مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 406-412

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی مکانیزم‌های خرابی در ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار ترمیم‌شده با وصله‌های کامپوزیتی به روش آکوستیک امیشن

میرمحمد موسوی نسب[1]، حمید فتوحی[2]، رضا محمدی[1]، مهدی احمدی نجف‌آبادی[3*] حسین حسینی‌تودشکی[4]

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 خرداد 1396
پذیرش: 22 تیر 1396
ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:
مکانیزم‌های خرابی
آلومینیوم 2024-T3
وصله‌ی کامپوزیتی
آکوستیک امیشن

چکیده

یک سازه در طول دوره عمر خود تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی زیادی قرار می‌گیرد، که باعث صدمه و یا تضعیف سازه می‌شوند. امروزه به منظور ترمیم نواحی صدمه دیده از وصله‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. چند لایه‌های کامپوزیتی دارای خصوصیات منحصر بفردی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا و مقاوم در برابر خوردگی می‌باشند. در سازه‌های ترمیم شده با چند لایه‌های کامپوزیتی در حین بارگذاری انواع خرابی‌های مختلف بوجود می‌آید، که عبارتند از: شکستگی الیاف، شکستگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست سازه فلزی. پژوهش حاضر به بررسی مکانیزم‌های خرابی ورق آلومینیومی 2024-T3 ترک‌دار ترمیم شده با کامپوزیت شیشه/ اپوکسی به روش آکوستیک امیشن می‌پردازد. بدین منظور نمونه‌های آزمایش با لایه‌چینی‌های مختلف ساخته شده و تحت بارگذاری شبه استاتیکی کششی قرار گرفتند و همزمان سنسورهای آکوستیک امیشن به منظور داده برداری بر روی نمونه‌ها نصب شدند. ابتدا داده‌های مکانیکی نمونه‌ها حاصل از تست شبه استاتیکی در حالت‌های مختلف براساس تعداد لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیتی تحلیل شد. سپس داده‌های آکوستیکی با داده‌های مکانیکی مقایسه شد. همچنین از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطوح شکست نمونه‌ها برای صحه‌گذاری استفاده شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که وصله 4 لایه نسبت به وصله 8 لایه و 12 لایه استحکام کششی و کرنش شکست بیشتری دارد. همچنین تطابق قابل قبول بین نتایج حاصل از داده‌های مکانیکی و آکوستیکی است. همچنین عملکرد مطلوب روش آکوستیک امیشن را در تعیین لحظه خرابی در نمونه ترمیم‌شده با وصله کامپوزیتی نیز نشان می‌دهد.

Investigation of failure mechanisms of notched aluminum plates repaired with composite patches using acoustic emission method

Mir Mohammad Mousavi Nasab[1], Hamid Fotouhi[2], Reza Mohammadi [1], Mehdi Ahmadi Najafabadi[1*], Hossein Hosseini Toudeshky[3]

1- Department of Manufacturing Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran
2- Department of Composite Materials Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran
3- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1587- 4413, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 June 2017
Accepted 13 July 2017
Available Online 25 August 2017

Keywords:
Failure mechanisms
Composite patch
Aluminum plate
Acoustic emission

ABSTRACT

Structures during their lifetime experience plenty of static and dynamic loads. These loads cause failure or undermine the structures. So, reinforcement or repairing failed parts is one way to repair out of service structures. Composite materials have been used to reinforce structures. These materials enjoy advantages such as the proportion of their strength to their weight. As these structures become exposed to some loads, a number of failures are introduced. This research investigates the failure mechanisms of a notched 2024-T3 aluminum plate repaired with a composite patch using visual and acoustic emission methods. After constructing the specimens, tensile test has been conducted, and acoustic emission sensors have been stocked on the surface of the plate, so that they can record acoustic data. At the first stage, mechanical data obtained from the specimens in different states based on the number of layering have been analyzed. At the second stage, acoustic data obtained from recording of acoustic emission signals have been compared with the mechanical data. Also, the images obtained from SEM were used for investigation of damages. According to this research, a reasonable correspondence between the results obtained from mechanical and acoustic data and the desired functionality of the acoustic emission method in determining failure mechanism in those specimens that are repaired with composite patches is identified.

Please cite this article using: / برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. M. Mousavi Nasab, H. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of failure mechanisms of notched aluminum plates repaired with composite patches using acoustic emission method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 406-412, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

یک هواپیما در طول دوره عمر خود تحت بارگذاری‌های استاتیکی و آیرودینامیکی زیادی قرار می گیرند. این بارگذاری‌ها موجب صدمه و یا تضعیف سازه هواپیما می‌شوند. بنابراین ترمیم قسمت صدمه دیده یکی از راه های بازگرداندن قدرت و کارایی سازه است. صنایع هوافضای کشورهای مختلف در سال‌های اخیر علاقه‌ی قابل توجهی را به استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان تقویت کننده سازه‌های هوایی حاوی ترک جهت افزایش عمر نشان داده‌اند. این کامپوزیت‌ها که به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شوند، تحت عنوان وصله[1] کامپوزیتی شناخته می‌شوند. کامپوزیت‌های چند لایه‌ای تقویت شده با الیاف به دلیل استحکام بالا، سفتی زیاد و نسبت استحکام به وزن بالایی که دارند امروزه در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند[1-3]. وقتی این وصله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری استاتیکی قرار می‌گیرند، امکان ایجاد انواع مودهای خرابی از جمله، ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس ، شکست الیاف، جدایش بین ماده فلزی و کامپوزیت و رشد ترک در ماده فلزی وجود دارد. با تعیین نوع خرابی‌های ایجاد شده در سازه و دسته بندی آن‌ها توسط سیستم‌های پایش بلادرنگ، می‌توان چگونگی و نحوه تعمیر یک سازه را طوری تعیین کرد که سازه در اثر نیروهای وارده دچار آسیب، خرابی و در نهایت شکست نشود [5,4]. در بین روش‌های مختلف پایش خرابی، آکوستیک امیشن به دلیل حساسیت و قدرت تشخیص بالا و پایش بلادرنگ قطعه، قابلیت تشخیص خرابی‌های به وجود آمده در سازه درحین بارگذاری را دارد [6-8]. انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را آکوستیک امیشن گویند [10,9].

اولین تحقیقات در زمینه ترمیم با وصله‌های کامپوزیتی توسط آقای بیکر [11-13]، در آزمایشگاه تحقیقاتی هوایی- دریایی استرالیا انجام شده است. او رشد ترک در صفحات آلومینیومی دارای ترک گوشه‌ای را بررسی کرد. او در این مطالعات پی برد که وقتی ترک در زیر وصله‌ی ترمیم‌کننده قرار دارد دارای نرخ رشد ثابت است. دنی [14] تلاش نمود تاثیر اندازه و موقعیت ناحیه‌ی جدا شده را بر روی کاهش عمر صفحه ترمیم شده به‌دست آورد. او آزمایش خود را بر روی ورق آلومینیومی نازک با ضخامت 1mm که بوسیله وصله‌هایی از جنس برن/ اپوکسی[2] ترمیم شده بودند، انجام داد. رز [15] روش تحلیلی برای حل مساله ترمیم ارائه نمود. او در این تئوری از آنالیز تنش برشی برای محاسبه طول موثر انتقال نیرو توسط لایه چسب استفاده نمود. در این تئوری ترک به اندازه‌ای رشد می‌کند که دیگر نتواند نیروی برشی را منتقل نماید. با استفاده از تئوری تغییر مکان تیر نازک و همچنین تعادل تیر، روابطی برای بیان تغییر مکان قسمت ترمیم‌شده و ترمیم‌نشده در راستای ضخامت صفحه استخراج نمود. با بیان این روابط به صورت ترم‌هایی از ممان خمشی، مقدار ممان کل در نوک ترک بدست آمد. سپس با انتگرال‌گیری از مقدار ممان در جهت ضخامت ناحیه ترمیم‌شده، نرخ انرژی کرنشی آزاد شده کل و در نتیجه ضریب شدت تنش را بدست آورد. حسینی تودشکی و همکاران [16-19]، نیز تاثیر لایه‌چینی و ضخامت وصله بر روی پارامترهای شکست و مسیر رشد ترک را تحت بارگذاری خستگی مورد بررسی قرار دادند. با انجام تست‌هایی که توسط محققان بر روی نمونه‌های حاوی ترک ترمیم‌شده (به صورت نامتقارن) انجام گرفت، مشاهده شد که لبه نوک ترک به صورت منحنی پیشرفت می‌کند. در نتیجه سعی شد تا با مدل‌سازی جبهه ترک (در امتداد ضخامت) به شکل مایل، شرایط جبهه ترک به حالت واقعی نزدیک‌تر شود [20]. با مقایسه نتایج تجربی و نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی که با فرض یکنواخت و مایل بودن لبه ترک انجام شد، مشخص شد که شکل لبه نوک ترک بر روی عمر و پارامترهای شکست در قطعات حاوی ترک تاثیرگذار می‌باشد. بر همین اساس مطالعاتی که در ادامه تحقیقات انجام گرفته صورت پذیرفت، بر روی مدل‌سازی واقعی جبهه ترک (در امتداد ضخامت) متمرکز گردید [21]. اکافر و همکاران [22] از آکوستیک امیشن به‌عنوان روش پایش همزمان، جهت شناسایی رشد ترک در آلومینیوم 2024-T6 که توسط وصله کامپوزیتی برن/ اپوکسی تعمیر شده است، استفاده کردند که برای پیش‌بینی رشد ترک از روش شبکه عصبی نیز استفاده شده بود. وصله کامپوزیتی استفاده شده توسط نرم‌افزار کراس[3] طراحی شده و وصله به صورت یک طرفه به نمونه متصل شده است. نتیجه گرفته شده است که با استفاده از روش‌های فیلترینگ می‌توان سیگنال‌های رشد ترک را از نویزها مجزا نمود.

در این پژوهش، ابتدا ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار با وصله‌ی کامپوزیتی از جنس شیشه/ اپوکسی ترمیم شدند. صفحات از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 1.8mm می‌باشند. یک ترک مرکزی با زاویه صفر درجه (عمود بر راستای کشش) بر روی صفحات ایجاد شد. به منظور ترمیم از سه نوع وصله‌ی کامپوزیتی متفاوت با تعداد لایه‌چینی 4، 8 و 12 استفاده شد. در ابتدا داده‌های مکانیکی مربوط به تست کشش نمونه‌ها در حالت‌های مختلف وصله‌گذاری تحلیل شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت وصله و تعداد لایه‌چینی‌ها، استحکام نهایی نمونه کاهش یافته و خرابی دیرتر شروع شده ولی نرخ رشد آن بیشتر است. در ادامه با استفاده از روش آکوستیک‌امیشن مکانیزم‌های مختلف خرابی در حین کشش نمونه‌ها تشخیص داده شد. در روش آکوستیک امیشن از تعداد ضرب آهنگ‌های سیگنال‌ها به منظور تشخیص نوع خرابی و زمان فعال شدن آن استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که مکانیزم غالب خرابی در حالت ترمیم با وصله 4 لایه، شکست الیاف بوده و در ترمیم با وصله 8 و 12 لایه، جدایش وصله از ورق است. در نهایت به منظور صحه گذاری کیفی بر نتایج، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطوح شکست نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وصله 4 لایه بیشترین استحکام و بیشترین کرنش شکست را دارد. همچنین می‌توان از روش آکوستیک امیشن به عنوان یک ابزار قدرتمند در تشخیص خرابی در سازه‌های ترمیم شده با وصله کامپوزیتی استفاده نمود.

2- روش تحقیق

2-1- آماده سازی سطح و نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا ابعاد نمونه‌ها با توجه به استاندارد ASTM-E647 [23] و براساس اندازه طول ترک، ابعاد وصله و شرایط اعمال نیرو تعیین شدند. سپس با مشخص شدن ابعاد، ورق‌های آلومینیومی از آلیاژ 2024-T3 با ضخامت 1.8 mm طوری برش داده شدند که طول نمونه که همان جهت اعمال نیرو است در جهت عمود بر نورد باشد. چون میزان استحکام ورق آلومینیوم در جهت عمود بر نورد نسبت به حالت درجهت نورد کمتر است، بنابراین اثرگذاری وصله در میزان استحکام نمونه‌های ترمیم شده بیشتر مشخص می‌شود. برای ایجاد ترک اولیه ابتدا یک سوراخ در وسط نمونه به قطر 1 mm توسط دستگاه سوپر دریل زده شد. سپس با استفاده از دستگاه

[1] Patch
[2] Boron/Epoxy
[3] CRAS

وایرکات یک شیار به طول 8 mm و به عرض 0.4 mm با زاویه 0 درجه در عمق نمونه ایجاد شد. شیارهای ایجاد شده توسط دستگاه وایرکات در دو انتهای شیار به صورت U شکل هستند. بنابراین برای این‌که شیار ایجاد شده به شکل ترک درآید، پیش ترکی در دو انتهای شیار به طول 1mm توسط دستگاه خستگی ایجاد شد تا طول نهایی ترک 10 mm شود. برای ایجاد پیش ترک در نمونه‌ها نیروی متناوب 1.3-13 KN با فرکانس 5Hz و تعداد 1500 سیکل اعمال شد.

از مراحل حساس و مهم در ترمیم ورق آلومینیومی با وصله‌ی کامپوزیتی، آماده‌سازی سطح ورق آلومینیومی است، به طوری که اگر به درستی انجام نشود، ترمیم بی‌ارزش است. اکثر خرابی‌های ترمیم در محل تماس چسب و ورق اتفاق می‌افتد. لذا تکنیک آماده‌سازی سطح در یک ترمیم موفق نقش موثری دارد. در این پژوهش به منظور آماده سازی سطح آلومینیوم از روش اچ با اسید سولفوریک[1] استفاده شد.

پس از آماده‌سازی سطح ورق آلومینیومی، وصله‌های کامپوزیتی، بوسیله چسب بر روی سطح ورق آلومینیومی از یک طرف چسبانده شدند. به منظور ترمیم از سه نوع وصله کامپوزیتی متفاوت با تعداد لایه‌چینی 4، 8 و 12 استفاده شد. جدول 1 مشخصات نمونه‌ها و تعداد لایه‌چینی را نشان می‌دهد. سپس تست کشش روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. در حین تست کشش، سنسورهای آکوستیک امیشن نیز روی سطح ورق برای ثبت داده‌های آکوستیکی چسبانده شدند. "شکل 1" ابعاد نمونه آلومینیومی و وصله کامپوزیتی را به همراه محل‌های نصب سنسورها نشان می‌دهد.

2-2- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه تست کشش مدل هیوا[2]، با ظرفیت 5 تن و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین 0.1-500 mm/min استفاده شد. به

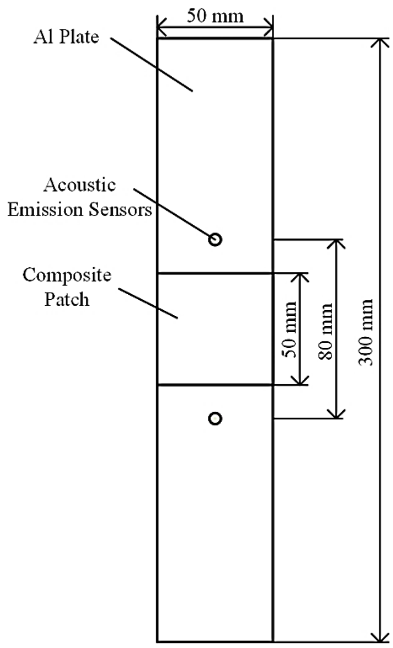


Fig. 1 Dimensions of aluminum plate and composite patch with location of acoustic emission sensors

شکل 1 ابعاد نمونه آلومینیومی و وصله کامپوزیتی به همراه محل نصب سنسورها

[1] P2 etch
[2] HIWA

جدول 1 مشخصات و لایه‌چینی نمونه‌های آزمایش

Table 1 Characteristics of specimens with their stacking sequences

نمونه	تعداد لایه‌چینی
A	ورق آلومینیومی سالم
B	ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم نشده
C	ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله 4 لایه
D	ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله 8 لایه
E	ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله 12 لایه

منظور ایجاد پیش ترک خستگی در نمونه‌ها، از دستگاه دارتک[3] با ظرفیت 5 تن و با قابلیت بارگذاری در محدوده فرکانسی 1-100Hz استفاده شد. همچنین برای ثبت داده‌های نشرآوایی از نرم‌افزار آی ای وین[4] و سیستم پی‌سی‌آی-2[5]، با نرخ داده برداری 1 Ms/s استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال، با پهنای باند وسیع به نام پیکو[6]، محصول کمپانی پک[7]، مدل آر50 دی[8] استفاده شد. فرکانس تشدید سنسور 513.28 kHz و محدوده بهینه کاری آن 100-750 kHz است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور به وسیله پیش تقویت کننده AST–2/4/6 باضریب تقویت 40 dB تقویت شدند. آستانه پایین دریافت سیگنال‌ها 35 dB درنظر گرفته شد. برای بهبود عبوردهی سیگنال‌های نشر آوایی بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاء شده استفاده شد. برای کالیبره کردن سنسورهای نشرآوایی، مطابق استاندارد ASTM E976-10 [24] از روش شکست نوک مداد استفاده شد.

2-3- روش انجام آزمایش

نمونه‌های آزمایش توسط دستگاه تست کشش، تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. کلیه آزمایش‌ها در دمای 24°C و با سرعت پیشروی ثابت 2mm/min انجام شدند. لودسل[9] مورد استفاده برای انجام این آزمایش‌ها دارای ظرفیت 5 تن می‌باشد. با انجام تست کشش، نمودار نیرو – جابجایی هر نمونه به دست آمد. به منظور ثبت سیگنال‌های آکوستیک امیشن در حین آزمایش، دو سنسور به فاصله 40 mm از مرکز نمونه که همان مکان ترک است، قرار داده شد. هدف از این نوع چیدمان، ثبت کلیه سیگنال‌های آکوستیک امیشن مربوط به ناحیه خرابی و مکانیزم‌های خرابی می‌باشد. استفاده از دو سنسور آکوستیک امیشن، این اجازه را به کاربر می‌دهد که سیگنال‌های آکوستیک امیشن تولید شده در خارج از ناحیه خرابی، همچون سیگنال‌های مربوط به اصطکاک بین اجزای ماشین‌آلات آزمایش و سایر نویزهای ایجاد شده در حین آزمایش را به سادگی حذف نماید. محدوده فرکانسی 20-3000 kHz و نرخ داده برداری[10] 1Ms در نظر گرفته شد. "شکل 2" تصویری از آزمون استاتیکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

3- بحث و نتایج

3-1- بررسی استحکام مکانیکی

"شکل 3" نمودار نیرو–جابه‌جایی ورق آلومینیومی را در حالت سالم، ترمیم

[3] Dartec
[4] AEWin
[5] PCI-2
[6] PICO
[7] PAC
[8] R50D
[9] Loadcell
[10] Sample Rate

Fig. 2 Tensile test of reinforced specimen with composite patch

شکل 2 آزمون کشش نمونه‌ی ترمیم شده با وصله‌ی کامپوزیتی

نشده و ترمیم شده با وصله‌های 4، 8 و 12 لایه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد لایه‌چینی و به دنبال آن افزایش ضخامت وصله، استحکام نمونه کاهش می‌یابد. وجود ممان خمشی در قطعه ناشی از جابجایی تار خنثی با افزایش تعداد لایه‌چینی، سبب شده است که مکانیزم‌های خرابی با نرخ رشد بیشتری اتفاق افتاده و شکست نهایی زودتر انجام شود. یعنی با افزایش تعداد لایه‌چینی، شکست نهایی در نیروهای کمتری اتفاق افتاده و بنابراین استحکام نمونه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد لایه‌چینی وصله‌ها، کاهش کرنش شکست مشاهده می‌شود. بنابراین وصله 4 لایه نسبت به وصله‌های 8 و 12 لایه، برای تعمیر ورق‌های آلومینیومی با ضخامت 1.8mm مناسب می‌باشند. در جدول 2 مقادیر ماکزیمم نیرو برای هر یک از نمونه‌ها نشان داده شده است.

3-2- ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله کامپوزیتی 4 لایه (نمونه C)

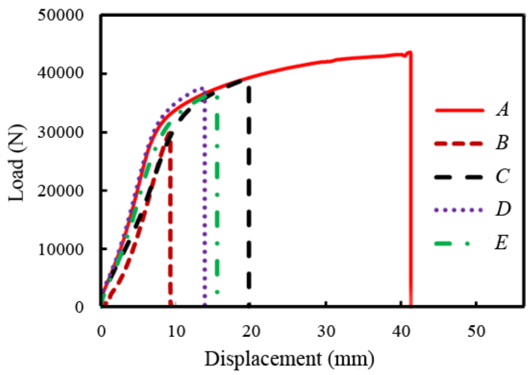


Fig. 3 Load – displacement curves of specimens

شکل 3 نمودار نیرو- جابه‌جایی ورق آلومینیومی نمونه‌های آزمایش

جدول 2 ماکزیمم نیروی شکست برای نمونه‌های مختلف

Table 2 Maximum failure load for specimens

ماکزیمم نیروی شکست (N)	نمونه
43630	A
29900	B
39020	C
37700	D
36800	E

در حالت ترمیم با وصله‌ی 4 لایه ابتدا خرابی در حوزه ترک با شکست ماتریس و به دنبال آن شکست الیاف شروع شده و از آن‌جایی که وصله کامپوزیتی 4 لایه مقاومت چندانی در برابر نیروهای زیاد ندارد، بنابراین این خرابی در راستای ترک موجود در صفحه آلومینیوم در داخل کامپوزیت ادامه پیدا کرده و در راستای ترک، شکست الیاف خواهیم داشت، قبل از این‌که جدایش بین وصله کامپوزیتی و ورق آلومینیومی سبب خرابی نمونه شود. در این نمونه به علت کم بودن ضخامت وصله، ممان خمشی ناشی از جابجایی تار خنثی و تمرکز تنش ناشی از شیب زیاد در دو انتهای وصله کم بوده و بنابراین جدایش وصله از ورق مکانیزم خرابی نمونه به شمار نمی‌آید. مقدار نیروی ماکزیمم برای شکست نمونه ترمیم شده با وصله 4 لایه 39000 N می‌باشد. همچنین کرنش شکست نمونه C بیشتر از نمونه‌های دیگر است. "شکل 4" تصویری از خرابی مربوط به شکست الیاف‌های وصله کامپوزیتی را در راستای ترک موجود در ورق آلومینیومی نشان می‌دهد.

3-3- ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله کامپوزیتی 8 لایه (نمونه D)

در نمونه ترمیم شده با وصله‌ی 8 لایه همانند 4 لایه ابتدا خرابی در حوزه نوک ترک با شکست ماتریس و به دنبال آن شکست الیاف شروع می‌شود، ولی به علت استحکام زیاد وصله‌ی 8 لایه نسبت به 4 لایه دیگر شکست الیاف

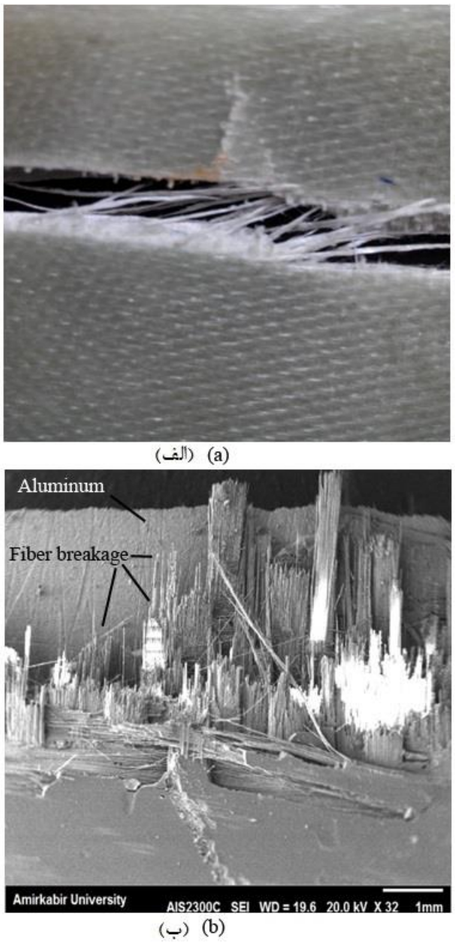
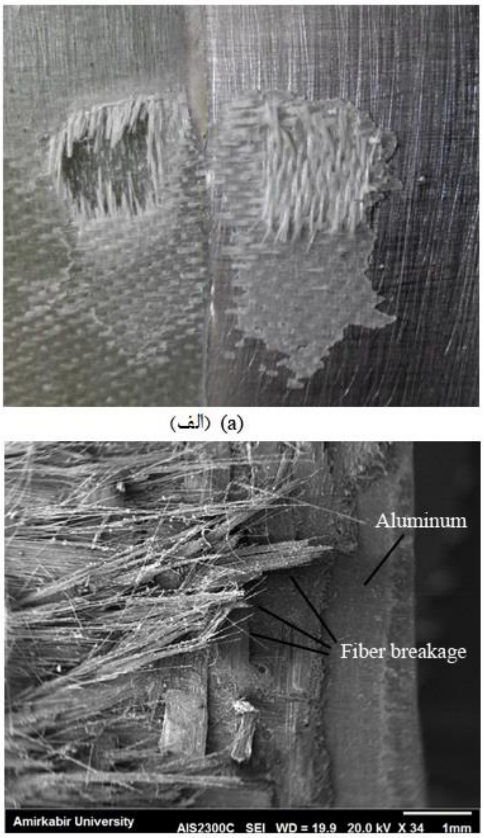


Fig. 4 Fiber breakage of composite patch for C specimen, a) Digital camera, b) SEM

شکل 4 شکستگی الیاف وصله کامپوزیتی در نمونه‌ی C، الف) دوربین دیجیتال، ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی

نخواهیم داشت، بلکه جدایش بین وصله‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیومی سبب خرابی و شکست نمونه می‌شود. ماکزیمم نیروی قابل تحمل در این حالت 37700 N می‌باشد که نسبت به وصله 4 لایه کمتر است.

در ابتدای آزمایش که مقدار نیروی بارگذاری کم است، خرابی ابتدا در اطراف ترک ایجاد شده، با ترک و شکست در ماتریس شروع می‌شود. با افزایش نیروی بارگذاری این خرابی به لایه‌های داخل کامپوزیت 8 لایه نفوذ کرده و سبب شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس در لایه‌های اولیه وصله‌ی کامپوزیتی در حوزه ترک می‌شود. با افزایش نیروی بارگذاری، وجود ممان خمشی ناشی از افزایش ضخامت وصله از 4 به 8 لایه از یک طرف و همچنین وجود تمرکز تنش به علت وجود شیب زیاد در دو انتهای وصله 8 لایه‌ای که به ورق آلومینیومی چسبیده شده است، از طرف دیگر، سبب می‌شود که جدایش بین وصله‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیومی در لبه‌ها و اطراف وصله اتفاق بیافتد. با جدایش بین وصله و ورق، تحمل وصله کاهش یافته و دیگر خرابی ناشی از شکست الیاف در اطراف ترک نخواهیم داشت. بنابراین در نمونه ترمیم شده با وصله 8 لایه، ابتدا خرابی در حوزه ترک اولیه با شکست ماتریس و به دنبال آن شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس در لایه‌های اولیه وصله شروع شده و با افزایش نیروی بارگذاری به علت وجود ممان خمشی ناشی از افزایش ضخامت وصله، جدایش بین وصله‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیومی در لبه و اطراف وصله ایجاد شده و سبب شکست نمونه می‌شود. بنابراین فصل مشترک خرابی در اطراف وصله، بین وصله و ورق بوده و در مرکز وصله، بین الیاف و ماتریس می‌باشد. "شکل 5" سطح شکست این



(الف) (a)

(ب) (b)

Fig. 5 Failure mechanisms of D specimen, a) Digital camera, b) SEM

شکل 5 مکانیزم‌های خرابی در نمونه D، الف) دوربین دیجیتال، ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی

نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 5" نشان داده شده است قسمتی از وصله بر روی ورق آلومینیومی چسبیده شده و بقیه به صورت کامل از سطح آلومینیوم جدا شده است. در این نمونه شکستگی الیاف، شکستگی ماتریس و جدایش وصله از ورق را داریم.

3-4- ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله کامپوزیتی 12 لایه (نمونه E)

مکانیزم خرابی ایجاد شده در حالت ترمیم با وصله کامپوزیتی 12 لایه شبیه ترمیم با وصله 8 لایه است با این تفاوت که مقدار شکست الیاف کمتر بوده و جدایش بین وصله و ورق زودتر شروع می‌شود. در نمونه ترمیم شده با وصله 12 لایه نیز ابتدا خرابی در حوزه ترک با شکست ماتریس و به دنبال آن شکست الیاف هر چند به مقدار کم شروع می‌شود، ولی به علت استحکام زیاد وصله 12 لایه دیگر شکست الیاف نخواهیم داشت، بلکه جدایش بین وصله کامپوزیتی و ورق آلومینیومی سبب خرابی و شکست نمونه می‌شود.

در ابتدای آزمایش که مقدار نیروی بارگذاری کم است، خرابی ابتدا در اطراف ترک ایجاد شده با ترک و شکست در ماتریس شروع می‌شود. با افزایش نیروی بارگذاری این خرابی به لایه‌های داخلی کامپوزیت 12 لایه نفوذ کرده و سبب شکست الیاف به مقدار خیلی کم می‌شود. اما خرابی در حدی نیست که سبب جدایش یک لایه کامپوزیت از وصله 12 لایه شود. به علت ضخامت زیاد وصله و به دنبال آن ممان خمشی زیاد و همچنین وجود تمرکز تنش زیاد به علت وجود شیب زیاد در دو انتهای وصله 12 لایه‌ای که به ورق آلومینیومی چسبیده شده است، جدایش بین وصله کامپوزیتی و ورق آلومینیومی در لبه‌ها و اطراف وصله زودتر و با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. با جدایش بین وصله و ورق، تحمل وصله کاهش یافته و دیگر خرابی در اطراف ترک نخواهیم داشت. بنابراین در نمونه ترمیم شده با وصله 12 لایه، ابتدا خرابی در حوزه ترک اولیه با شکست ماتریس و به دنبال آن جدایش ماتریس از الیاف و چسبیدن یک لایه از ماتریس به ورق شروع شده و با افزایش نیروی بارگذاری به علت وجود ممان خمشی ناشی از افزایش ضخامت وصله، جدایش بین وصله کامپوزیتی و ورق آلومینیومی در لبه و اطراف وصله ایجاد شده و سبب شکست نمونه می‌شود.

ماکزیمم نیروی قابل تحمل توسط این وصله 36800 N می‌باشد. در "شکل 6" نحوه جدا شدن وصله از آلومینیوم را نشان داده شده است. در این نمونه شکستگی الیاف خیلی کم بوده و مکانیزم‌های خرابی از جمله جدایش ماتریس از الیاف و جدایش بین وصله و ورق قابل مشاهده است.

3-5- روش آکوستیک امیشن

در این بخش نمودار نیرو-جابه‌جایی بدست آمده از داده‌های مکانیکی نمونه با داده‌های آکوستیکی مقایسه شده و روند ایجاد مکانیزم‌های خرابی از روی نمودار تشخیص داده می‌شود. در این بخش از بین نمودارهای آکوستیکی، از نمودار کانت[1]-جابه‌جایی به خاطر نشان دادن بهتر روند ایجاد مکانیزم خرابی در طول آزمایش استفاده شده است. نمودار نرخ انرژی آکوستیکی- جابه‌جایی نیز دقیقا رفتاری شبیه نمودار کانت-جابه‌جایی دارد. چون هدف از این بخش نشان دادن روند ایجاد خرابی در طول آزمایش نمونه است، از نمودار کانت-جابه‌جایی استفاده شده است.

"شکل 7" نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی مربوط به ورق آلومینیومی ترمیم نشده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار کانت- جابه‌جایی

[1] Count

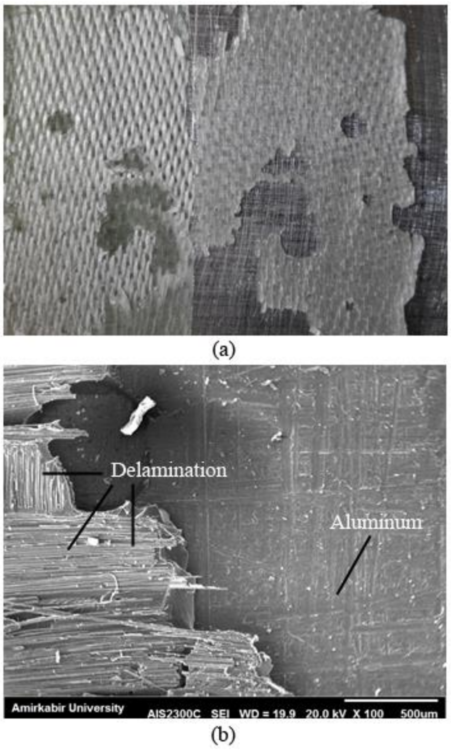


Fig. 6 Failure mechanisms of E specimen, a) Digital camera, b) SEM

شکل 6 مکانیزم‌های خرابی در نمونه E، الف) دوربین دیجیتال، ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی

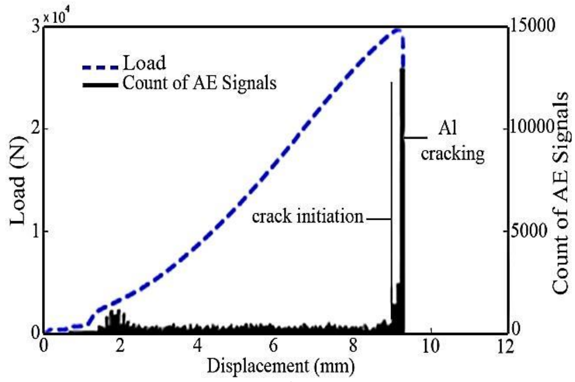


Fig. 7 Load- count- displacement of B specimen

شکل 7 نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی ورق آلومینیومی ضخیم ترمیم نشده

مشخص است در انتهای تست کشش نمونه به علت شروع و رشد ترک در ورق آلومینیومی، مقدار کانت یا تعداد ضرب آهنگ‌های سیگنال‌ها به طور ناگهانی افزایش یافته است. افزایش مقدار کانت و انرژی در ابتدای آزمایش نیز مربوط به ترک خوردگی و شکست اکسیدهای تشکیل شده در سطح آلومینیوم می‌باشد.

"شکل 8" نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی را برای نمونه C نشان می‌دهد. همان‌طور که بحث شد در حالت ترمیم ورق آلومینومی ضخیم با وصله 4 لایه، ابتدا ترک‌خوردگی در ماتریس ایجاد شده و به علت استحکام کم وصله 4 لایه در برابر نیروی وارده، شکست الیاف در حوزه ترک اولیه شروع شده و به تدریج در راستای ترک ادامه یافته تا این‌که وصله به طور کامل خراب شده و به دو قسمت تقسیم می‌شود. با توجه به "شکل 8" در ابتدای آزمایش به علت ترک‌خوردگی و شکست اکسیدهای تشکیل شده در سطح آلومینیوم، افزایش کانت در نمودار کانت-جابه‌جایی خواهیم داشت. با ادامه بارگذاری و افزایش نیرو، شکست الیاف آغاز شده که با افزایش کانت در نمودار کانت-جابه‌جایی همراه است. در انتهای آزمایش نیز به دلیل رشد ترک در آلومینیوم افزایش ناگهانی تعداد کانت‌ها را خواهیم داشت.

"شکل 9" نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی را برای نمونه D نشان می‌دهد. همان‌طور که بحث شد در حالت ترمیم ورق آلومینیومی ضخیم با وصله 8 لایه، ابتدا خرابی در حوزه نوک ترک با شکست ماتریس و به دنبال آن شکست الیاف شروع می‌شود، ولی به علت استحکام زیاد وصله‌ی 8 لایه نسبت به 4 لایه دیگر شکست الیاف نخواهیم داشت، بلکه جدایش بین وصله‌ی کامپوزیتی و ورق آلومینیومی سبب خرابی و شکست نمونه می‌شود. با توجه به "شکل 9" در ابتدای آزمایش به علت ترک‌خوردگی و شکست اکسیدهای تشکیل شده در سطح آلومینیوم، افزایش کانت در نمودار کانت-جابه‌جایی خواهیم داشت. با ادامه بارگذاری و افزایش نیرو، شکست الیاف آغاز شده که با افزایش کانت در نمودار کانت-جابه‌جایی همراه است. جدایش وصله از ورق نیز به صورت افزایش ناگهانی کانت مشاهده می‌شود. در انتهای آزمایش نیز به دلیل رشد ترک در آلومینیوم افزایش ناگهانی تعداد کانت‌ها را خواهیم داشت.

"شکل 10" نیز نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی را برای نمونه E نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد مکانیزم خرابی ایجاد شده در حالت ترمیم با وصله کامپوزیتی 12 لایه شبیه ترمیم با وصله 8 لایه است با این تفاوت که مقدار شکست الیاف کمتر بوده و جدایش بین وصله و ورق زودتر شروع

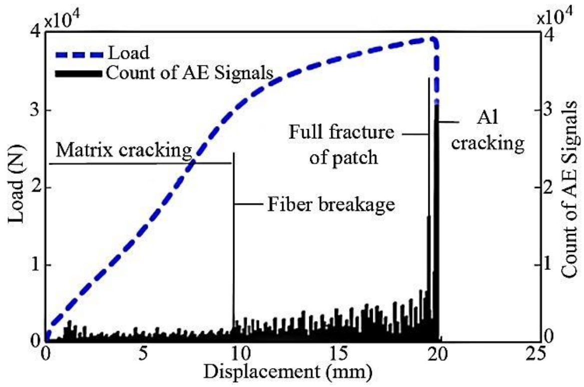


Fig. 8 Load- count- displacement of C specimen

شکل 8 نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله 4 لایه

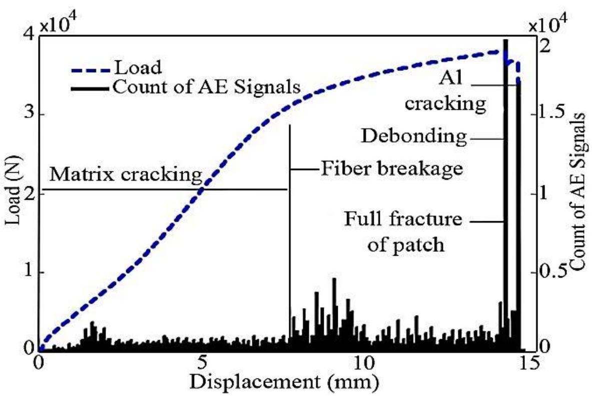


Fig. 9 Load- count- displacement of D specimen

شکل 9 نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله 8 لایه

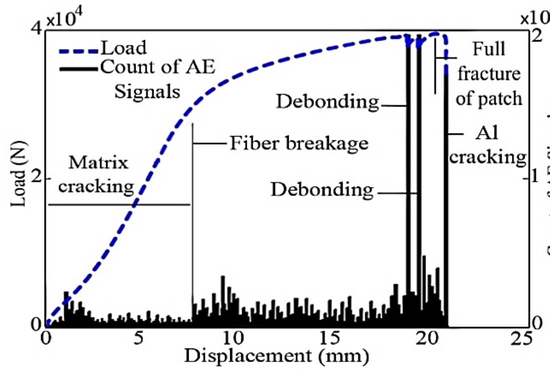


Fig. 10 Load- count- displacement of E specimen

شکل 10 نمودار نیرو- کانت- جابه‌جایی ورق آلومینیومی ترمیم شده با وصله 12 لایه

می‌شود. با توجه به "شکل 10" مکانیزم‌های خرابی ایجاد شده شبیه ترمیم با وصله 8 لایه است با این تفاوت که جدایش بین وصله و ورق بیشتر بوده و زودتر شروع می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نمونه‌های آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. یکی از پارامترهای مهم در استحکام نهایی وصله تعداد لایه‌های وصله می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وصله 4 لایه نسبت به وصله‌های 8 لایه و 12 لایه از استحکام کششی و کرنش شکست بیشتری برخوردار است. همچنین با با افزایش ضخامت وصله و تعداد لایه‌چینی‌ها، خرابی دیرتر شروع شده ولی نرخ رشد آن بیشتر است. مکانیزم خرابی‌های ایجاد شده نیز تابع تعداد لایه‌چینی و ضخامت وصله می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌چینی و ضخامت وصله، گشتاور خمشی ایجاد شده بیشتر شده و موجب تغییر مکانیزم‌های خرابی در لایه چینی‌های مختلف می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در حالت ترمیم ورق آلومینیومی با وصله 4 لایه، مکانیزم غالب خرابی شکست وصله به همراه شکست الیاف و ماتریس می‌باشد. همچنین در حالت ترمیم با وصله 8 لایه مکانیزم خرابی جدایش قسمتی از وصله از ورق به همراه شکست الیاف می‌باشد و در حالت ترمیم با وصله 12 لایه مکانیزم غالب جدایش کامل وصله از ورق همراه با کمی شکست الیاف می‌باشد. در ادامه از روش آکوستیک امیشن به منظور تشخیص لحظه شروع خرابی‌ها و توالی آنها استفاده شد. با مقایسه نتایج آکوستیک امیشن و روش میکروسکوپ الکترونی تطابق خوبی مشاهده شد. با توجه به نتایج، آکوستیک امیشن به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت تشخیص خرابی سازه‌های ترمیم شده می‌تواند استفاده شود.

5- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از کارشناسان آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر به منظور در اختیار قرار دادن تجهیزات این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

6- مراجع

[1] D. L. York, J. L. Cummings, R. M. Engeman, K. L. Wedemeyer, Hazing and movements of Canada geese near Elmendorf Air Force Base in Anchorage, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 45, No. 4, pp. 103-110, 2000.

[2] I. Lapczyk, J. A. Hurtado, Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 11, pp. 2333-2341, 2007.

[3] B. B. Bouiadjra, Comparison between composite and metallic patches for repairing aircraft structures of aluminum alloy 7075 T6, *International Journal of Fatigue*, Vol. 80, No. 2, pp. 128–135, 2015.

[4] M. M. Mousavi Nasab, M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hoseine Toudeshki, 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)

[5] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hoseine Toudeshki, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1–11, 2014. (in Persian فارسی)

[6] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Acoustic emission-based damage classification of glass/polyester composites using harmony search k-means algorithm, *Journal of Reinforced Plastic Composite*, Vol. 31, No. 10, pp. 671–680, 2012.

[7] N. Zarif Karimi, G. Minak, P. Kianfar, Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission, *Composite Structure*, Vol. 131, No. 1, pp. 107-114, 2015.

[8] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi najafabadi, M. Hajikhani, Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 144-152, 2014. (in Persian فارسی)

[9] R. E. Guerjouma, J. C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, *Advance Engineering Materials*, Vol. 3, No. 8, pp. 601–608, 2001.

[10] R. Mohammadi, M. Ahmadi Najfabadi, M. Saeedifar, J. Yousefi, G. Minak, Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites, *Composites Part B*, Vol. 108, No. 1, pp. 427-435, 2017.

[11] A. A. Baker, Repaired of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fiber composite, An overview of Australian work, *Composite Structure*, Vol. 1, No. 2, pp. 153-181, 1984.

[12] A. A. Baker, R. J. Chester, The development of a Boron/epoxy doubler system for the F-111 wing pivot fitting-materials engineering aspects, *National Conference Publication - Institution of Engineers*, Australia, pp. 221-230, 1991.

[13] A. A. Baker, Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, *Composite Structure*, Vol. 47, No. 1, pp. 431-443, 1999.

[14] J. J. Denny, *Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel with Partially Bonded Composite Patch*, M.Sc Thesis, School of Engineering, Air Force Institute of Technology, OH, USA, 1995.

[15] L. R. F. Rose, A cracked plates repaired by bonded reinforcement, *International Journal of Fracture*, Vol. 18, No. 2, pp. 135-144, 1982.

[16] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, H. R. Daghyani, Mixed-mode fracture analysis of repaired aluminum panels using composite patches, *Composite Science Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 188-198, 2006.

[17] H. Hosseini-Toudeshky, S. Bakhshandeh, B. Mohammadi, H. R. Daghyani, Experimental investigations on fatigue crack growth of repaired thick aluminum panels in mixed-mode conditions, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 437-443, 2006.

[18] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, Mixed-mode numerical and experimental fatigue crack growth analyses of thick aluminum panels repaired with composite patches, *Composite Structures*, Vol. 91, No. 1, pp. 1-8, 2009.

[19] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, M. Saber, Finite element crack propagation of adhesively bonded repaired panels in general mixed-mode conditions, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 45, No. 2, pp. 94-103, 2009.

[20] D. C. Seo, J. J. Lee, Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch, *Composite Structure*, Vol. 57, No. 1, pp. 323-330, 2002.

[21] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, G. Sadeghi, H. R. Daghyani, Numerical and experimental fatigue crack growth analysis in mode-I for repaired aluminum panels using composite material, *Composites: Part A*, Vol. 38, No. 4, pp. 1141-1148, 2007.

[22] A. C. Okafor, N. Singh, Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural networks, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 30, No. 1, pp. 3-29, 2017.

[23] ASTM E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, *ASTM International*, West Conshohocken, 1997.

[24] ASTM E976-10 Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2010.