



## پایش خرابی ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله چندلایه‌ای فلز الیاف با آکوستیک امیشن

مرتضی احمدی نجف‌آبادی<sup>1</sup>، حسین حسینی تودشکی<sup>2\*</sup>، مجتبی صدیقی<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

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

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

\* تهران، 4413-1587، hosseini@aut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 آبان 1394

پذیرش: 13 دی 1394

ارائه در سایت: 05 بهمن 1394

کلید واژگان:

آکوستیک امیشن

پایش جدایش

وصله چندلایه فلز الیاف

تحلیل فرکانس امواج

### چکیده

در این مقاله به پایش خرابی ورق آلومینیومی T3-2024 ترک‌دار ترمیم شده با وصله چند لایه فلز الیاف با روش آکوستیک امیشن پرداخته می‌شود. برای آزمون تجربی 12 نمونه ساخته شده است. نمونه‌ها را به 4 دسته با توجه به زاویه ترک (صفر و 45 درجه) و حالت ترمیم شده و نشده تقسیم گردیده است. برای حصول اطمینان از خطای پایین ساخت نمونه‌ها، از لایه از پیش آغشته کامپوزیتی استفاده شده و سطوح آلومینیوم، آنودایز در محلول اسید کرمیک شده و پخت در اتوکلاو انجام گردیده است. در مرحله ایجاد ترک خستگی با استفاده از داده برداری آکوستیک امیشن لحظه ایجاد ترک خستگی تشخیص داده شده است. با استفاده از مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن شناسایی شروع و رشد خرابی و رشد بحرانی جدایش شناسایی شده است. مکانیزم‌های مختلف خرابی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و بررسی سطوح شکست مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از یک روش که جهت تحلیل فرکانسی امواج معرفی شده سعی شده است، محدوده فرکانسی خرابی‌های مختلف از هم تفکیک شود. با توجه به اشتراک داشتن محدوده فرکانسی مکانیزم‌های ایجاد ترک در رزین، جدایش الیاف از رزین و جدایش وصله از آلومینیوم، نمودار نیرو-جابجایی به سه ناحیه تقسیم شده و در هر ناحیه که احتمال وقوع یک فرایند بیشتر می‌باشد، محدوده فرکانسی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. محدوده فرکانس‌های غالب پلاستیک شدن آلومینیوم و رشد ترک 440 تا 480 کیلوهرتز و محدوده فرکانس‌های مکانیزم جدایش 100 تا 150 و 200 تا 220 کیلوهرتز بدست آورده شد.

## Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission

Morteza Ahmadi Najafabadi<sup>1</sup>, Hossin Hossini Toudeshky<sup>2\*</sup>, Mojtaba Sedighi<sup>1</sup>

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, hosseini@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 October 2015  
Accepted 03 January 2016  
Available Online 25 January 2016

**Keywords:**  
Acoustic emission  
Delamination monitoring  
FML patch  
Signal frequency analysis

### ABSTRACT

In this paper, acoustic emission monitoring of repaired aluminum 2024-T3 sheet with FML patch is studied. For the experimental investigation, 12 samples were made and classified into 4 categories according to the crack angle (zero and 45 degrees), and repaired or unrepaired state. To reduce manufacturing errors, composite prepreg is used for producing patches, aluminum surfaces are anodized and curing is done in an autoclave. In fatigue crack initiation process, using Acoustic Emission data acquisition crack initiation moment is detected. Onset of delamination, delamination advancement and critical delamination growth rate are identified using Acoustic Emission signal cumulative energy parameter. SEM image and investigation of failure surface are used for detecting failure mechanism. By introducing one frequency analysis method we tried to classify frequency range of failure mechanism signals. Because of frequency range intersection of matrix cracking, fiber/matrix separation and delamination of patch from aluminum sheet, force-displacement curve is divided to 3 zones and frequency analysis is done in each zone where probability of certain failure mechanism is higher than the others. Aluminum plastic deformation and crack growth occur in a same frequency range 440-480 kHz while, delamination happens in 100-150 kHz and 200-220 kHz frequency ranges.

### 1- مقدمه

خستگی عالی، مقاومت بالا و سفتی کششی مطلوب است [1]. بعد از ترمیم سازه باید بازرسی‌های دوره‌ای بر روی آن انجام گردد تا از سلامت ترمیم، اطمینان حاصل شود. یکی از آسیب‌های محتمل برای وصله‌ها جدایش آن‌ها از سازه می‌باشد. وصله‌های چندلایه‌ای فلز/الیاف، در صورت جدایش مانند

یکی از روش‌های بازیابی قطعات و سازه‌های معیوب، استفاده از وصله‌ها است. یکی از انواع وصله‌ها، وصله‌های چندلایه‌ای فلز الیاف می‌باشد. تحقیقات انجام شده بر روی این نوع ترمیم‌ها نشان داده است که این نوع ترمیم دارای خواص

Please cite this article using:

M. Ahmadi Najafabadi, H. Hossini Toudeshky, M. Sedighi, Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 1-9, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سعی کردند رابطه بین داده‌های آکوستیک امیشن و مکانیزم‌های خرابی تشخیص دهند.

در این تحقیق به پایش جدایش وصله چند لایه‌ای فلز/الیاف از صفحه آلومینیومی ترک‌دار، پرداخته می‌شود. پایش جدایش، با استفاده از روش آکوستیک امیشن، با توجه به قابلیت‌های این روش (از جمله، دقت، حساسیت و آنالیز بودن آن) صورت گرفته است. مجموعاً 12 نمونه ساخته شده است. نمونه‌ها به 4 دسته با توجه به زاویه ترک (صفر و 45 درجه) و حالت ترمیم شده و نشده تقسیم شده است. برای هر دسته 3 نمونه مورد آزمون قرار گرفته است. با استفاده از لایه از پیش آغشته کامپوزیتی، آنودایز در محلول اسید کرمیک و پخت در اتوکلاو تحت شرایط یکسان برای تمامی نمونه‌ها سعی شده است خطای ساخت نمونه‌ها کم شود. با به‌کارگیری نتایج تجربی، از جمله نمودارهای نیرو-جابجایی، بررسی سطوح شکست به‌صورت دیداری و با مشاهده تصاویر میکروسکوپ الکترونی مکانیزم‌های شکست شناسایی شد. سپس با تحلیل داده‌های آکوستیک امیشن، سعی شده است ارتباط بین پارامترهای امواج و مکانیزم‌های شکست مختلف جدایش وصله شناسایی گردد. پارامترهای امواج از جمله انرژی، مجموع انرژی و فرکانس امواج جهت تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل فرکانسی امواج با معرفی یک روش و با نوشتن کد صورت پذیرفته است. با این تحلیل سعی شده است محدوده فرکانسی امواج برای مکانیزم‌های مختلف خرابی بدست آورده شود.

## 2- آماده سازی نمونه و آزمون

### 2-1- ابعاد و جنس مواد

طراحی و ساخت نمونه، بر اساس اندازه طول ترک، ابعاد وصله و شرایط اعمال نیرو و با به‌کارگیری استاندارد [11] انجام گردید. ابعاد نمونه، موقعیت ترک و محل نصب حس‌گرهای آکوستیک امیشن در شکل 1 نمایش داده شده است. 12 نمونه ساخته شده، شامل 6 نمونه ترک‌دار ترمیم نشده و 6 نمونه ترمیم شده می‌باشد. از هر 6 نمونه سه نمونه دارای ترک با زاویه صفر درجه نسبت به عرض نمونه و سه نمونه دارای ترک با زاویه 45 درجه است.

ورق آلومینیومی مورد استفاده در وصله و نمونه اصلی از جنس 2024-T3 می‌باشد. لایه کامپوزیتی مورد استفاده در وصله، به‌صورت پارچه از پیش آغشته با الیاف دو جهته عمود بر هم است. الیاف لایه کامپوزیتی از جنس شیشه و از نوع ای<sup>1</sup> با در صد حجمی 50 درصد و رزین آن، اپوکسی می‌باشد (جدول 1).

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا 12 قطعه از یک ورق آلومینیوم 2024-T3 جهت نورد برش داده شده است. برای ایجاد ترک اولیه، ابتدا در وسط نمونه یک سوراخ به قطر 1mm زده شده و سپس با استفاده از دستگاه وایرکات یک شیار به طول 10mm مطابق با شکل 1 ایجاد گردیده است.

بعد از ایجاد شیار، آمادگی سطح برای نمونه‌ها با استفاده از فرایند اچ و در ادامه آنودایز در محلول اسید کرمیک صورت گرفته است. در فرایند آنودایز یک لایه اکسید به ضخامت 10 $\mu$ m روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌گردد. این امر باعث زبر شدن سطح و افزایش تماس می‌شود. در نتیجه استحکام اتصال کامپوزیت به آلومینیوم افزایش پیدا می‌کند.

در مرحله بعدی برای ایجاد ترک در نوک شیار، نمونه‌های تحت بار خستگی قرار داده شده است. بار خستگی با اعمال نیروی متناوب - 1.3 تا 13kN با فرکانس 5Hz و تعداد 1500 سیکل اعمال گردیده است. در حین

وصله‌های با الیاف شیشه، دچار تغییر رنگ نمی‌شوند و امکان پایش آن با بازرسی چشمی آن وجود ندارد [2].

حسینی و همکاران [3] تأثیر دمای پخت، بر روی عملکرد خستگی وصله چند لایه‌ای فلز/الیاف را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که دمای پخت، تأثیر محسوسی بر عملکرد وصله، تحت بار خستگی ندارد.

آکوستیک امیشن یک روش مناسب برای پایش آنالیز انواع خرابی‌ها است که در تحقیقات گوناگونی برای پایش انواع خرابی‌ها از آن استفاده می‌شود [4].

آرومگام و همکاران [5] با روش آکوستیک امیشن، مکانیزم‌های خرابی را در نمونه‌های استاندارد از جنس شیشه/اپوکسی تحت نیروی کششی دسته‌بندی نمودند. برای دسته‌بندی امواج آکوستیک امیشن، از ترکیب روش‌های آنالیز اجزای اصلی و روش دسته‌بندی فازی استفاده کردند. سپس با استفاده از تبدیل فوریه، محدوده فرکانسی هر کدام از این دسته امواج که متناظر با یک مکانیزم خرابی هستند، مشخص نمودند. همچنین نشان دادند که ترک‌خوردگی ماتریس کمترین محدوده فرکانسی و شکست الیاف بیشترین محدوده فرکانسی را دارند.

رفاهی و همکاران [6]، رشد جدایش بین لایه‌ای را در نمونه شیشه/پلی استر، تحت بارگذاری مود I بررسی نمودند. با تعیین محدوده فرکانسی مکانیزم‌های خرابی مختلف، رفتار رشد آسیب در نمونه‌ها بررسی کردند. با استفاده از تبدیل فوریه، نشان دادند که در آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای، امواج آکوستیک امیشن دارای محدوده فرکانسی 125-250 kHz می‌باشد که متناظر با ترک-خوردگی ماتریس است. اما در ادامه رشد جدایش بین لایه‌ای، محدوده فرکانسی 250-320 kHz و 350-450 kHz به محدوده فرکانسی امواج آکوستیک امیشن افزوده می‌شود. این مرحله، متناظر با وقوع مکانیزم جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف است.

موسوی و همکاران [7] رفتار مکانیکی و آکوستیک امیشن جدایش بین لایه‌ای را در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه استاتیکی و خستگی مود I را مورد بررسی قرار دادند.

احمدی و همکاران [8] جدایش لایه آلومینیوم 2024-T3 و لایه کامپوزیت از پیش آغشته (مورد استفاده در این پژوهش) را تحت بارگذاری مود یک و مود دو شکست مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحلیل فرکانسی مربوط به مکانیزم‌های شکست را با مرجع [6] مقایسه کرده و گزارش دادند.

اکافر و همکاران [9] از آکوستیک امیشن به‌عنوان روش پایش هم‌زمان جهت شناسایی رشد ترک، در ورق آلومینیوم 2024-T6 ترمیم شده با وصله برن اپوکسی بهره بردند. برای پیش‌بینی رشد ترک از روش شبکه عصبی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که با استفاده از روش‌های فیلترینگ می‌توان سیگنال‌های رشد ترک را از نویزها مجزا نمود.

گو و همکاران [10] از وصله با الیاف شیشه جهت ترمیم استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند، در حین بارگذاری علاوه بر جدایش وصله، وصله نیز دچار شکست می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و تصاویر میکروسکوپ الکترونی سه منطقه برای رفتار خرابی نمونه‌ها تعیین کردند. نشان دادند در ناحیه اول فقط ترک خوردگی رزین مشاهده می‌شود و در ناحیه سوم فقط رشد ترک در آلومینیوم اتفاق می‌افتد، ولی در ناحیه دوم مجموعه‌ای از مکانیزم‌های شکست از جمله شکست ماتریس، شکست الیاف و پلاستیک شدن آلومینیوم وقوع پیدا می‌کند. با مشخص شدن مکانیزم‌های شکست سیگنال‌های آکوستیک امیشن دریافت شده مورد ارزیابی قرار دادند و

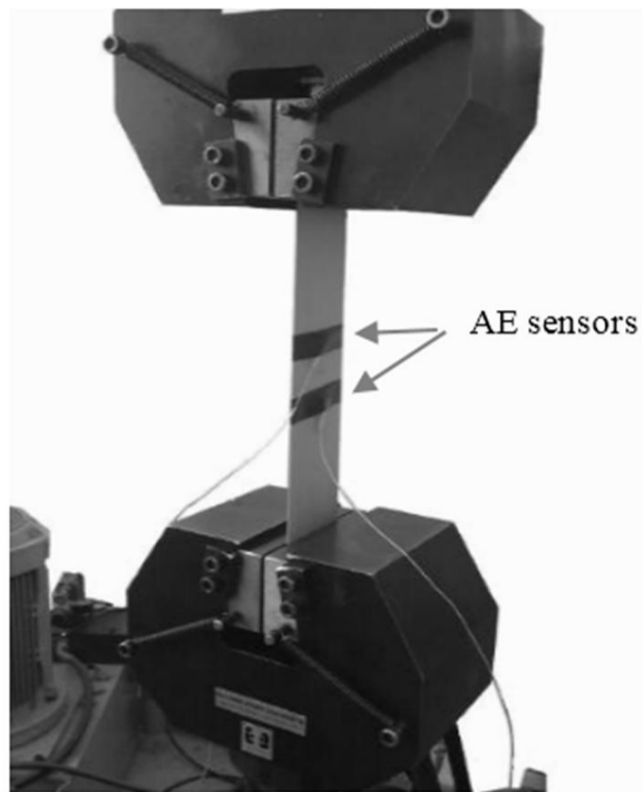


Fig.2 Fatigue crack initiation test setup

شکل 2 چیدمان آزمون برای ایجاد ترک اولیه خستگی

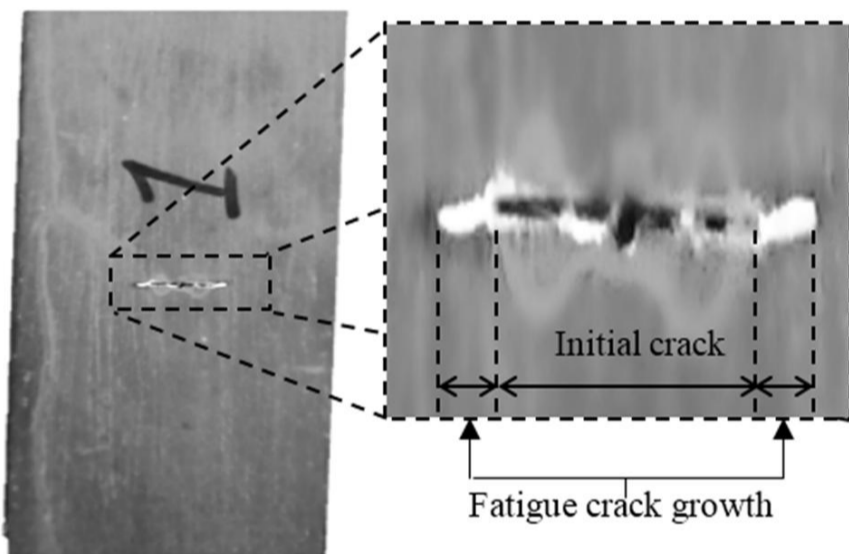


Fig. 3 crack length measurement by liquid Penetrant Testing

شکل 3 اندازه‌گیری ترک با استفاده از آزمون مواد نافذ

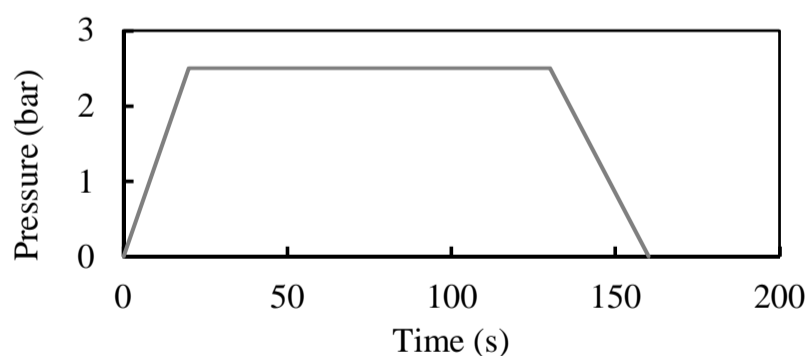


Fig. 4 Autoclave temperature-time curve

شکل 4 نمودار دمای داخل اتوکلاو برحسب زمان پخت

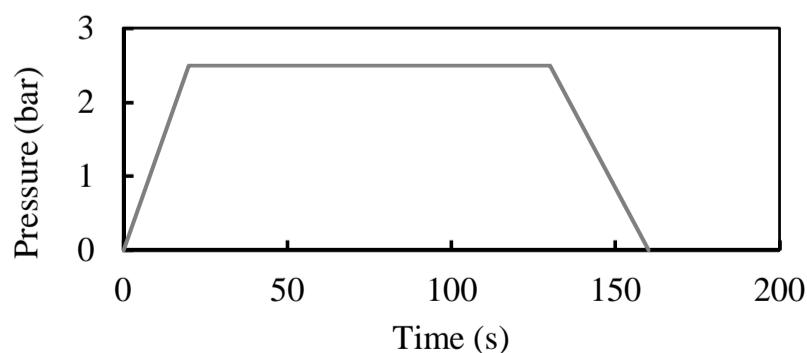


Fig. 5 Autoclave atmospheric pressure-time curve

شکل 5 نمودار فشار محیطی اتوکلاو برحسب زمان پخت

ایجاد ترک خستگی، داده برداری آکوستیک امیشن نیز انجام شده است. با تحلیل داده‌ها سعی شد، لحظه ایجاد ترک تشخیص داده شود. همچنین فرکانس امواج ناشی از مکانیزم رشد ترک بدست آورده شد. در شکل 2 چیدمان آزمون این مرحله نمایش داده شده است.

در ادامه، با استفاده از روش آزمون غیر مخرب مایع نافذ، مقدار رشد ترک برای نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. در این فرایند نمونه در مایع نافذ غوطه‌ور شده و این مایع در ترک نفوذ می‌کند. بعد از آن جهت مشاهده ترک، نمونه تحت تابش اشعه ماوراء بنفش قرار می‌گیرد. در شکل 3 ترک ایجاد شده قابل مشاهده است. با این آزمون، از وجود ترک اولیه برای تمامی نمونه‌ها اطمینان حاصل شده است.

سپس 6 عدد وصله کامپوزیتی از نوع چندلایه‌ای فلز الیاف آماده گردید. برای هر وصله ابتدا، ورق آلومینیوم 2024-T3 به ضخامت 0.4 mm و دو لایه ورق کامپوزیت از پیش آغشته برش داده شد. سپس روی سطوح آلومینیوم، فرایند آمادگی سطح به صورت آنودایز در محلول اسید کرومیک انجام گردید. در ادامه، اجزاء وصله روی نمونه ترک‌دار قرار داده شده و در اتوکلاو تحت دما و فشار مشخص شده توسط شرکت سازنده لایه کامپوزیت، فرایند پخت انجام گرفته است. شرایط پخت با نمودارهای دما (شکل 1)، فشار اتوکلاو (شکل 2) و فشار خلاء (شکل 3) برحسب زمان تعریف می‌شود. نمونه بعد از انجام مراحل پخت، در شکل 7 نمایش داده شده است.

## 2-2- دستگاه آزمون و روند آزمون

در این پژوهش از دستگاه شرکت دارتک، با ظرفیت 5 تن و با قابلیت بارگذاری در محدوده فرکانسی 1-100 هرتز برای ایجاد ترک اولیه و آزمون کشش استفاده شده است.

در آزمون کشش به دلیل بالا بودن نیروی اعمالی، امکان لغزش نمونه در محل فک دستگاه حین بارگذاری وجود دارد و برای جلوگیری از این امر از فک‌های با قابلیت گرفتن نمونه با فشار هیدرولیک استفاده شده است. سرعت بارگذاری 1 mm/min انتخاب گردید.

برای داده برداری آکوستیکی از برد الکترونیکی پی‌سی‌آی<sup>1</sup> با نرخ

جدول 1 خواص لایه کامپوزیتی

Table 1 Prepreg mechanical properties

$E_1 = E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (GPa)
26.2	6.51	0.14	3.51

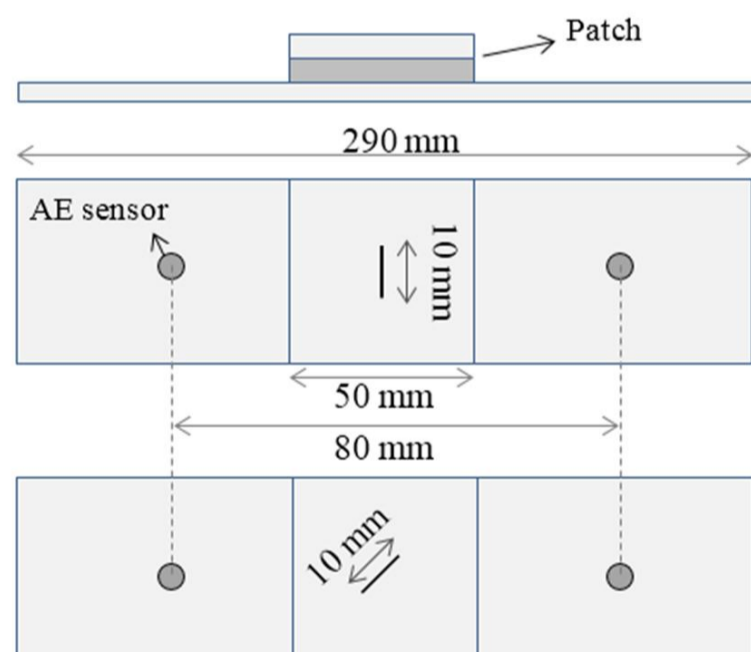


Fig.1 Size of specimen and location of the sensors

شکل 1 ابعاد نمونه و محل نصب حس‌گرهای آکوستیک امیشن

1- PCI-2

تابعی از نیرو می‌باشد. در شکل 8 بیشینه جابجایی فک در محدوده نوسان نمایش داده شده است. در لحظه‌ای که ترک شروع به رشد می‌کند برای اعمال نیروی بیشینه تعریف شده، دستگاه باید جابجایی بیشتری به نمونه وارد کند. این امر باعث افزایش ناگهانی جابجایی بیشینه فک می‌شود. بنابراین از لحظه تغییر مقدار جابجایی، می‌توان برای شناسایی شروع رشد ترک استفاده نمود. همان طور که در شکل 8 مشاهده می‌گردد، در لحظه‌ای که جابجایی فک دستگاه افزایش ناگهانی دارد، مجموع انرژی امواج نیز افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه این لحظه را می‌توان به‌عنوان لحظه ایجاد ترک در نظر گرفت.

تحلیل فرکانسی امواج آکوستیک امیشن با استفاده از روش اشاره شده در [8] انجام شده است. بدین صورت که با تهیه یک کد برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب<sup>4</sup>، تبدیل فوریه روی امواج اعمال گردیده است. سپس دامنه‌های فرکانس‌های موجود در هر موج، به‌دست آورده شد. در ادامه با تعیین محدوده فرکانسی و زمانی مشخص، مجموع دامنه‌های فرکانس‌های غالب در این محدوده به محاسبه گردیده است. در شکل 9 مجموع دامنه‌ها برحسب زمان و جابجایی نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان که ترک خستگی ایجاد شده و رشد کرده است، مجموع دامنه در محدوده فرکانسی 400 و 450 کیلوهرتز افزایش پیدا کرده است. در نتیجه می‌توان این محدوده را مربوط به رشد ترک در آلومینیوم دانست.

### 3-2- نمونه‌های ترک‌دار با زاویه صفر و 45 درجه

در این قسمت شناسایی شروع خرابی در نمونه‌ها با ترک صفر و 45 درجه، تحت بار کششی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل 10 نمونه‌ها بعد از انجام آزمون نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ترک تقریباً با زاویه صفر درجه رشد کرده و در ضخامت با زاویه 45 درجه شکسته است. در شکل 11 سطح مقطع شکست نمونه با ترک صفر درجه نمایش داده شده است. با بررسی سطح مقطع شکست، می‌توان شیار اولیه ایجاد شده با وایرکات، طول ترک اولیه ایجاد شده با دستگاه خستگی و رشد ترک تحت بار کشش را به خاطر تفاوت ظاهری سطح شکست آن مشاهده نمود.

برای بررسی لحظه شروع مکانیزم‌های خرابی از مجموع انرژی امواج

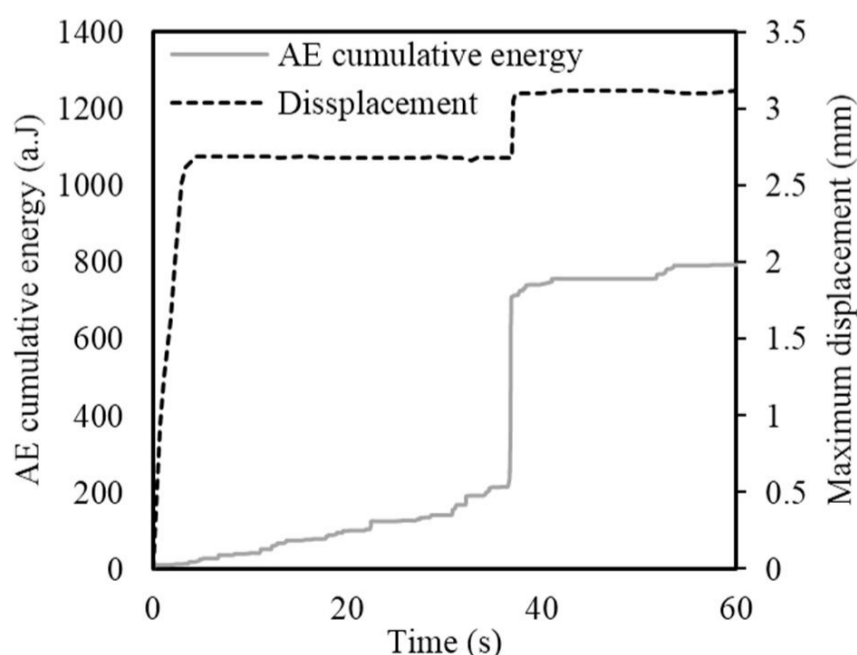


Fig. 8 Maximum displacement and cumulative AE signal energy versus time curve

شکل 8 نمودار جابجایی بیشینه و مجموع انرژی بر حسب زمان

4- Matlab

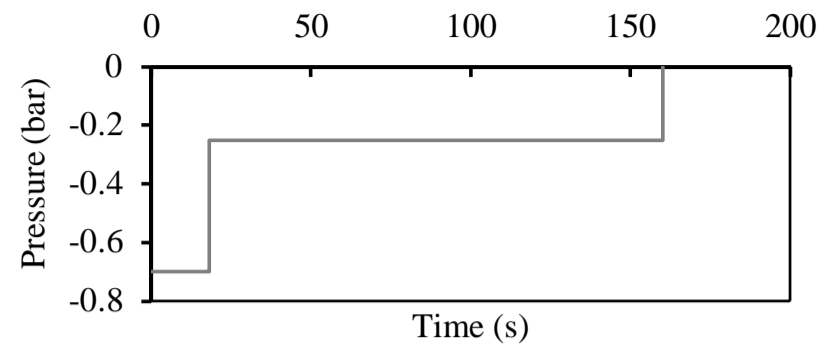


Fig. 6 Autoclave vacuum pressure-time curve

شکل 6 نمودار فشار خلاء کیسه اتوکلاو برحسب زمان پخت

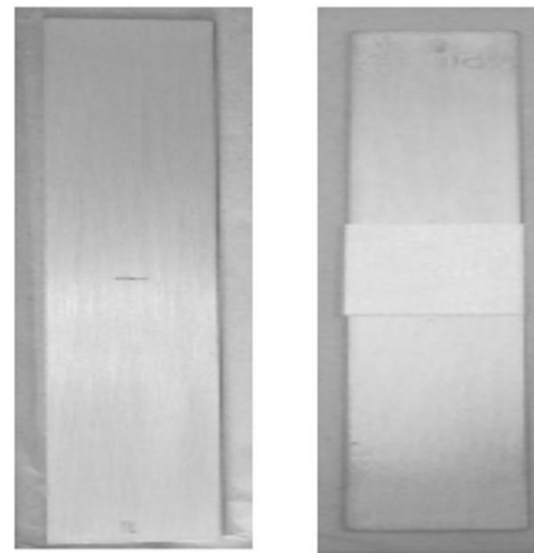


Fig. 7 Repaired specimen after curing

شکل 7 نمونه ترمیم شده بعد از پخت

1MHz، نرم‌افزار آ-ای-وین<sup>1</sup> و دو حس‌گر محصول کمپانی پک<sup>2</sup> به نام پیکو<sup>3</sup> که تک بلوره پیزوالکتریک با پهنای باند وسیع می‌باشد، استفاده گردید. محدوده بهینه کاری حس‌گرها 100-750 kHz و فرکانس رزونانسی آن‌ها 513.28kHz می‌باشد. به‌وسیله پیش تقویت کننده با ضریب 40dB داده‌های دریافتی توسط هر حس‌گر تقویت گردیده است. برای بهبود شرایط عبور دهی سیگنال بین نمونه و حس‌گر از گریس سیلیکون خلا شده استفاده گردید. برای حذف نویز زمینه، در حین داده‌برداری حد آستانه 35dB در نظر گرفته شد.

### 3- نتایج

با توجه به پیچیدگی تحلیل داده‌های آکوستیک امیشن در این تحقیق سعی شده با استفاده از داده‌های مرجع [8] و نتایج این تحقیق، ارتباط بین پارامترهای امواج آکوستیک امیشن و مکانیزم‌های شکست شناسایی شود.

#### 3-1- ایجاد ترک خستگی

همان طور که در قسمت ساخت نمونه اشاره گردید، بعد از ایجاد شیار در نمونه، با اعمال بار خستگی ترک واقعی در نمونه ایجاد شد. طول ترک ایجاد شده با روش مایع نافذ اندازه‌گیری شد. برای شناسایی ارتباط بین پارامترهای امواج آکوستیک امیشن و مکانیزم‌های شکست، در حین فرایند ایجاد ترک خستگی، داده‌برداری آکوستیک امیشن انجام شد.

لحظه ایجاد ترک با استفاده از مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن و تغییر جابجایی فک دستگاه کشش شناسایی گردید. در شکل 8 نمودار جابجایی بیشینه و مجموع انرژی امواج بر حسب زمان نمایش داده شده است. برای ثابت نگه داشتن نیروی بیشینه و کمینه اعمالی، جابجایی فک دستگاه

1- AEWIn  
2- PAC  
3- PICO

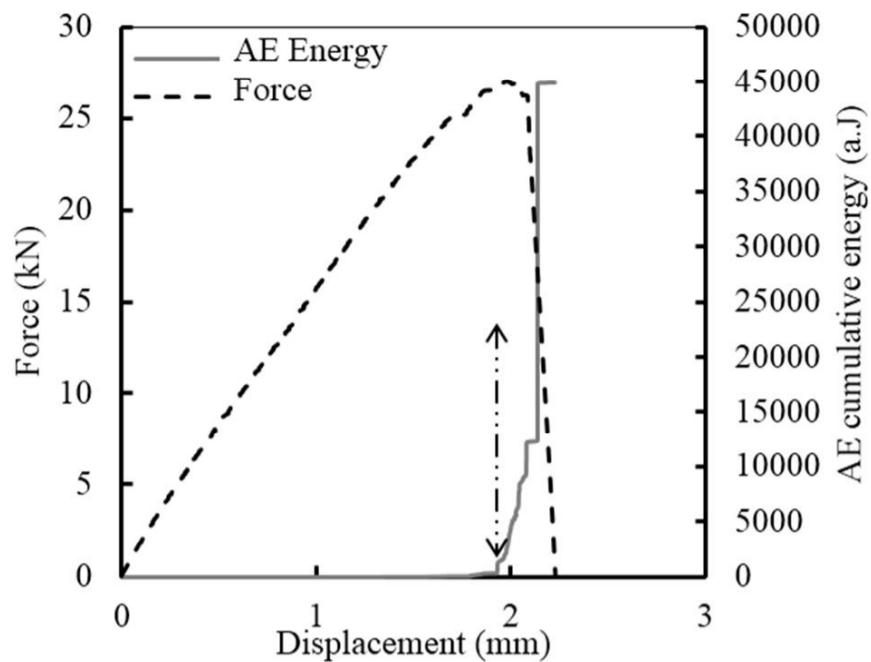


Fig. 12 Force and cumulative AE signal energy versus displacement for unrepaired specimen with 0° crack

شکل 12 نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن برحسب جابجایی برای نمونه ترمیم نشده با ترک صفر درجه

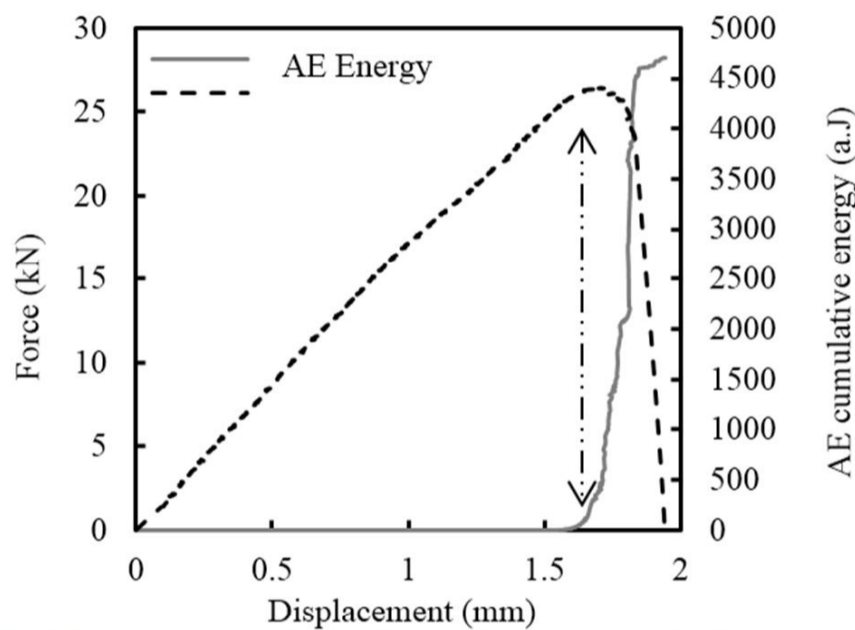


Fig. 13 Force and cumulative AE signal energy versus displacement for unrepaired specimen with 45° crack

شکل 13 نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن برحسب جابجایی برای نمونه ترمیم نشده با ترک 45 درجه

بوده و در ادامه جدایش وارد لایه کامپوزیت شده، ولی در نمونه های مود دو جدایش وارد لایه کامپوزیت نشده است. با داشتن این نتایج سطوح جدایش در این تحقیق بررسی می شود. در شکل 14 نمونه های ترمیم شده بعد از جدایش کامل، نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، جدایش وصله فقط بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت صورت پذیرفته است. در مقایسه با نتایج مرجع [8] علت این امر را می توان غالب بودن مود دوم شکست، در این نوع بارگذاری در نظر گرفت.

با بررسی جدایش وصله، مشاهده گردید که وصله از یک سمت نمونه آلومینیومی به طور کامل جدا شده و در سمت دیگر وصله مقدار کمی دچار جدایش شده است.

شروع رشد خرابی با استفاده از انرژی آکوستیک امیشن و مجموع انرژی آکوستیک امیشن مورد ارزیابی قرار گرفت. به نظر می رسد روش اول برای تشخیص شروع خرابی های جزئی کارا تر بوده و روش دوم برای تشخیص شروع خرابی های بحرانی مفید است.

در این تحقیق، از پارامتر مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن جهت شناسایی شروع و رشد جدایش وصله استفاده شده است. در نمونه های ترمیم

آکوستیک امیشن استفاده گردید. نمودار مجموع انرژی امواج و نیرو برحسب جابجایی برای نمونه با ترک صفر درجه در شکل 12 و برای نمونه با ترک 45 درجه در شکل 13 نمایش داده شده است. در این نمودارها، لحظه ای که شیب نمودار مجموع امواج تغییر ناگهانی دارد را می توان به عنوان لحظه شروع خرابی در نظر گرفت. این لحظه با علامت بردار، در شکل 13 نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، لحظه شروع خرابی کمی قبل از زمان رسیدن به نیروی بیشینه است.

### 3-3- نمونه های ترمیم شده

در مرجع [8] سطوح جدایش آلومینیوم و کامپوزیت (مورد استفاده در این پژوهش) برای نمونه های مود یک و دو شکست<sup>1</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در نمونه های مود یک مسیر جدایش ابتدا بین آلومینیوم و لایه کامپوزیت

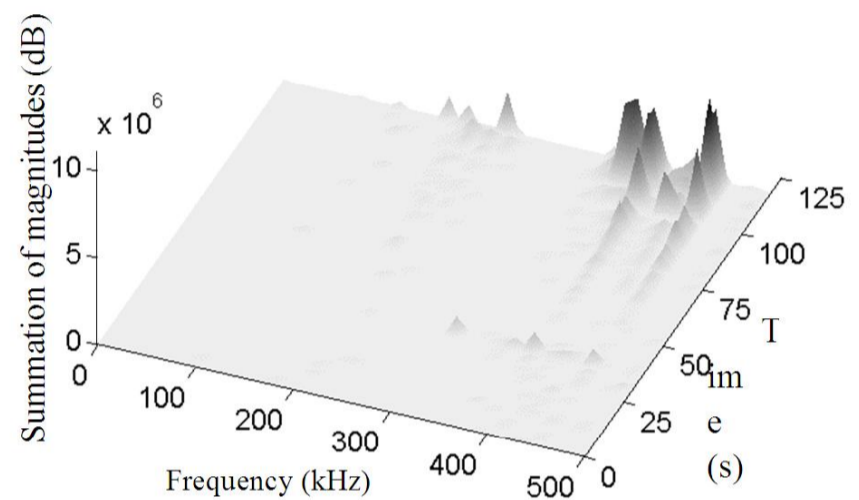


Fig. 9 Fatigue crack propagation frequency analysis curve

شکل 9 نمودار تحلیل فرکانسی رشد ترک خستگی

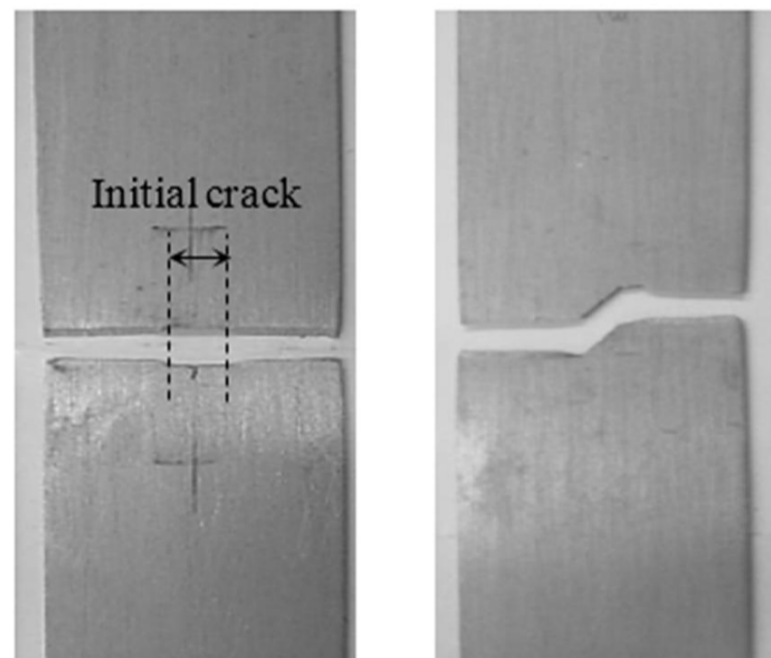


Fig. 10 After test unrepaired specimen with 0° and 45° crack

شکل 10 نمونه های با ترک صفر و 45 درجه بعد از آزمون

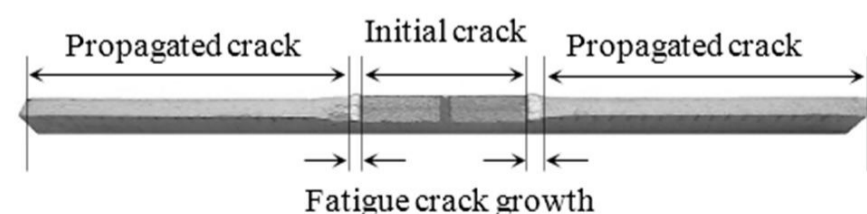


Fig. 11 Cross section of specimen

شکل 11 سطح مقطع نمونه

1- DCB and ENF specimen

می‌گردد. این سه تغییر شیب به‌صورت خطوط دارای پیکان نمایش داده شده است. اولین تغییر شیب را می‌توان مربوط به شروع خرابی، دومین تغییر شیب را می‌توان مربوط به لحظه شروع جدایش بحرانی وصله و سومین تغییر شیب را می‌توان مربوط به رشد ترک در آلومینیوم در نظر گرفت.

در ادامه به مقایسه نتایج نمونه‌های ترمیم شده و ترمیم نشده پرداخته می‌شود. نمودار نیرو-جابجایی نمونه ترک‌دار با زاویه صفر درجه و 45 درجه قبل و بعد از ترمیم به ترتیب در شکل‌های 17 و 18 نمایش داده شده است. با توجه به تکرار پذیر بودن نتایج از هر سه نمونه مشابه، فقط نتایج یک نمونه ارائه می‌شود. از سه نظر می‌توان تأثیر ترمیم را مورد بررسی قرار داد. اول تفاوت شیب قسمت اولیه نمودار می‌باشد. دلیل این افزایش شیب در نمونه‌های ترمیم شده را می‌توان افزایش استحکام این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های ترمیم نشده دانست. دوم افزایش نیروی بیشینه تحمل شده در نمونه‌های ترمیم شده می‌باشد. سوم تفاوت در شیب نزولی قسمت افت نیروی نمودار می‌باشد. شیب نزولی قسمت بعد از ایجاد خرابی، در نمونه‌های ترمیم شده بیشتر از نمونه‌های بدون وصله می‌باشد. در نمونه‌های ترمیم شده پس از جدایش وصله، تمامی بار اعمالی به نمونه اعمال می‌شود. چون مقدار نیروی کششی وارده در این حالت، بیشتر از شرایط بارگذاری بدون وصله می‌باشد، شیب نمودار قسمت انتهایی بیشتر می‌شود.

با مقایسه نمودار مجموع انرژی امواج در قبل و بعد از ترمیم مشاهده می‌گردد که به دلیل وقوع مکانیزم‌های بیشتر خرابی مقدار نهایی انرژی تولید شده برای نمونه ترمیم شده بیشتر است.

در نمونه‌های ترمیم نشده نیروی تحمل شده توسط نمونه با ترک صفر درجه اندکی از نمونه با ترک 45 درجه کمتر است. علت این امر می‌تواند به خاطر بیشتر بودن سطح مقطع نمونه با ترک 45 درجه باشد. همچنین در نمونه با ترک صفر درجه در جابجایی فک بیشتر دچار خرابی شده است. علت این امر نیز می‌تواند به دلیل وقوع مود ترکیبی شکست در نمونه با ترک 45 درجه باشد. در حالت مود دوم شکست مکانیزم لغزش صورت می‌گیرد. با ترکیب این دو مود شکست، رشد ترک در بازشدگی دهانه‌ی ترک کمتری اتفاق می‌افتد.

در نمونه‌های ترمیم شده، نمونه با ترک 45 درجه نسبت به نمونه با ترک صفر درجه، نیروی بیشتری را تحمل کرده و در جابجایی فک بیشتری دچار خرابی گردیده است.

#### 4- نتایج آکوستیک امیشن جدایش پیشرونده در وصله

برای شناسایی جدایش پیشرونده، توزیع فرکانسی امواج آکوستیک امیشن مورد بررسی قرار گرفته است. سه منطقه بر اساس نمودار نیرو-جابجایی برای بررسی توزیع فرکانسی در نظر گرفته شده است. منطقه اول قبل از ناحیه غیرخطی شدن نمودار، منطقه دوم از ناحیه غیرخطی شدن نمودار تا قبل از شکست و منطقه سوم ناحیه شکست می‌باشد.

در شکل 19 توزیع فرکانسی برای نمونه با ترک صفر درجه ترمیم نشده نمایش داده شده است. در این نمودار در هر دسته فرکانسی، مجموع دامنه‌ها آن دسته فرکانسی جمع شده و نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، فرکانس‌های در محدوده 450 کیلوهرتز دامنه بیشتر بوده و به‌عنوان فرکانس غالب در نظر گرفته می‌شود. این فرکانس می‌تواند مربوط به فرکانس‌های پلاستیک شدن اطراف نوک ترک باشد. نتایج تحلیل فرکانسی این ناحیه مطابق با محدوده فرکانسی به دست آمده در فرایند ایجاد ترک

شده امواج آکوستیک امیشن، می‌تواند ناشی از جدایش وصله، رشد ترک و پلاستیک شدن آلومینیوم باشد. نمودار مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن و نیرو برحسب جابجایی، برای نمونه ترمیم شده با ترک صفر درجه در شکل 15 و برای نمونه ترمیم شده با ترک 45 درجه در شکل 16 نمایش داده شده است. در نمودار مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن سه تغییر شیب زیاد مشاهده

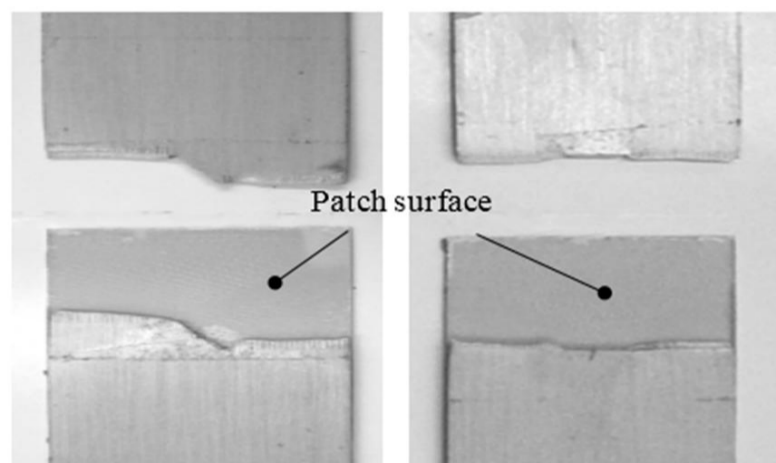


Fig. 14 After test repaired specimen with 0° crack

شکل 14 نمونه‌های با ترک صفر درجه ترمیم شده بعد از آزمون

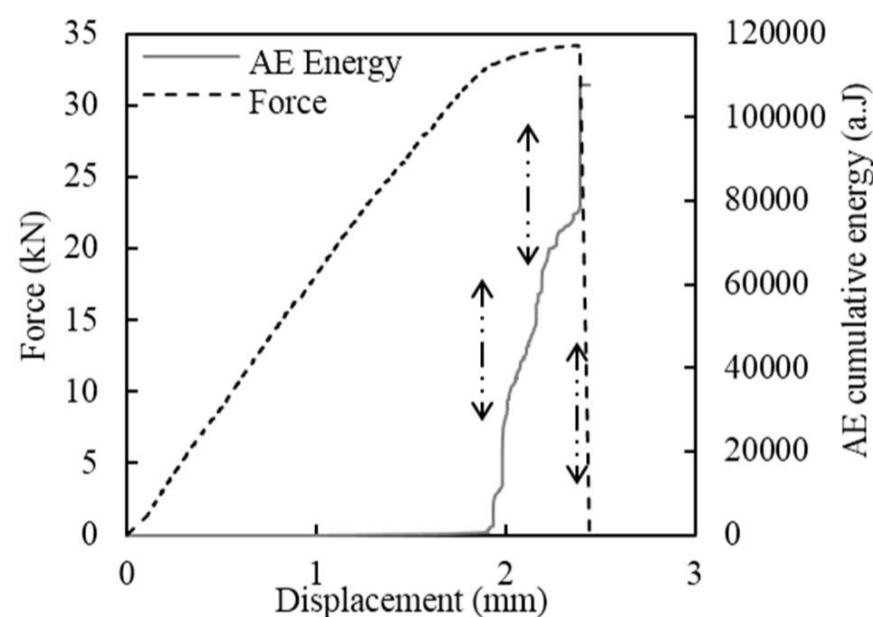


Fig. 15 Force and cumulative AE signal energy versus displacement for repaired specimen with 0° crack

شکل 15 نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن برحسب جابجایی نمونه ترمیم شده با ترک صفر درجه

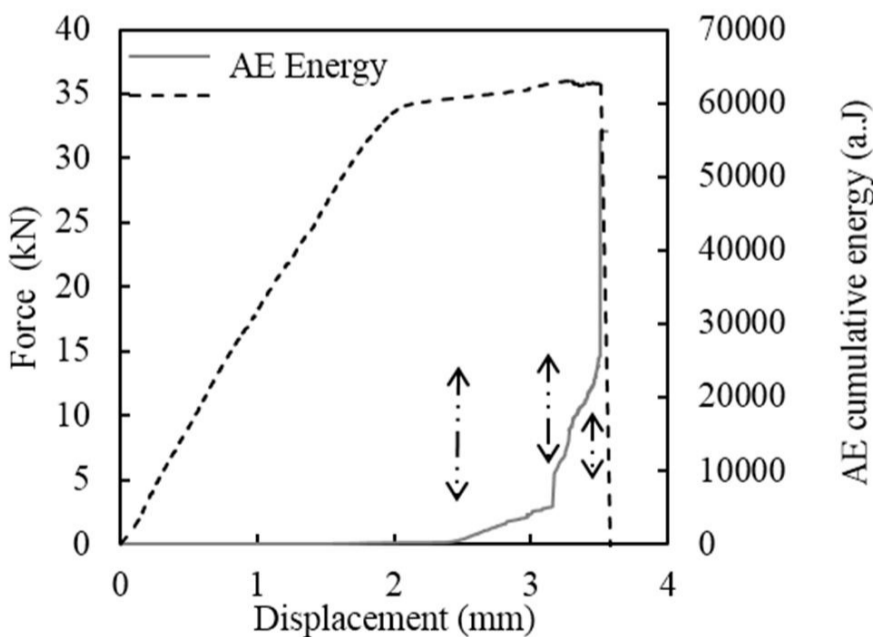


Fig. 16 Force and cumulative AE signal energy versus displacement for repaired specimen with 45° crack

شکل 16 نمودار نیرو و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن برحسب جابجایی نمونه ترمیم شده با ترک 45 درجه

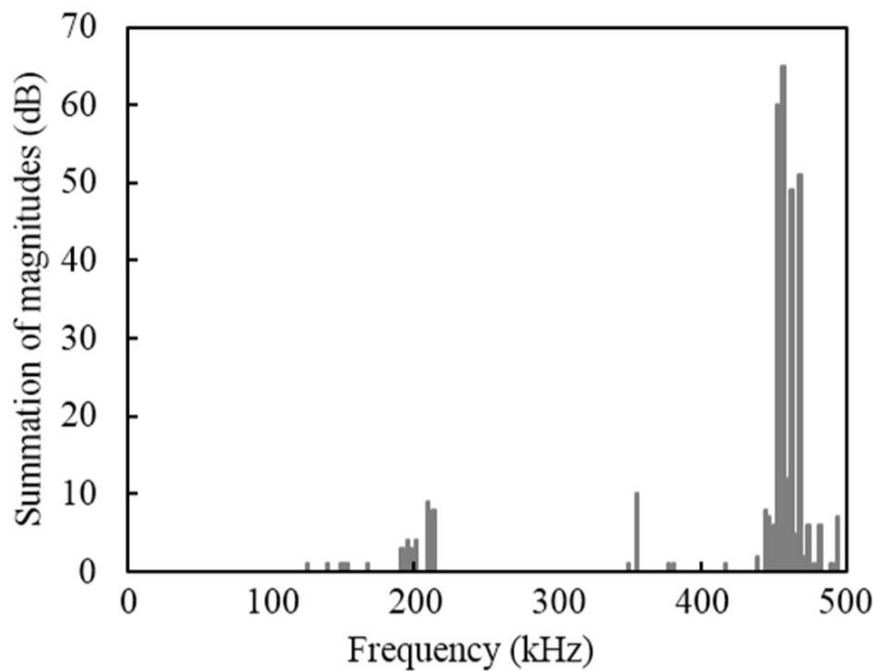


Fig. 19 Frequency distribution for unrepaired specimen in region 1  
شکل 19 توزیع فرکانسی برای نمونه ترک‌دار ترمیم نشده در منطقه 1

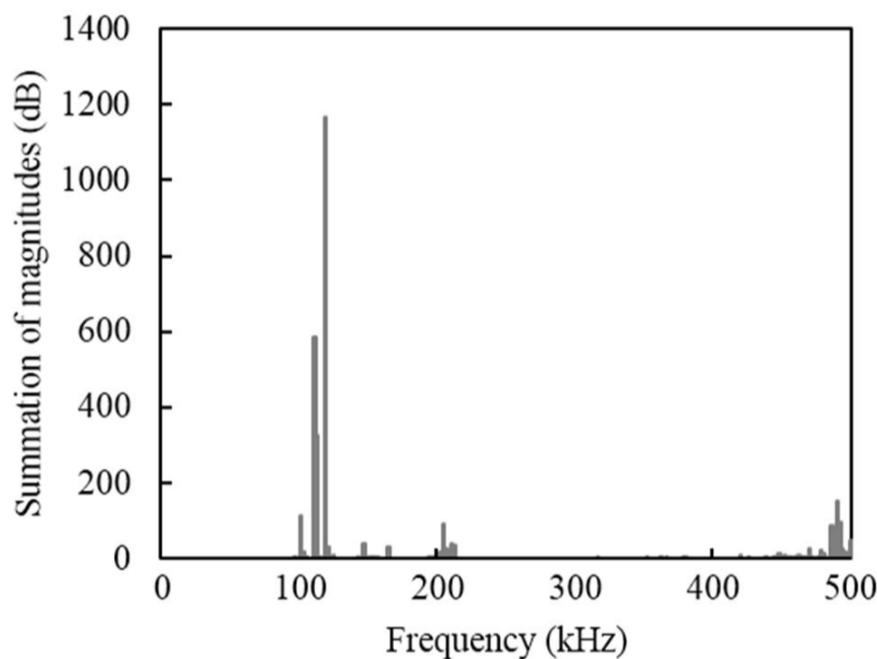


Fig. 20 Frequency distribution for repaired specimen in region 2  
شکل 20 توزیع فرکانسی برای نمونه ترک‌دار ترمیم شده در منطقه 2

پلاستیک شدن نوک ترک در آلومینیوم حدود 400-500 کیلوهرتز بوده و محدوده فرکانسی جدایش وصله 200-300 کیلوهرتز می‌باشد. نتایج حاصله از توزیع فرکانسی با مرجع [10] نیز مقایسه گردید که نتایج مشابه است.

برای بررسی مکانیزم‌های شکست اتفاق افتاده در حین آزمون کشش سطوح شکست نمونه‌های ترمیم شده به صورت دیداری و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد بازرسی قرار گرفت. با مشاهده تصاویر مشاهده گردید که مکانیزم‌های شکست از جمله شکست الیاف، جدایش الیاف و شکست الیاف به صورت جزئی اتفاق افتاده است. در شکل 22 تصویر سطح جدایش نمونه با میکروسکوپ الکترونی نمایش داده شده است که جدایش الیاف و شکست رزین قابل تشخیص می‌باشد.

### 5- بحث و نتیجه گیری

یکی از محدودیت‌های تحقیقات مشابه در زمینه ترمیم با استفاده از وصله‌های چند لایه‌ای فلز الیاف، عدم تکرارپذیری مطلوب نتایج بخاطر شیوه ساخت دستی نمونه‌ها است. با استفاده از آلومینیوم 2024-T3 با کیفیت تولید مطلوب و استفاده از لایه از پیش آغشته کامپوزیتی، در این پژوهش سعی شده است تا نمونه‌هایی با تکرارپذیری مطلوب حاصل گردد. برای کیفیت مطلوب اتصال سطوح آلومینیوم، نمونه‌ها طبق شرایط کاملاً یکسان علاوه بر

خستگی است. در سه منطقه اشاره شده برای همه نمونه‌های ترک‌دار ترمیم نشده نتایج مشابه می‌باشد.

در شکل 20 تحلیل فرکانسی برای نمونه با ترک صفر درجه ترمیم شده در منطقه دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، به خاطر اتصال وصله، دامنه‌های فرکانس‌های مربوط به پلاستیک شدن در اطراف نوک ترک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم گردیده است. بجای آن دامنه‌های محدوده‌ی فرکانسی 100 تا 150 کیلوهرتز افزایش پیدا کرده است. با توجه به مرجع [8] این محدوده فرکانسی مربوط به خرابی‌های مربوط به رزین می‌باشد. نتایج تحلیل فرکانسی برای نمونه‌های ترمیم شده در منطقه دوم مشابه است.

در شکل 21 توزیع فرکانسی برای نمونه ترمیم شده با ترک صفر درجه در منطقه سه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت به خاطر وقوع انواع مکانیزم‌های شکست، مجموع دامنه در دسته‌های فرکانسی مختلف زیاد می‌باشد. این نمودار نیز برای منطقه 3 برای نمونه‌های ترمیم شده مشابه است.

به‌طور کلی از نتایج حاصله می‌توان استنباط نمود محدوده فرکانسی

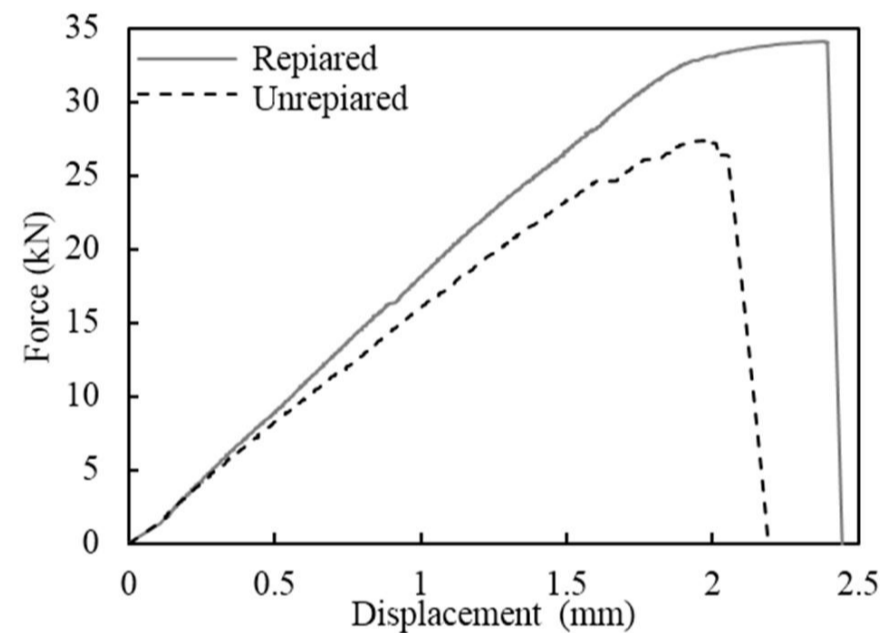


Fig. 17 Force-displacement curves for repaired and unrepaired specimen with  $0^\circ$  crack

شکل 17 نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های ترمیم شده و نشده با ترک صفر درجه

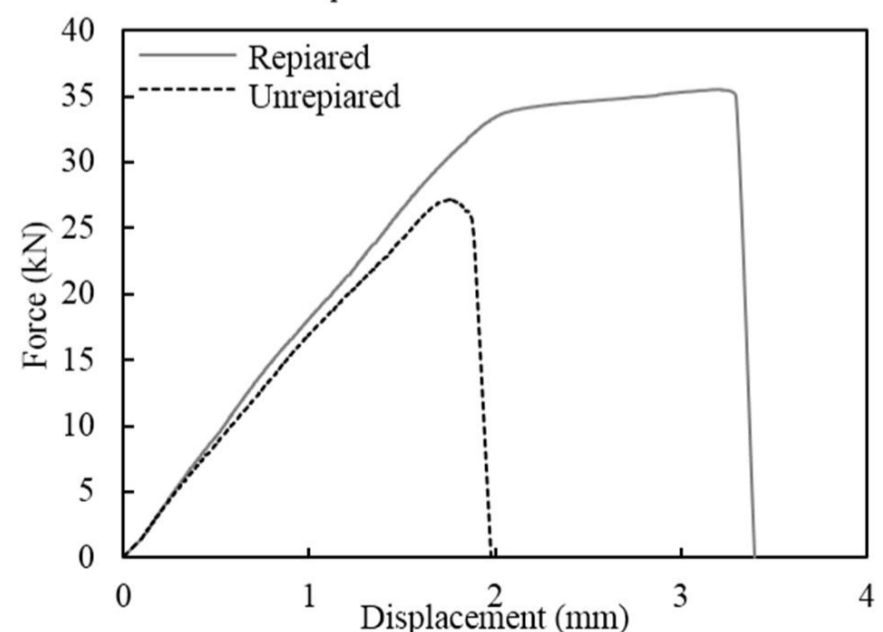


Fig. 18 Force-displacement curves for repaired and unrepaired specimen with  $45^\circ$  crack

شکل 18 نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های ترمیم شده و نشده با ترک 45 درجه

نشده می‌باشد.

شروع خرابی و رشد بحرانی جدایش در نمونه‌ها با استفاده از پارامتر مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن شناسایی شد. با توجه به تشخیص لحظه رشد جدایش کمی قبل از رسیدن به نیروی بیشینه، در کاربردهای مشابه (از جمله تعمیر بال و تعمیر مخازن) می‌توان با استفاده از این روش، از وقوع خرابی فاجعه آمیز در سازه‌ها جلوگیری نمود.

بعد از تشخیص لحظه شروع خرابی، برای بررسی روند خرابی سعی شد ارتباط بین فرکانس‌های غالب امواج و مکانیزم‌های شکست پیدا شود. در نمونه‌های ترمیم نشده با تحلیل فرکانسی، فرکانس‌های در محدوده 450 کیلوهرتز به‌عنوان فرکانس غالب بدست آورده شد. این فرکانس می‌تواند مربوط به فرکانس‌های پلاستیک شدن اطراف نوک ترک و رشد ترک باشد. نتایج حاصله با نتایج ایجاد ترک خستگی مطابقت دارد.

در نمونه‌های ترمیم شده با توجه به اشتراک داشتن محدوده فرکانسی مکانیزم‌های شکست، نمودار نیرو-جابجایی به سه ناحیه تقسیم گردید. منطقه اول قبل از ناحیه غیرخطی شدن نمودار، منطقه دوم از ناحیه غیرخطی شدن نمودار تا قبل از شکست و منطقه سوم ناحیه شکست تعیین شد. در منطقه دو به خاطر اتصال وصله، دامنه‌های فرکانس‌های مربوط به پلاستیک شدن در اطراف نوک ترک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم شده است. بجای آن دامنه‌های محدوده‌ی فرکانسی 100 تا 150 کیلوهرتز افزایش پیدا کرده است. در منطقه سه به خاطر وقوع انواع مکانیزم‌های شکست، مجموع دامنه در دسته‌های فرکانسی مختلف زیاد می‌باشد. با تحلیل نتایج تحلیل فرکانسی به نظر می‌رسد فرکانس‌های غالب برای پلاستیک شدن آلومینیوم 440 تا 480 کیلوهرتز بوده و فرکانس‌های غالب برای مکانیزم جدایش در محدوده‌ی 100 تا 150 و 200 تا 220 کیلوهرتز است.

با بررسی مقطع شکست نمونه‌ها طول ترک اولیه بدست آمده با روش آزمون مایع نافذ صحنه سنجی شد. همچنین با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از سطوح وصله و نمونه، مکانیزم‌های شکست واقع شده ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده گردید جدایش وارد لایه کامپوزیت وصله نشده و در برخی نقاط رزین از وصله جدا شده است. همچنین مکانیزم شکست جدایش الیاف از رزین مشاهده گردید.

## 6- مراجع

- [1] G. Payganeh, F. A. Ghasemi, A. P. Anaraki, A. F. Rahmatabadi, The cracked aluminum plates repaired with FML composite patches, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 12, No. 21, pp. 2259-2265, 2012.
- [2] J. Schutte, S. Mall, Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, No. 3, pp. 305-323, 1999.
- [3] H. Hosseini-Toudeshky, M. Sadighi, A. Vojdani, Effects of curing thermal residual stresses on fatigue crack propagation of aluminum plates repaired by FML patches, *Composite Structures*, Vol. 100, No.1, pp. 154-162, 2013.
- [4] F. Tonolini, A. Sala, G. Villa, General review of developments in acoustic emission methods, *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 28, No. 1, pp. 179-201, 1987.
- [5] V. Arumugam, C. S. Kumar, C. Santulli, F. Sarasini, A. J. Stanley, A global method for the identification of failure modes in fiberglass using acoustic emission, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 39, No. 5, pp. 1, 2011.
- [6] A. R. Oskouei, M. Ahmadi, Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites, *Journal of composite materials*, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, 2010.
- [7] M. M. M. Nasab, M. Saedifar, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Investigation of delamination in laminated composites under quasi-static and fatigue loading conditions by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 85-92, 2015. (in Persian فارسی)
- [8] M. A. Najafabadi, M. Sedighi, M. Salehi, H. H. 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 فارسی)

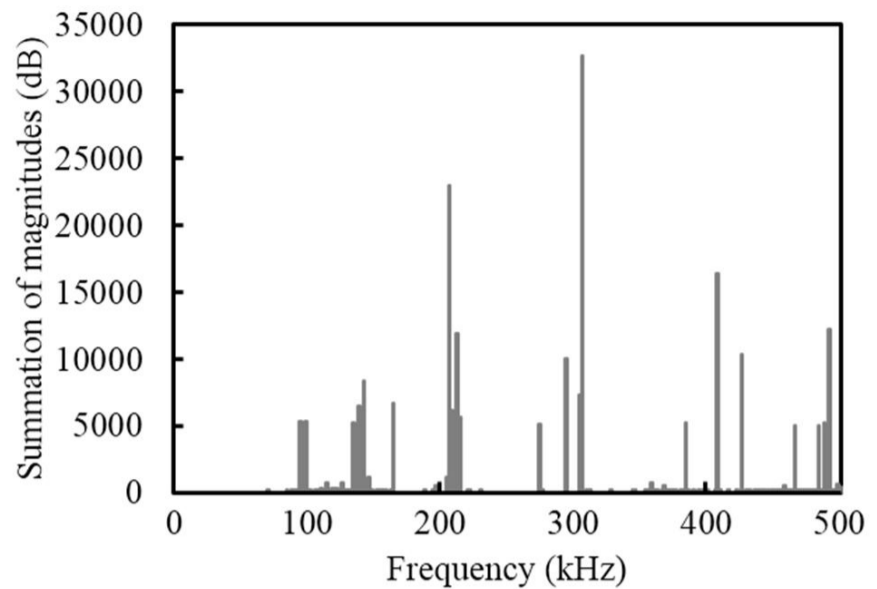


Fig. 21 Frequency distribution for repaired specimen in region 3

شکل 21 توزیع فرکانسی برای نمونه ترک‌دار ترمیم شده در منطقه 3



Fig. 22 SEM debonded surface image - fiber and resin breakage

شکل 22 تصویر سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی - شکست الیاف و رزین

فرایند اچ، آنودایز در محلول اسید کرومیک گردیده است.

ایجاد ترک اولیه با اعمال بار خستگی صورت گرفت. در حین فرایند ایجاد ترک، داده‌برداری آکوستیک امیشن صورت پذیرفت. لحظه ایجاد ترک خستگی با استفاده از مقدار جابجایی بیشینه فک و مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن تشخیص داده شد. طول ترک خستگی با استفاده از روش مایع نافذ برای تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب تحلیل فرکانسی امواج صورت گرفته است. با تحلیل فرکانسی امواج آکوستیک امیشن، فرکانس‌های غالب در این فرایند در محدوده 440 تا 480 کیلوهرتز بدست آمد. به دلیل پلاستیک شدن آلومینیوم و رشد ترک در این فرایند محدوده فرکانسی بدست آمده را می‌توان مرتبط با این دو پدیده دانست.

یکی از نتایج این تحقیق، بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های ترمیم‌شده و نشده می‌باشد. همچنین تأثیر زاویه ترک بر این رفتار بررسی شده است. با بررسی نتایج تجربی نمونه‌های ترک‌دار مشاهده گردید، شیب افزایشی قسمت اولیه نمودار نیرو-جابجایی نمونه ترمیم شده به خاطر اتصال وصله و افزایش استحکام بیشتر شده است. همچنین در نمونه ترمیم شده، شیب کاهش قسمت انتهایی نمودار نیرو-جابجایی بیشتر شده است. علت این رفتار، جدایش ناگهانی وصله و اعمال نیروی بیشتر به ترک نسبت به نمونه ترمیم



- notched aluminum plate repaired with a fiber composite patch, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 12, pp. 2211-2220, 2012.
- [11] ASTM E647-15, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [9] A. C. Okafor, N. Singh, N. Singh, B. N. Oguejiofor, Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural network, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, doi: 10.1177/0892705715573649, 2015.
- [10] J.-U. Gu, H.-S. Yoon, N.-S. Choi, Acoustic emission characterization of a