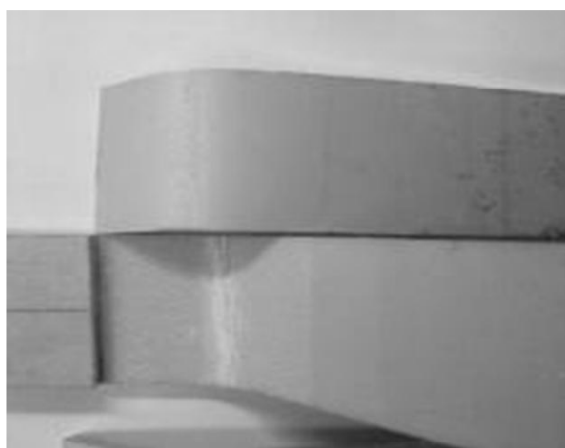
با استفاده از روابط چقرمگی شکست بین لایه ای ارائه شده در بخش ۳-۲ در مود اول محاسبه گردید که در جدول ۴ نمایش داده شده است. در این جدول مشاهده می گردد درصد بیشترین اختلاف مقدار چقرمگی شکست بین لایه با استفاده از رابطه (۱) و (۲) به ترتیب ۱۸ و ۳ درصد می باشد. با مقدار متوسط مدل سازی عددی همان طور که اشاره گردید با تغییر پارامترها به صورت مکرر و تطابق نمودار نیرو بر حسب جابجایی صورت پذیرفت و نمودار نیرو بر حسب جابجایی تجربی و حاصل از مدل سازی عددی در منطقه I در شکل ۲۳ نمایش داده شده است.

برای بررسی جدایش از پارامتر خرابی المان ها^۱ استفاده شده است. بدین صورت که المان هایی که مقدار این پارامتر برای آن ها صفر می باشند کاملاً سالم بوده و المان هایی که مقدار این پارامتر برای آن ها یک می باشند کاملاً خواص چسبندگی خود را از دست داده اند، المان هایی که دارای مقادیر بین ۰ و ۱ هستند خرابی در آن ها شروع شده است. در شکل ۲۴ تغییرات این پارامتر برای المان های چسبنده در سه وضعیت نمایش داده شده است. یکی از نتایج بدست آمده از این شکل تعیین جبهه ترک می باشد. در وضعیت ۱ اولین المان به مقدار یک می رسد و همان طور که مشاهده می گردد در ادامه در وضعیت ۲ و ۳ جبهه ترک به صورت منحنی پیشروی کرده است.

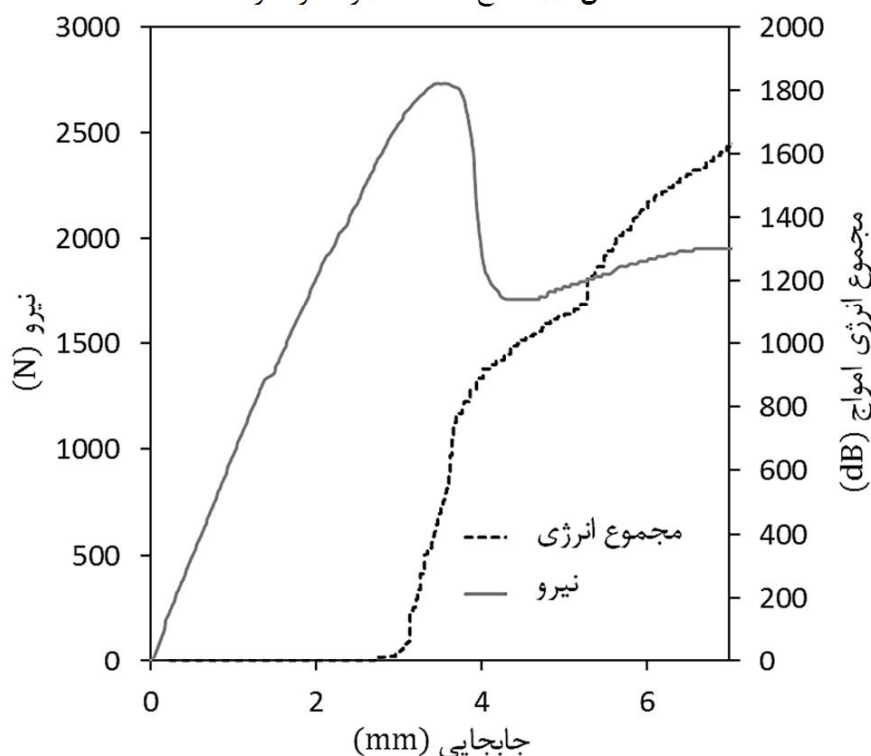
۶-نمونه مود دوم شکست

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 می گردد که جدایش بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت صورت گرفته است.

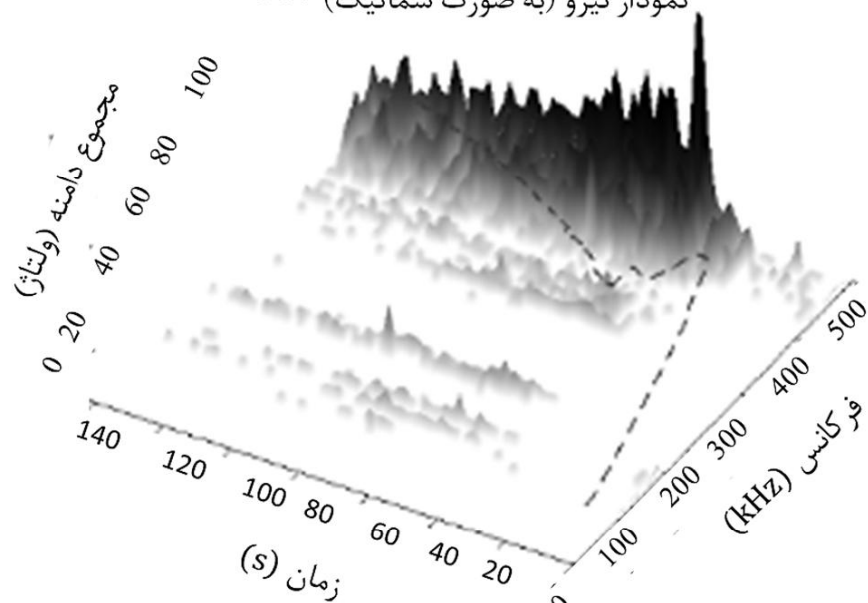
برای شناسایی لحظه شروع خرابی از نمودار مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن استفاده شده است. نیروی متناظر با لحظه افزایش ناگهانی مجموع انرژی امواج، بعنوان نیروی بحرانی تعیین شده است (شکل ۲۷).



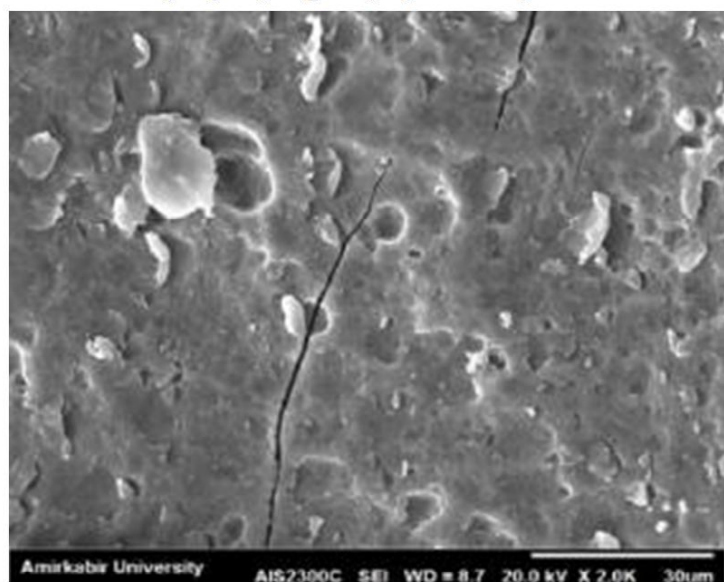
شکل ۲۶ سطح شکست نمونه مود دو



شکل ۲۷ نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج بر حسب جابجایی نمونه مود دو نمودار نیرو (به صورت شماتیک) ---



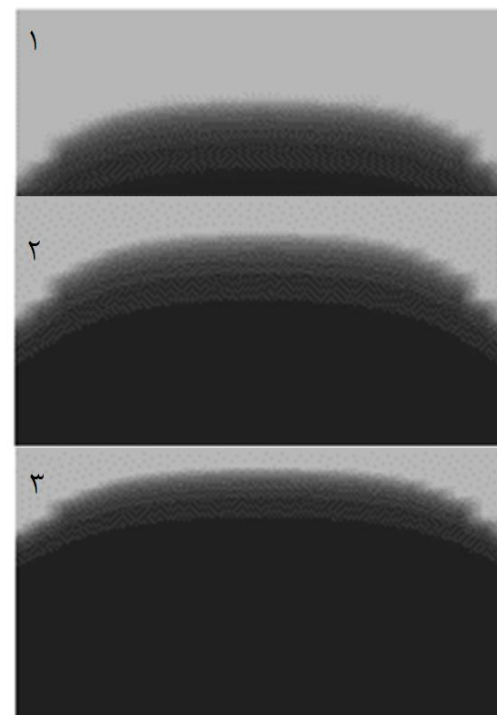
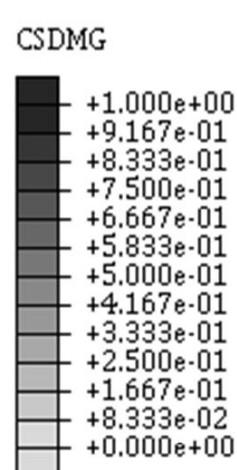
شکل ۲۸ تحلیل فرکانسی نمونه مود دو



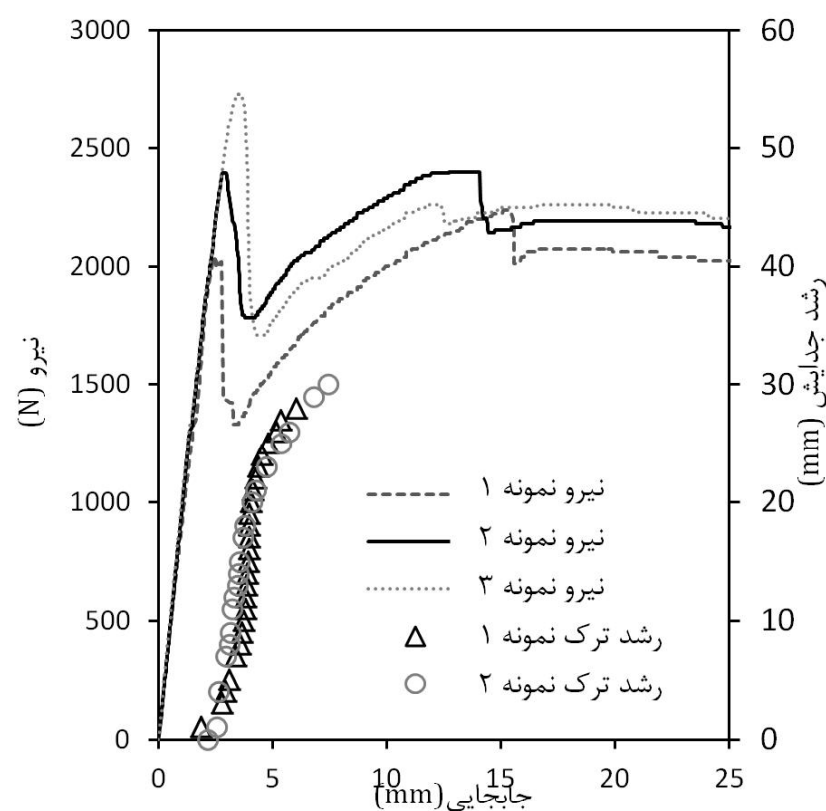
شکل ۲۹ تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی - نمونه مود دو

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

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

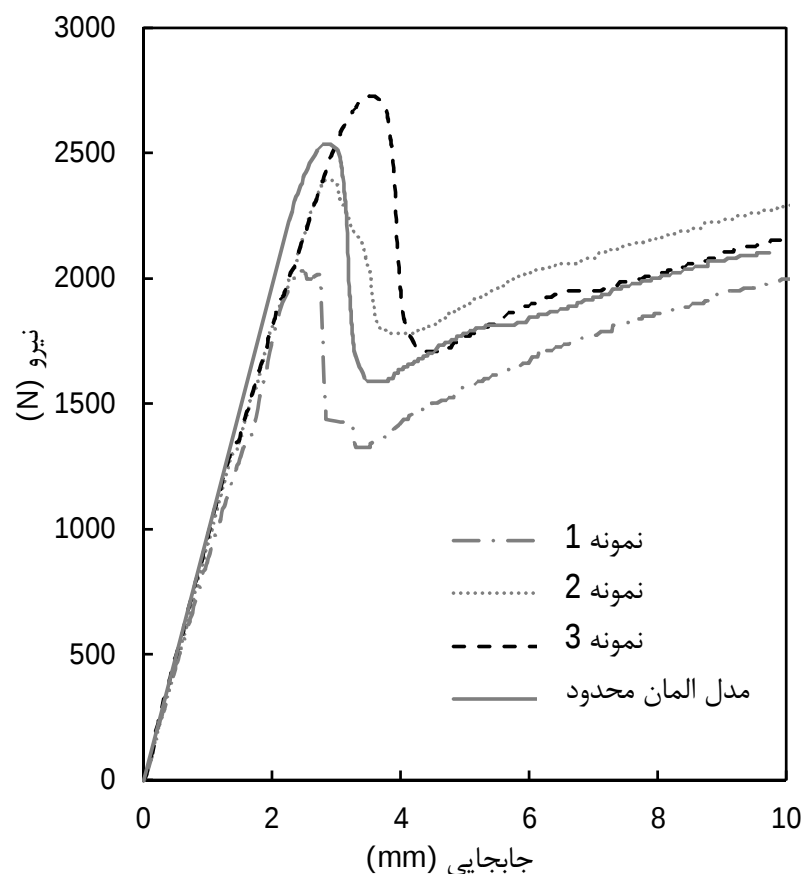
شکل ۲۴ پارامتر خرابی و جبهه ترک بدست آمده از مدل سازی عددی برای مود یک
جدول ۵ چقرمگی شکست بین لایه ای مود دو (واحد N/m)

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



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

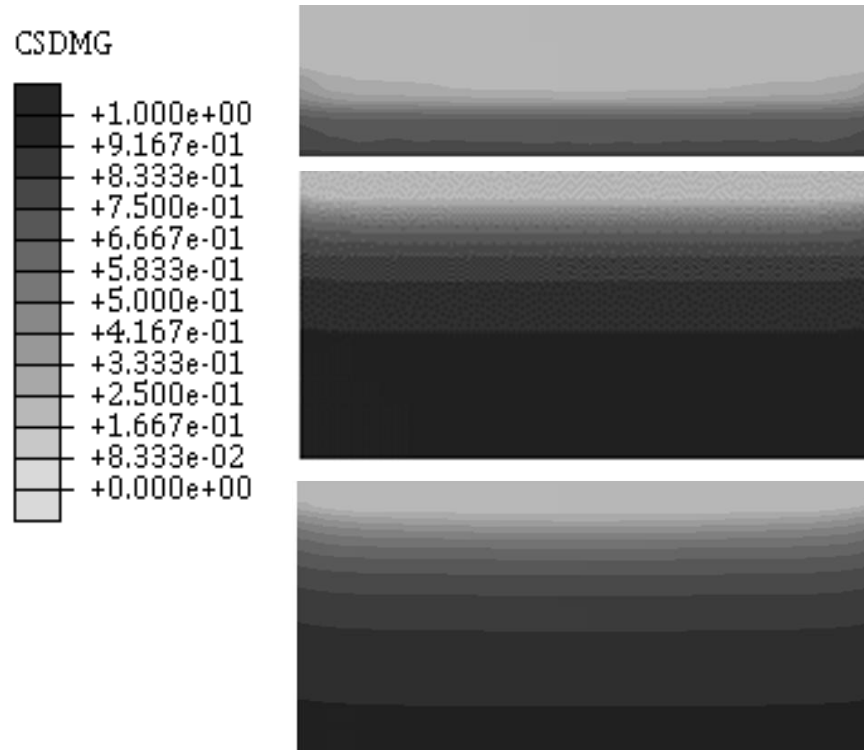
نمودار به دو قسمت تقسیم گردید و مشاهده گردید نمودار قسمت اول (جدایش بین لایه کامپوزیت و آلومینیوم) به صورت خطی و در منطقه دو (جدایش در لایه کامپوزیت) به صورت توانی می باشد. با انجام تحلیل فرکانس بر روی امواج با توجه به مکانیزم های شکست مشاهده شد در منطقه یک فرکانس های غالب در محدوده 100 و 200 کیلوهرتز بوده و در منطقه دو فرکانس های غالب در محدوده فرکانسی 450 تا 500 کیلوهرتز می باشد. در ادامه با استفاده از روش های مختلف چقرمگی شکست بین لایه ای محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر مدل سازی المان محدود با المان های چسبنده انجام گرفته که نمودار نیرو-جابجایی حاصله دارای مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمون می باشد. برای نمونه های 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، فرکانس های غالب در محدوده 400-450 کیلوهرتز بدست آورده شد که این محدوده فرکانس، می تواند 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 می باشد.



شکل 30 نمودار نیرو بر حسب جابجایی تجربی و حاصل از مدل سازی عددی

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. Furguele, 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, *Moades 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 .



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 نمونه ها، نمونه هایی 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 تا 200 کیلوهرتز برای مکانیزم شکست ماتریس و جدایش ماتریس از الیاف بوده و محدوده فرکانسی 400 تا 500 کیلوهرتز برای مکانیزم شکست الیاف می باشد. در نمونه های مود اول شکست، در حین بار گذاری ابتدا جدایش بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت اتفاق افتاده و در ادامه وارد لایه کامپوزیت می شود. این امر باعث افزایش نیرو و تغییر شیب نمودار رشد جدایش -جابجایی در حین تغییر مسیر جدایش شده است. صحت سنجی تغییر مسیر جدایش با بررسی سطوح شکست به صورت دیداری و عکس برداری 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