



سرویس های
ویژه



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری
STES



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)



کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی
بین المللی و
ترفند های جستجو



محاسبه ضرایب شدت تنش و تنش T برای ورق‌های ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی و فلزی یک طرفه و دو طرفه

احسان براتی^{1*}، علیرضا سلمانیان مبارکه²، قاسم صادقی³

- 1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
2- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
3- دکتری، مهندسی هوافضا، شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)، شاهین شهر
* شاهین شهر، صندوق پستی 8315734194، e_barati@mut-es.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 مهر 1396
پذیرش: 23 بهمن 1396
ارائه در سایت: 19 اسفند 1396
کلید واژگان:
وصله کامپوزیتی
ضریب شدت تنش
مود ترکیبی
خمش خارج از صفحه

چکیده

به دلیل ویژگی‌های ممتاز مواد مرکب مانند سبکی، استحکام بالا و قابلیت شکل‌پذیری خیلی خوب، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی در ترمیم ورق‌های ترک خورده و دارای شکاف روشی کارآمد را فراهم می‌کند. در این مقاله عملکرد وصله‌های متفاوت مشتمل بر وصله‌های کامپوزیتی و فلزی با محاسبه ضرایب شدت تنش و تنش T با استفاده از روش المان محدود سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی نقش خمش خارج از صفحه در عملکرد ترمیم با وصله‌های یک طرفه از اهداف مهم دیگر انجام این مطالعه بود. نتایج نشان داده است که هرچه وصله کامپوزیتی مستحکم‌تر باشد، کاهش ضرایب شدت تنش بیشتر خواهد بود. در نمونه‌های مورد بررسی وصله بورن/اپوکسی عملکرد بسیار بهتری نسبت به وصله شیشه/اپوکسی دارد. به علاوه الحاق وصله‌های یک طرفه و دوطرفه تغییر مقادیر تنش T را به همراه داشته که این تغییر برای زاویه ترک 0 درجه، بیشترین و برای زاویه ترک 45 درجه کم‌ترین است. افزایش ضخامت چسب نیز منجر به افزایش ضریب شدت تنش در ورق ترمیم شده می‌شود. در نهایت مشخص شد خمش خارج از صفحه نقش بسیار مهمی در عملکرد ترمیم با وصله‌های کامپوزیتی یک طرفه دارد.

Computation of stress intensity factors and T - stress for cracks repaired by single and double composite and metallic patches

Ehsan Barati^{1*}, Alireza Salmanian Mobarakeh², Ghasem Sadeghi³

- 1- Mechanical Engineering, MalekAshtar University of Technology, Shahinshahr
2- Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr
3- Aerospace Engineering, Iran Aircraft Manufacturing Industrial Company (HESA), Shahinshahr
* P.O.B. 8315734194 Shahinshahr, Iran, e_barati@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 October 2017
Accepted 12 February 2018
Available Online 10 March 2018

Keywords:
Composite Patch
Stress Intensity Factor
Mixed mode
Out-of-plane bending

ABSTRACT

Due to various benefits of composite materials such as light weight, high strength and their excellent formability, the externally bonded composite patches have been proved to be a preferable method of repairing flaws and cracks in various engineering structures. In this paper, the behavior of various patches such as composite and metallic patches has been studied by calculating the stress intensity factor and the T -stress via 3D finite element method. The study of the out-of-plane bending role in repair of plates with single-sided patch is another aims of this research. The results showed that the higher stiffness of the composite patch leads to further reduction in stress intensity factor. It is found that in the studied specimens, the boron/epoxy patch has the better behavior compared with glass/epoxy one. Furthermore, using single-sided and double-sided patches leads to change in the T -stress value. The largest change achieved by the crack angle equals to 0 and the smallest on achieved by the crack angle equals to 45 degrees. Increasing the adhesive thickness leads to increasing the stress-intensity factor in repaired plate. Finally, it is found that the out-of-plane bending has the significant effect on behavior of repair with single-sided composite patch.

1- مقدمه

پرکاربردترین موارد مصرف کامپوزیت‌هاست. در طول عمر یک هواپیما و یا یک کشتی ترک‌های خستگی زیادی به وجود می‌آید و با رشد ترک‌های خستگی آثار نامطلوبی بر سازه کشتی و هواپیما پدیدار می‌شود [1]. عموماً در این مواقع به منظور جلوگیری و یا تأخیر در رشد ترک از وصله‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. این روش که به عنوان یک روش کاربردی جدید

پیشرفت سریع مواد کامپوزیتی منجر به استفاده وسیع این مواد در صنایع مختلف شده است. صنایع دریایی و هوافضا نیز از جمله همین صنایع بوده و کامپوزیت‌ها با توجه به ویژگی ممتاز آن‌ها کاربرد بسیار وسیعی در این صنایع دارند. ترمیم ترک‌های موجود در ساختارهای فلزی یکی از مهم‌ترین و

Please cite this article using:

E. Barati, A. Salmanian Mobarakeh, Gh. Sadeghi, Computation of stress intensity factors and T - stress for cracks repaired by single and double composite and metallic patches, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 369-379, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.stij.ir

مورد استفاده قرار گرفته است نسبت به روش سنتی ترمیم مکانیکی یعنی استفاده از پیچ و پرچ مزایای فراوانی دارد. عدم تحمیل خرابی جدید با ایجاد سوراخ به سازه، سبک بودن وزن ترمیم الحاقی و در عین حال استحکام بسیار بالا از مهم‌ترین مزایای استفاده از وصله‌های کامپوزیتی است. هر چند این روش معایبی مانند عدم هم‌خوانی ترمیم با قطعه پایه و مشکلات ضریب انبساط حرارتی را به همراه دارد، اما با توجه به ویژگی‌های ممتاز کامپوزیت‌ها، استفاده از این روش ترمیمی در اولویت قرار می‌گیرد. محققان آزمایشگاه‌های نیروی هوایی استرالیا از نخستین کسانی بودند که برای تعمیر قطعات ترک‌دار در سازه‌های هوایی از مواد مرکب با استحکام بالا استفاده کردند [2]. دنی [3] تأثیر اندازه و موقعیت ناحیه جدا شده را با انجام تست‌های خستگی بر کاهش عمر پل‌های ترمیم شده بررسی کرد و نشان داد وقتی ناحیه جدایش افزایش می‌یابد از عمر پل کاسته خواهد شد. میلز و رایان [4] تست‌های تجربی دیگری مشابه با تست‌های دنی، اما بر پل‌های ضخیم‌تر انجام و نشان دادند که نتایج به‌دست آمده مشابه نتایج دنی است.

امروزه استفاده از روش‌های المان محدود در ارزیابی استحکام یک سازه ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی بسیار رایج است. روش المان محدود یک ابزار قدرتمند برای تحلیل مسائل شکست و محاسبه پارامترهای مختلف از جمله ضریب شدت تنش و تنش T است. این روش در ابتدا توسط میشل و همکاران [5] استفاده شد. در ادامه مطالعاتی با به کارگیری روش المان محدود توسط جونز و کالیان [6]، راتوانی [7] و توراگو و ایبودامان [8] انجام شد. بستتی و همکاران [9] به بررسی عددی عوامل مؤثر بر کارکرد وصله‌های کامپوزیتی در ترمیم ورق حاوی سوراخ پرداختند. آن‌ها با به کارگیری روش سه لایه نشان دادند اندازه کشش اولیه در عمر خستگی ورق‌های ترمیم شده تأثیر دارد. بشیر و همکاران [10] در مطالعه‌ای با به کارگیری روش المان محدود به محاسبه ضرایب شدت تنش در مود یک و مود ترکیبی پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کارایی وصله با افزایش طول ترک افزایش خواهد یافت، همچنین استفاده از چسب با مدول برشی بالاتر بهبود عملکرد ترمیم را به دنبال خواهد داشت. چانگ و یانگ [11] مطالعه تجربی جامعی بر ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های یک طرفه و در مود ترکیبی انجام و نشان دادند که اثر ترمیم در مود یک شکست برای نمونه‌های مورد بررسی بیشترین مقدار و در مود ترکیبی برای زوایای 30 و 45 درجه کم‌ترین مقدار بوده است. حسینی‌تودشکی و همکاران [12] مدل ساده‌ای به منظور محاسبه عمر خستگی ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی ارائه دادند. وصله‌های مورد استفاده در مطالعه آن‌ها از جنس بورن/ اپوکسی، گرافیت/ اپوکسی و شیشه/ اپوکسی بود. مدل پیشنهادی آن‌ها پیچیدگی‌های تحلیل رشد واقعی ترک و تخمین عمر خستگی آن را نداشت. نتایج به دست آمده از مطالعه آن‌ها با نتایج تجربی صحت‌سنجی شده و در حالت دوبعدی و سه بعدی مشابه با روش سه لایه بود. آیت‌اللهی و هاشمی [13] در پژوهشی به بررسی تأثیر عوامل مختلف مانند ضخامت وصله و لایه چسب بر تغییرات ضرایب شدت تنش و تنش T در مود ترکیبی پرداختند. آن‌ها با به کارگیری روش المان محدود سه بعدی و با تحلیل یک ورق مستطیلی حاوی ترک مرکزی و ترمیم شده با وصله‌های گرافیت/ اپوکسی یک طرفه نشان دادند در زوایای مختلف ترک، افزایش ضخامت وصله موجب افزایش عملکرد ترمیم خواهد شد. مطالعه دیگری نیز توسط آیت‌اللهی و هاشمی [14] با موضوع محاسبه ضرایب شدت تنش و تنش T در مود یک شکست و مود ترکیبی انجام شد و طبق نتایج به‌دست آمده از نتایج آن‌ها مشخص شد افزایش صلبیت وصله بهبود عملکرد ترمیم را به

همراه خواهد داشت. رمجی و همکاران [15] در مطالعه‌ای عوامل مؤثر بر عملکرد ترمیم‌های یک و دو طرفه را در کاهش ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با به کارگیری روش المان محدود ورق حاوی ترک‌هایی با زوایای صفر و 45 درجه را مورد ارزیابی قرار داده و نتایج مطالعه نشان داد استفاده از لایه چینی 4 [90] برای وصله‌های کامپوزیتی عملکرد مطلوب ترمیم را به دنبال خواهد داشت. بن یحیی و همکاران [16] به بررسی آسیب چسب در ساختارهای هواپیمای ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی پرداختند. این پژوهش بر مبنای روش المان محدود سه بعدی و برای چهار وصله با اشکال مختلف دایره، مستطیل، بیضی و ذوزنقه انجام شد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که وصله‌های ذوزنقه‌ای ضعیف‌ترین عملکرد را به همراه دارد. مطالعه‌ای توسط هال و کان [17] در سال 2015 با استفاده از روش المان محدود بر ورق‌های ضخیم ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی انجام شد. آن‌ها به بررسی محل تارخشی در سازه‌های ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی پرداختند و نشان دادند تار خشی نقش مهمی در عملکرد ترمیم دارد. ژانگ و همکاران [18] یک مدل تحلیلی به منظور بررسی تنش در ورق‌های ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی یک طرفه ارائه دادند. آن‌ها در این پژوهش مقادیر کشش محوری، تغییر شکل خمشی، تنش بین دو سطح وصله و ترمیم و همچنین تنش‌های داخلی وصله کامپوزیتی را محاسبه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها با نتایج حاصل از روش المان محدود انطباق بسیار خوبی داشت. راماک ریشنا و همکاران [19] با استفاده از نرم‌افزار فرنس دو بعدی به عملکرد تجزیه و تحلیل عملکرد در کاهش ضرایب شدت تنش در نوک ترک پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود از برنامه کاکسا برای مش‌بندی استفاده کردند.

چند لایه‌های فلز/ کامپوزیت و یا لایه فلزی¹ نسل جدیدی از از کامپوزیت‌ها هستند که از ترکیب لایه‌های فلزی و کامپوزیتی تشکیل می‌شوند. خواص مکانیکی ایجاد شده در این مواد تلفیقی از خواص فلز و کامپوزیت‌های الیافی است. کامپوزیت‌های لایه فلزی استحکام بسیار مناسب نسبت به وزنشان داشته و از مقاومت خوبی در برابر بارهای استاتیکی برخوردار هستند، همچنین مقاومت بالا در برابر اشتعال، خوردگی، فرسایش، ضربه و رشد ترک سبب شده است که این مواد در زمره مواد بسیار پرکاربرد در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا تبدیل شوند. فلز به کار رفته در کامپوزیت‌های لایه فلزی اغلب از جنس فلز آلومینیوم است و الیاف به کار برده شده نیز عموماً از جنس آرامید، شیشه و یا کربن است. انواع کامپوزیت‌های لایه فلزی بیان شده ویژگی‌های مثبت و منفی مختلفی دارد. برای نمونه جذب رطوبت بالا و عدم وجود اتصال قوی الیاف با پلیمر از مهم‌ترین نقاط ضعف کامپوزیت‌های لایه فلزی با آرامید هستند. خوردگی ایجاد شده بین فلز آلومینیوم و الیاف کربن نیز موجب شده است که کامپوزیت لایه فلزی با الیاف کربن کم‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در نقطه مقابل کامپوزیت‌های لایه فلزی تقویت شده با الیاف شیشه مقاومت بسیار خوبی در برابر رطوبت و خوردگی داشته و از یک اتصال قوی بین زمینه پلیمری و الیاف شیشه برخوردار است؛ بنابراین کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع هواپیماسازی پیدا کرده‌اند. به تازگی استفاده از کامپوزیت‌های لایه فلزی در ترمیم قطعات ترک‌دار گسترش یافته و مطالعات مختلفی درباره آن‌ها انجام شده است. پایگانه و همکاران [20] در مورد رفتار تنش در ورق ترک‌دار آلومینیومی و ترمیم شده با وصله کامپوزیتی لایه فلزی

¹ FML

عبارت دیگر تنش در این نقاط به لحاظ تئوری به سرعت به مقدار بی‌نهایت می‌رسد. از این‌رو نظریه تمرکز تنش برای سنجش میزان شدت آسیب‌دیدگی یک سازه ترک خورده برخلاف سوراخ‌ها و بریدگی‌ها قابل استفاده نیست. در سازه‌های کشسان ترک خورده، دامنه تکنیکی تنش نوک ترک با نام ضریب شدت تنش شناخته می‌شود که برای سنجش استحکام پسماند و توانمندی سازه برای مقاومت در برابر رشد ترک ناشی از خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل 1 محورهای مختصات و تنش‌های اعمالی را در نوک ترک نشان می‌دهد.

در حل الاستیک، ارتباط بین ضرایب شدت تنش در موده‌های مختلف (K_I , K_{II} و K_{III}) با جابه‌جایی اجزا در سطح بالایی ترک می‌تواند به صورت روابط (3-1) در مختصات قطبی در نظر گرفته شود [26].

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{r}} \times \frac{Ev}{2(1-\nu^2)} \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{r}} \times \frac{Eu}{2(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$K_{III} = \frac{1}{\sqrt{r}} \times \frac{Ew}{2(1-\nu^2)} \quad (3)$$

در آن E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون و r فاصله شعاعی در نوک ترک است. جابه‌جایی در راستاهای x و y و z به ترتیب با u , v و w نمایش داده می‌شود. ضریب شدت تنش در نوک ترک می‌تواند با جابه‌جایی اجزا در سطح بالایی ترک با استفاده از روش تعمیم‌یافته خطی متناسب با $r^{0.5}$ محاسبه شود. در حالت بارگذاری مود ترکیبی به منظور سهولت در مقایسه و در محاسبات از ضریب شدت تنش معادل استفاده می‌شود. فرمول‌های متفاوتی به منظور محاسبه ضریب شدت تنش معادل ارائه شده است. فرمول ارائه شده توسط تاناکا [27] به صورت رابطه (4) و K ضریب شدت تنش معادل است.

$$K = [K_I^4 + 8K_{II}^4]^{0.25} \quad (4)$$

پاریس و اردگان [28] زاویه شکست را نیز تابعی از ضریب شدت تنش مود یک و دو دانسته و فرمول‌های (6,5) را برای این پارامتر بیان کردند.

$$\theta_c = 2 \tan^{-1} \left(\frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right) \quad K_{II} > 0 \quad (5)$$

$$\theta_c = 2 \tan^{-1} \left(\frac{K_I + \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right) \quad K_{II} < 0 \quad (6)$$

روابط (6,5) براساس معیار ماکزیمم تنش کششی استخراج شده است. این معیار بر پایه آگاهی از وضعیت تنش در حوالی نوک ترک در مختصات قطبی استوار است و بر مبنای آن هنگامی که تنش به میزان بحرانی ثابت مواد می‌رسد، ترک از نوک آن و در یک راستای شعاعی در صفحه‌ای عمود بر بزرگ‌ترین کشش به صورت رابطه (7) منتشر خواهد شد.

$$\left. \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_c} = 0 \quad \left(\left. \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_c} < 0 \right) \quad (7)$$

اسمیت و همکاران [29] معیار ماکزیمم تنش کششی را با در نظر گرفتن تنش T اصلاح نمودند و نشان دادند که شکست ترد می‌تواند به وسیله ترکیب تنش‌های تکین که با K مشخص می‌شود و تنش غیرتکین T کنترل شود. در این معیار برای رشد ترک در مواد الاستیک خطی از این مفهوم استفاده می‌شود که رشد ترک در مود یک وقتی آغاز می‌شود که تنش مماسی $\sigma_{\theta\theta}$ در یک شعاع بحرانی r_c (در بسیاری از مواد ترد با شعاع ناحیه فرایند شکست تقریب زده می‌شود)، در جلوی ترک به یک مقدار بحرانی $(\sigma_{\theta\theta})_c$ برسد. پارامترهای r_c و $(\sigma_{\theta\theta})_c$ جز خواص ماده و مفروض است که مستقل از هندسه نمونه و شرایط بارگذاری باشند. برای میدان تنش مواد الاستیک

با استفاده از جابه‌جایی نوک ترک و انتگرال J مطالعه کردند. ایشان در مطالعه خود سه پارامتر طول و زاویه ترک و همچنین نوع لایه چینی بررسی کردند و مشخص شد نوع لایه چینی تأثیر بسیار زیادی بر پاسخ کششی سازه‌ها دارد. آشنای قاسمی و همکاران [21] در سال 2014 رشد ترک خستگی در ورق‌های آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی لایه فلزی را با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته بررسی کردند. در مطالعه دیگر که همان سال انجام شد آشنای قاسمی و همکاران [22] به بررسی تجربی اثر دما روی پاسخ ضربه‌ای سرعت پایین صفحات آلومینیومی شیار دار تعمیر شده با وصله‌های کامپوزیتی چند لایه دارای لایه فلزی پرداختند. آن‌ها تعدادی نمونه آلومینیومی ترمیم شده با وصله‌های لایه فلزی را در محدوده دمایی 20- درجه سانتی‌گراد تا 60 درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش ضربه قرار دادند. علاوه بر تأثیر دما خصوصیات مانند بار قابل تحمل، مدت زمان تماس و تغییر شکل دائمی را نیز ارزیابی کردند. افزایش مقدار نیرو با افزایش دما نسبت به دمای محیط و همچنین افزایش آستانه انرژی سوراخ شدن نمونه‌ها با تغییر دما نسبت به دمای اتاق از مهم‌ترین نتایج مطالعه آن‌ها بود. آشنای قاسمی و همکاران [23] مطالعه‌ای تجربی بر استحکام کششی صفحات آلومینیومی و تقویت شده با وصله‌های کامپوزیتی لایه فلزی انجام دادند. آن‌ها در مطالعه خود تأثیر لایه چینی، ضخامت لایه فلزی و طول وصله کامپوزیتی را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی موجب افزایش چشمگیر استحکام کششی می‌شود. احمدی نجف‌آبادی و همکاران [24] به پایش خرابی ورق آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله چند لایه فلز الیاف به روش آکوستیک پرداختند. در مطالعه‌ای که به تازگی توسط موسوی نسب و همکاران [25] انجام گرفت، مکانیزم‌های خرابی ورق ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی با روش آکوستیک امیشن بررسی شد. نتایج مطالعه نشان داد که روش آکوستیک عملکرد مطلوبی در تعیین لحظه خرابی سازه آسیب دیده و نتایج حاصل از آن انطباق خوبی با نتایج به‌دست آمده از داده‌های مکانیکی دارد.

در این مطالعه با استفاده از روش المان محدود سه بعدی عملکرد وصله‌های مختلف شامل وصله‌های کامپوزیتی و وصله‌های فلزی در کاهش ضرایب شدت تنش و تغییرات تنش T ، همچنین نقش خمش خارج از صفحه ناشی از ترمیم با وصله‌های یک طرفه نیز بررسی شده است. بررسی تغییرات ضرایب شدت تنش و زاویه شکست در راستای ضخامت ورق از موضوعات مهم پرداخته شده در مطالعه حاضر است. بارگذاری مورد استفاده در تمام نمونه‌ها از نوع استاتیکی و در مود ترکیبی شکست است. وصله‌های مورد ارزیابی نیز به صورت یک طرفه و دو طرفه به ورق ترک‌دار آلومینیومی متصل شده است.

ارزیابی تغییرات ضرایب شدت تنش و ضریب شدت تنش معادل در راستای ضخامت، محاسبه و بررسی تغییرات زاویه شکست و در نتیجه تغییر شکل ترک در راستای ضخامت، بررسی نقش خمش خارج از صفحه ایجاد شده در اثر ترمیم یک طرفه با تغییر ضخامت لایه چسب و وصله و چگونگی تأثیر آن با بر عملکرد ترمیم، همچنین مقایسه عملکرد وصله‌های کامپوزیتی الیافی و فلزی در کاهش ضرایب شدت تنش و همچنین تغییرات تنش T با افزودن وصله‌های یک طرفه و دو طرفه در مود ترکیبی از مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر بوده که در مطالعات پیشین کم‌تر دیده شده است.

2- شکست تحت مود ترکیبی

توزیع تنش در نزدیکی دوسر ترک در یک سازه ترمیمی تکینه است. به

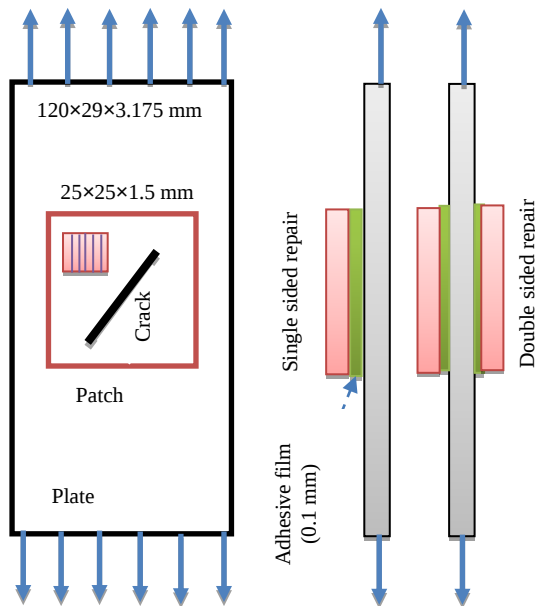


Fig. 2 Configuration of cracked specimen under mixed mode loading
شکل 2 پیکربندی نمونه ترک‌دار تحت بارگذاری در مود ترکیبی

جدول 1 ابعاد هندسی نمونه‌های مورد بررسی

Table 1 Geometric dimensions of the studied specimens

ابعاد [mm]	لایه چسب	ورق	وصله کامپوزیتی
طول	25	120	25
عرض	25	29	25
ضخامت	0.1	3.175	1.5

جدول 2 خواص وصله‌های کامپوزیتی، چسب و ورق [15,12]

Table 2 Material properties of composite patches, adhesive and plate

پارامتر	آلومینیوم	لایه چسب	شیشه/اپوکسی	بورن/اپوکسی
E_{11} [GPa]	71.02	1850	50	208.3
E_{22} [GPa]			14.5	25.4
E_{33} [GPa]			14.5	25.4
G_{12} [GPa]			2.56	7.2
G_{13} [GPa]			2.56	7.2
G_{23} [GPa]			2.24	4.9
ν_{12}	0.3	0.33	0.33	0.1677
ν_{13}			0.33	0.1677
ν_{23}			0.33	0.035

صورت سالیید¹ مدل شده‌اند. با مدل‌سازی سه بعدی رشد واقعی ترک می‌توان تغییرات ضرایب شدت تنش را در راستای ضخامت محاسبه کرد و اثر خمشی خارج از صفحه ناشی از ترمیم را متقارن را در نظر گرفت. در مطالعه حاضر لایه چسب نیز مدل شده است. مهم‌ترین نقش لایه چسب را می‌توان انتقال بار و تنش اعمالی از ورق آسیب دیده به وصله دانست؛ بنابراین مدل‌سازی چسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چسب در مدل‌سازی انجام شده به عنوان یک ماده همگن در نظر گرفته شد، چرا که هدف از انجام این تحقیق مطالعه رفتار چسب (از نقطه نظر جدایش و تخریب لایه چسب) در این سازه

¹ Solid

توسط ویلیامز به صورت روابط (8-10) گسترش یافته است [29].

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) - K_{II} \left(1.5 \sin \theta - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right) + T \cos^2 \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \right] \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - 1.5 K_{II} \sin \theta \right] + T \sin^2 \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (9)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta - K_{II} (3 \cos \theta - 1)] + T \sin \theta \cos \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (10)$$

در روابط بالا r و θ به صورت قراردادی برای مختصات نوک ترک به کار می‌رود. ترم T تنش همسو و متناظر با ترک است. با توجه به روابط (7-10)، معیار ماکزیمم تنش کششی اصلاح شده به صورت روابط (11,12) بیان می‌شود.

$$[K_I \sin \theta_c + K_{II} (3 \cos \theta_c - 1)] - \frac{16}{3} T \sqrt{2\pi r_c} \sin \frac{\theta_c}{2} \cos \theta_c = 0 \quad (11)$$

$$\cos \frac{\theta_c}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_c}{2} - 1.5 K_{II} \sin \theta_c \right] = K_{IC} - T \sqrt{2\pi r_c} \sin^2 \theta_c \quad (12)$$

3- هندسه مسأله و خصوصیات مواد به کار رفته

هدف از این مقاله ارزیابی عملکرد وصله‌های مختلف یک طرفه و دو طرفه در ترمیم ورق‌های حاوی ترک مرکزی برای مود ترکیبی است. شکل 2 هندسه ترمیم ورق ترک‌دار با به کار بردن وصله‌های یک طرفه و دو طرفه را نشان می‌دهد. ابعاد ساختار ترمیم شده نیز در جدول 1 بیان شده است. صفحه آلومینیومی حاوی ترک دارای طول $2a=10\text{mm}$ با زاویه متغیر ترمیم شده با وصله‌های یک و دو طرفه، تحت تنش‌های تک محوره $\sigma_y=120\text{MPa}$ قرار دارد. اتصال ورق ترک‌دار با وصله نیز توسط لایه چسب از جنس آراال دیت 2015 انجام شده است. خواص مکانیکی ساختار ترمیم در جدول 2 بیان شده است.

4- مدل‌سازی مسأله توسط المان محدود

تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود سه بعدی و با کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در مدل‌سازی صورت گرفته تمامی اجزای ترمیم (ورق پایه، چسب و وصله) در حالت سه بعدی و به

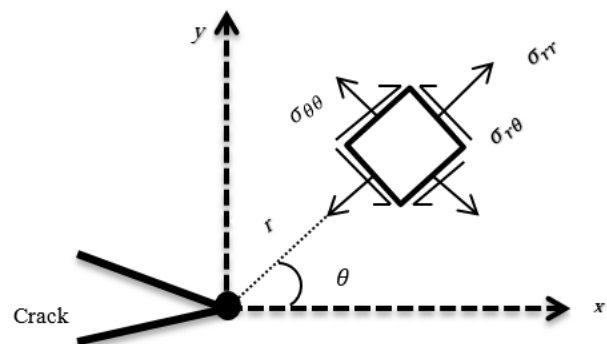


Fig. 1 Definition of coordinate system near the crack tip

شکل 1 سیستم مختصات تعریف شده در نزدیکی نوک ترک

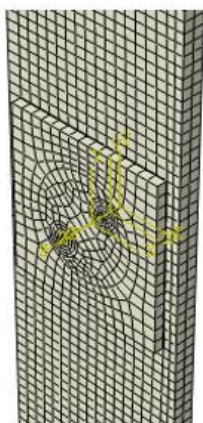


Fig. 3 Typical finite element model of repaired specimen

شکل 3 مدل المان محدود نمونه ترمیم شده



Fig. 4 out of plane bending of repaired specimen with single side patch

شکل 4 خمش خارج از صفحه در نمونه ترمیم شده با وصله یک طرفه

محاسبه شده برای ضریب شدت تنش مود یک (K_I) و مقدار خطای مدل‌سازی را برای زاویه مختلف ترک نشان می‌دهد. جدول 4 نیز بیانگر مقایسه مقادیر محاسبه شده برای ضریب شدت تنش مود دو (K_{II}) حاصل از این مدل‌سازی با نتایج ارائه شده در مرجع [31] است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ماکزیمم اختلاف به دست آمده بین نتایج مدل‌سازی در مطالعه حاضر و نتایج ارائه شده در مرجع [31] حدود 6% است؛ بنابراین مدل‌سازی ترک تحت مود ترکیبی (بدون حضور وصله کامپوزیتی) از دقت قابل قبولی برخوردار است. در تمام جداول این مقاله زاویه ترک برحسب درجه و مقادیر ضریب شدت تنش برحسب $\text{MPa m}^{0.5}$ است.

مسئله مورد بررسی در مرجع [13] برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده در حالت با وصله مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول 5 مقادیر محاسبه شده برای تنش T حاصل از مدل‌سازی حاضر و مرجع [13] را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشینه خطای ایجاد شده در محاسبه تنش T حدود 4.2% بوده که خود بیانگر اعتبار مدل‌سازی انجام شده در محاسبه این پارامتر است. شکل 5 نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر و مدل‌سازی مرجع [13] را برای ضرایب شدت تنش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ماکزیمم خطای ایجاد شده در این حالت نیز حدود 5.6% است که خود بیانگر اعتبار مدل‌سازی انجام شده و همچنین واحد تنش T مگاپاسکال است.

6- تحلیل نتایج به دست آمده

در این تحقیق با به کارگیری روش المان محدود سه بعدی به بررسی عملکرد

جدول 3 مقایسه ضریب شدت تنش مود یک برای ترک ترمیم نشده

Table 3 Comparison of K_I for non-repaired crack

زاویه ترک	K_I مرجع [31]	K_I کار حاضر	% خطا
0	31.63	33.5	5
30	23.72	25.17	5
45	15.81	16.6	4.7
60	7.9	8.31	4.9
90	0	0	0

نیست و بارگذاری مورد استفاده در تمام نمونه‌ها از نوع استاتیکی است. گام بعدی در مدل‌سازی ترکیب مناسب اجزا ترمیم است. نوع شبکه‌بندی روی نمونه مستقل تعریف شده است. در مدل‌سازی انجام شده سطح فوقانی فلز با سطح زیرین لایه چسب و سطح بالایی لایه چسب با سطح تحتانی وصله به کمک تکنیک گره¹ پیوند زده شده است. روش گره حالت خاصی است که در آن مقادیر جابه‌جایی یک سطح با سطح دیگر دقیقاً همسان می‌شود. در مدل‌سازی ترک با توجه به تحمیل شرایط سازگاری با حوزه تنش نوک ترک از المان‌های تکین² استفاده شده است. استفاده از روش المان محدود و المان‌های تکین باعث می‌شود مقادیر ماتریس سفتی با کاربرد در محاسبات اجزا محدود حقیقی شده و این خود یک رفتار خوب محاسباتی به شمار می‌رود. نحوه بارگذاری در تمام نمونه‌های مورد بررسی از نوع استاتیکی و تنش کششی است. برای آن‌که بار کششی خالص وارد شود، جابه‌جایی‌های عرضی در راستای طول کاملاً مقید شده است. با این فرض بارگذاری و شرایط مرزی خطای بارگذاری به صفر می‌رسد به طوری که در مود یک شکست، مقادیر ضرایب شدت تنش مود دوم و سوم کاملاً صفر خواهد شد. ساختار ترمیم پس از اعمال بارگذاری با ایجاد پارتیشن‌های مناسب مش‌بندی می‌شود. مشابه با پارتیشن‌های ایجاد شده بر ورق ترک‌دار، لایه چسب و وصله نیز پارتیشن‌بندی شده است. سوئپ نوع مش مورد استفاده است. در نزدیکی نوک ترک با توجه به تغییرات زیاد تنش، به منظور دستیابی به نتایج با دقت بالا، استفاده از المان‌ها با ابعاد مناسب و تطبیق مش با هندسه و مسیر رشد ترک الزامی است. مش‌ها با توجه به روش‌های تجربی و با سعی و خطا و کنترل همگرایی تا حصول نتیجه مناسب تغییر خواهد کرد. بررسی حساسیت به مش و همچنین حصول همگرایی انجام شد و اندازه بهینه المان‌ها به منظور کاهش هزینه‌های زمانی و محاسباتی 1.5 در نظر گرفته شده است. تعیین پارتیشن‌های مناسب در راستای ضخامت و تقسیم‌بندی ضخامت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوع المان مورد استفاده برای مش‌بندی برای هر سه جز ترمیم (ورق، چسب و وصله) بیست گره‌ای آجری³ است. استفاده از این نوع المان دقیق‌ترین نتایج را به دنبال خواهد داشت. این نوع المان به صورت مکعبی بوده و قادر به محاسبه میدان تغییر مکان در حجم مکعب است. در المان‌های بیست گره‌ای C3D20 روی هر یال سه گره وجود دارد و از طرفی با استفاده از توابع المان بیست گرهی می‌توان جابه‌جایی هر خط روی سطح ترک را محاسبه کرد که عمود بر پروفیل ترک است. شکل 3 مش‌بندی ورق ترک‌دار ترمیم شده با وصله کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

با الحاق وصله یک طرفه به ورق ترک‌دار، جابه‌جایی و خمش خارج از صفحه اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر محور خنثی با اعمال وصله یک طرفه از خط مرکزی ورق به سمت وصله جابه‌جا می‌شود. بر این اساس اعمال نیرو از خط مرکزی ورق متوجه محور جدید شده و باعث ایجاد گشتاور خمشی در لبه وصله و طول ترک می‌شود. شکل 4 خمش خارج از صفحه اتفاق افتاده در اثر اعمال بار کششی را به ساختار ترمیم نشان می‌دهد. افزودن وصله دوم اثر خمش خارج از صفحه ناشی از بارگذاری کششی را از بین خواهد برد.

5- صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت گرفته

نتایج حاصل از این مدل‌سازی با نتایج ارائه شده در مرجع [31] به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت گرفته مقایسه شده است. جدول 3 مقادیر

1 Tie

2 Singular

3 20- Node quadratic brick

ورق نتیجه می‌دهد. شکل 7 تغییرات ضریب شدت تنش مود II را در راستای ضخامت ورق ترک‌دار نشان می‌دهد. در این‌جا کاهش ضریب شدت تنش در تمام ضخامت ورق بر خلاف مود I مشهود بوده و عملکرد ترمیم دو طرفه در کاهش ضریب شدت تنش مود II به نسبت یک طرفه بسیار مطلوب‌تر است. سطح تعمیر نشده در شکل‌های 6 و 7 (و شکل‌های 8 و 9 که در ادامه توضیح داده خواهد شد) در موقعیت 3.175 میلی‌متری قرار دارد.

شکل 8 تغییرات ضریب شدت تنش معادل را در راستای ضخامت ورق ترک‌دار نشان می‌دهد. کاهش ضریب شدت تنش معادل در تمام نقاط مورد بررسی در راستای ضخامت مشهود بوده، اما اختلاف ضریب شدت تنش معادل در لبه سطح آزاد (فاقد ترمیم) و نمونه ترمیم نشده ناچیز است. کارایی بالای وصله‌های دو طرفه در کاهش ضریب شدت تنش معادل نسبت به وصله‌های یک طرفه نتیجه مهم دیگری است که از شکل 8 حاصل می‌شود. ممان خمشی خارج از صفحه ناشی از ترمیم یک طرفه باعث افزایش ضریب شدت تنش معادل در نزدیکی سطح بدون ترمیم می‌شود. به نحوی که اختلاف چندانی با ضریب شدت تنش معادل نمونه ترمیم نشده ندارند. این موضوع بدین معنی است که اختلاف چندانی بین سرعت رشد ترک در سطح ترمیم نشده و سطوح نمونه فاقد ترمیم وجود ندارد. در صورت محاسبه زاویه شکست اولیه برای نقاط مورد بررسی در راستای ضخامت، عدم تغییر محسوس این زاویه برای دو نمونه ترمیم نشده و ترمیمی با وصله دو طرفه و همچنین تغییرات غیر قابل چشم‌پوشی برای وصله‌های یک طرفه است (شکل 9)؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت در صورت استفاده از وصله‌های یک طرفه، پس از چندین مرحله بارگذاری خستگی، شکل ترک از حالت خط صاف در راستای ضخامت به یک خط منحنی تبدیل شود.

در ادامه تغییرات ضرایب شدت تنش و تنش T در زوایای متفاوت ترک،

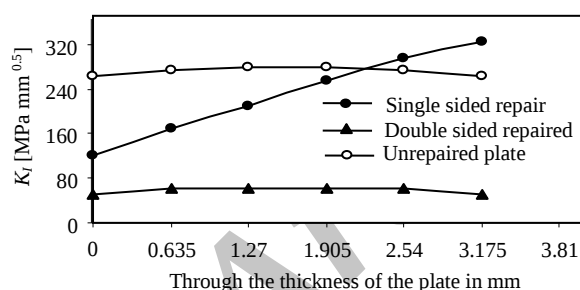


Fig. 6 The variation of K_I across the thickness of the repaired plate

شکل 6 تغییرات ضریب شدت تنش مود I در راستای ضخامت ورق ترمیم شده

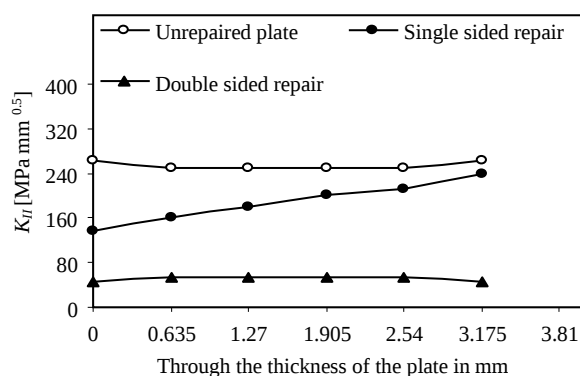


Fig. 7 The variation of K_{II} across the thickness of the repaired plate

شکل 7 تغییرات ضریب شدت تنش مود II در راستای ضخامت ورق ترمیم شده

جدول 4 مقایسه ضریب شدت تنش مود II برای ترک ترمیم شده

زاویه ترک	K_{II} مرجع [31]	K_{II} کار حاضر	% خطا
0	0	0	0
30	13.65	14.6	6
45	15.81	16.8	5
60	13.75	14.4	4.5
90	0	0	0

جدول 5 مقایسه تنش T برای ترک ترمیم شده

زاویه ترک	تنش T مرجع [13]	تنش T کار حاضر	% خطا
0	58.4	60	2.6
30	29.2	30.5	4.2
45	0	0	0
60	-29.1	-30.2	3.6
90	-58.4	-58.5	0.1

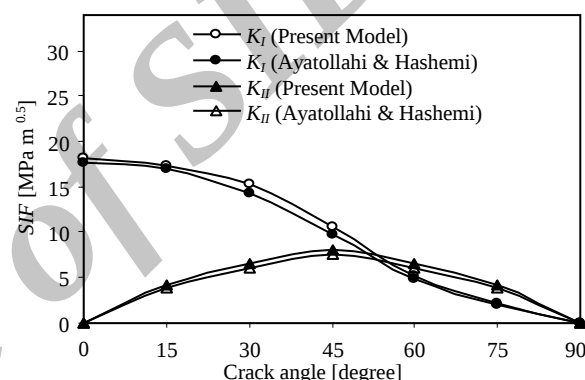


Fig. 5 Comparison of K_I and K_{II} for repaired crack

شکل 5 مقایسه ضرایب شدت تنش مود I و II برای ترک ترمیم شده

وصله‌های مختلف مشتمل بر وصله‌های کامپوزیتی و فلزی در مود ترکیبی و تغییرات ضرایب شدت تنش و تنش T پرداخته شده است. خمشی خارج از صفحه ناشی از ترمیم یک طرفه نیز با تغییر ضخامت وصله کامپوزیتی و لایه چسب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

1-6- ارزیابی عملکرد وصله‌های کامپوزیتی

در این قسمت به منظور ارزیابی عملکرد وصله‌های کامپوزیتی از دو نوع وصله از جنس بورن/اپوکسی و شیشه اپوکسی استفاده شده است. استفاده از وصله‌های کامپوزیتی یک طرفه (ترمیم نامتقارن) موجب تغییر محل تار خشی و به دنبال آن خروج از مرکزیت نیروها خواهد شد؛ بنابراین مقادیر ضریب شدت تنش در راستای ضخامت برای دو سطح ترمیم شده و نشده مقادیر کاملاً متفاوتی است. این در حالی است که تغییرات ضریب شدت تنش به دلیل عدم وجود خمشی خارج از صفحه در ورق ترمیم نشده و حالت ترمیم شده با وصله‌های دو طرفه در راستای ضخامت محدود است. شکل 6 تغییرات ضریب شدت تنش مود I در راستای ضخامت ورق حاوی ترک با زاویه 45 درجه و ترمیم شده با وصله‌های بورن/اپوکسی را نشان می‌دهد. براساس شکل 6 در سطح فاقد ترمیم، ضریب شدت تنش نمونه ترمیم شده با وصله یک طرفه از نمونه ترمیم نشده بیشتر و ترمیم در کاهش ضریب شدت تنش مود I برای سطوح وصله نشده ناکارآمد است. استفاده از ترمیم با وصله‌های کامپوزیتی دو طرفه کاهش ضریب شدت تنش را در تمامی طول ضخامت

ترمیم نامتقارن بسیار مشهودتر بوده، به طوری که در زاویه ترک 75 درجه به کار بردن وصله‌های یک طرفه کاهش محسوسی در ضریب شدت تنش ایجاد نمی‌کند. شکل 11 تفسیر بسیار خوبی از تغییرات ضریب شدت تنش مود I است. همان‌طور که از شکل 12 مشخص است میزان کاهش ضریب شدت تنش با غلبه مود II شکست کاهش یافته و در زوایای ترک 75 به بعد، میزان کاهش به کم‌ترین مقدار خود رسیده به گونه‌ای که در زاویه ترک 90 درجه نه تنها کاهشی مشاهده نخواهد شد، بلکه ضریب شدت تنش مود I افزایش یافته و وضعیت بحرانی‌تر خواهد شد.

شکل 12 تغییرات ضریب شدت تنش مود II در زوایای مختلف ترک را نشان می‌دهد. استفاده از وصله‌های دو طرفه بورن/اپوکسی کاهش 81% ضریب شدت تنش مود II را به دنبال خواهد داشت. این در حالی است که استفاده از وصله‌های شیشه/اپوکسی مقدار کاهش این ضریب به طور متوسط حدود 53% خواهد بود. استفاده از وصله‌های یک طرفه کاهش 31 و 19 درصدی برای وصله‌های بورن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی را به دنبال خواهد دارد. شکل 13 مقادیر کاهش ضریب شدت تنش مود II را برحسب زوایای مختلف ترک نشان می‌دهد. در مود شکست II بر خلاف مود اول شکست، مقادیر کاهش تقریباً یکسانی در زوایای مختلف ترک مشاهده می‌شود که این مقادیر نسبت به مقادیر متناظر مود I شکست و به ویژه برای وصله‌های یک طرفه بیشتر است. نکته مهم دیگر که از شکل 13 قابل نتیجه‌گیری است، تشابه کاربرد وصله‌های دو طرفه در مود I و II شکست است. با توجه به تفسیر بالا می‌توان نتیجه گرفت در تمام نمونه‌های مورد بررسی تأثیر ترمیم بر مود II شکست بیشتر است.

محاسبه ضریب شدت تنش معادل با داشتن مقادیر ضریب شدت تنش مود I و II و با کمک رابطه (4) امکان‌پذیر است. این کار کمک شایانی به تعیین میزان نیروی بحرانی شکست می‌کند. به عبارت دیگر طبق معیارهای شکست هنگامی که ضریب شدت تنش معادل به مقدار بحرانی خود در مود I شکست می‌رسد (K_{IC}) شکست رخ خواهد داد. با توجه به این که ضریب شدت تنش و تنش اعمالی به قطعه با یکدیگر نسبت مستقیم دارند می‌توان بار بحرانی را به آسانی محاسبه کرد. هدف از انجام این مطالعه محاسبه بار بحرانی نبوده و در این بخش کاهش ضریب شدت تنش معادل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

شکل 14 تغییرات ضریب شدت تنش معادل را برای زوایای مختلف ترک برحسب لایه‌چینی‌های متفاوت وصله‌های یک طرفه و دو طرفه نشان می‌دهد. کاهش ضریب شدت تنش معادل در تمامی زوایای ترک مشهود است. در این‌جا نیز بیشترین کاهش مربوط به استفاده از وصله‌های دو طرفه بورن/اپوکسی و کم‌ترین میزان کاهش نیز متعلق به ترمیم یک طرفه شیشه/اپوکسی است. عملکرد ترمیم با افزایش میزان صلبیت وصله افزایش خواهد یافت و ، وصله‌های بورن/اپوکسی نسبت به وصله‌های شیشه/اپوکسی در نمونه‌های مورد بررسی عملکرد مطلوب‌تری دارند. این وصله‌ها با توجه به قیمت پایین وصله‌های شیشه/اپوکسی و همچنین در دسترس بودن آن‌ها نسبت به وصله‌های بورن/اپوکسی کاربرد بیشتری در صنعت دارند، همچنین وصله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی معایب وصله‌های بورن/اپوکسی از قبیل ضریب انبساط حرارتی پایین نسبت به ورق آلومینیومی را ندارند که موجب تنش پسماند حرارتی می‌شود. دمای پخت پایین این وصله‌ها نیز موجب کاهش تنش‌های پسماند خواهد شد.

شکل 15 تغییرات پارامتر بی‌بعد شده تنش T (T/σ_y) برای جنس‌های متفاوت وصله‌های یک طرفه و دو طرفه در زوایای مختلف ترک را نشان

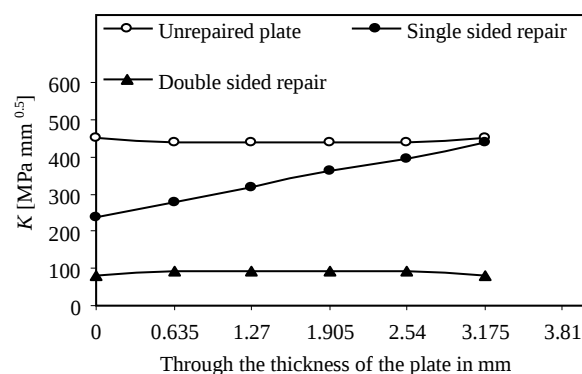


Fig. 8 The variation of K across the thickness of the repaired plate

شکل 8 تغییرات ضریب شدت تنش معادل در راستای ضخامت ورق ترمیم شده

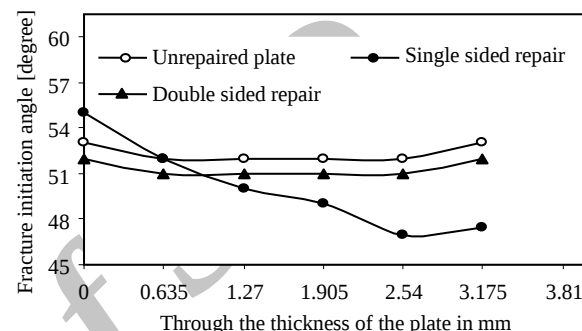


Fig. 9 The variation of Fracture initiation angle across the thickness of the repaired plate

شکل 9 تغییرات زاویه شکست اولیه در راستای ضخامت ورق ترمیم شده

با الحاق وصله‌های کامپوزیتی یک طرفه و دوطرفه با دو جنس متفاوت بورن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در رشد یکسان ترک در گره وسط ضخامت به عنوان گره اصلی در تمامی محاسبات استفاده شده و اطلاعات این گره به سایر گره‌ها نیز بسط داده شده است. شکل 10 تغییرات ضریب شدت تنش مود I را برحسب زوایای مختلف ترک و برای دو جنس متفاوت نشان می‌دهد. کاهش ضریب شدت تنش در تمامی زوایای ترک با الحاق وصله کامپوزیتی مشهود بوده و در صورت استفاده از وصله‌های دو طرفه این موضوع نمود بسیار بیشتری دارد. به عنوان نمونه در زاویه ترک 30 درجه، مقدار ضریب شدت تنش مود I از $412 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ برای نمونه ترمیم نشده و به مقدار $304 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ برای وصله‌های یک طرفه و $82 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ با الحاق وصله‌های دو طرفه خواهد شد. کاهش ضریب شدت تنش در هر مود شکست را می‌توان از رابطه (13) محاسبه کرد.

$$RF_i = 1 - \left(\frac{K_i}{K_{ui}} \right) \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

در رابطه (13) پارامتر K ضریب شدت تنش نمونه ترمیم شده (یک طرفه و یا دو طرفه)، K_{ui} ضریب شدت تنش نمونه ترمیم نشده و i مود شکست مورد بررسی است.

با محاسبه مقادیر کاهش ضریب شدت تنش مود I مشخص است استفاده از وصله‌های دو طرفه از جنس بورن/اپوکسی بالاترین میزان کاهش با مقدار 81% و استفاده از وصله‌های یک طرفه شیشه/اپوکسی کم‌ترین میزان کاهش (27%) را به دنبال خواهد داشت. موضوع مهم دیگری که از محاسبه مقادیر کاهش ضریب شدت تنش حاصل می‌شود، کاهش میزان افول ضریب شدت تنش مود I از زاویه ترک 60 درجه به بعد است. این موضوع در

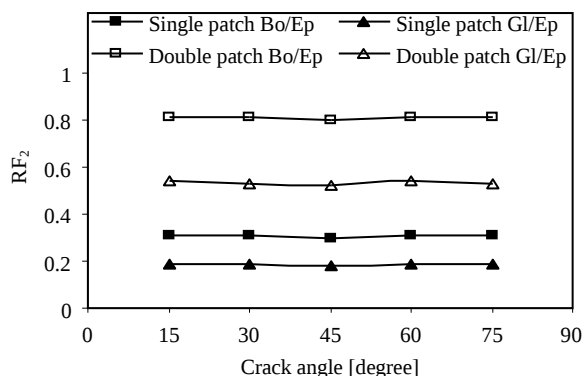


Fig. 13 Reduction of mode II stress intensity factor with respect to crack angle

شکل 13 میزان تغییرات ضریب شدت تنش مود دو برحسب زاویه ترک

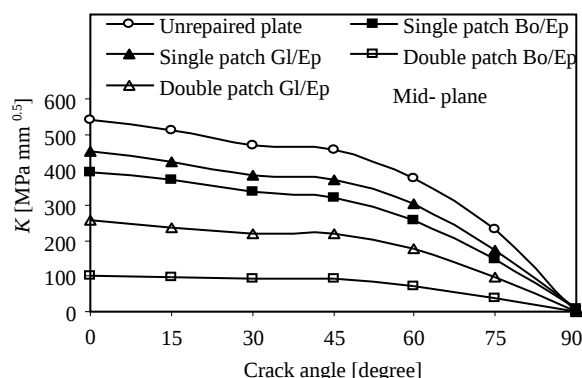


Fig. 14 The variation of K with crack angle for composite patches

شکل 14 تغییرات ضریب شدت تنش معادل برحسب زاویه ترک برای وصله‌های کامپوزیتی

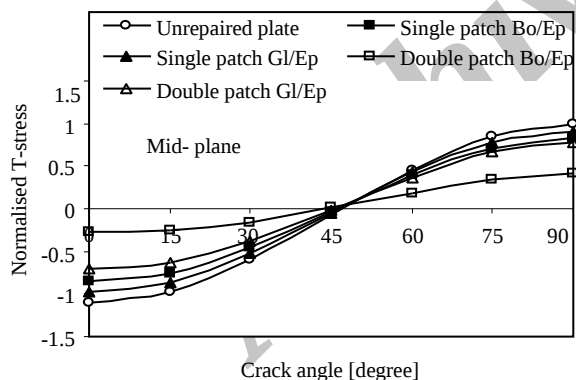


Fig. 15 The variation of T -stress with crack angle for composite patches

شکل 15 تغییرات تنش T برحسب زاویه ترک برای وصله‌های کامپوزیتی

I شکست است.

6-2- ارزیابی عملکرد وصله‌های فلزی

شکل 16 تغییرات ضریب شدت تنش مود I در زوایای مختلف ترک با به کار بردن وصله‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد. استفاده از وصله‌های فلزی نیز کاهش ضریب شدت تنش مود I را به دنبال خواهد داشت مقادیر کاهش در تمامی زوایای ترک نسبت به وصله‌های کامپوزیتی بون/اپوکسی کم‌تر و نسبت به وصله‌های شیشه/اپوکسی بیشتر است. توجه این موضوع را می‌توان در مقایسه مدول الاستیسیته خاصه در جهت x برای دو وصله در مقایسه با

می‌دهد. کاهش قدر مطلق مقادیر بی‌بعد شده تنش T نسبت به حالت بدون ترمیم برای تمامی زوایای ترک رخ می‌دهد. بیشترین تأثیر ترمیم بر تغییرات تنش T مربوط به وصله دو طرفه بون/اپوکسی بوده و هنگامی رخ می‌دهد که خط ترک عمود بر راستای بارگذاری باشد که این حالت مربوط به زاویه ترک 0 درجه است. در نقطه مقابل در صورتی که زاویه ترک 45 درجه باشد، وصله‌های کامپوزیتی کم‌ترین تأثیر را بر تنش T دارند و تفاوتی بین عملکرد آن‌ها وجود ندارد. نکته مهم دیگری که می‌توان از شکل 15 نتیجه گرفت تأثیر بیشتر ترمیم بر پارامتر T برای زوایای ترک کم‌تر از 45 درجه (غلبه مود

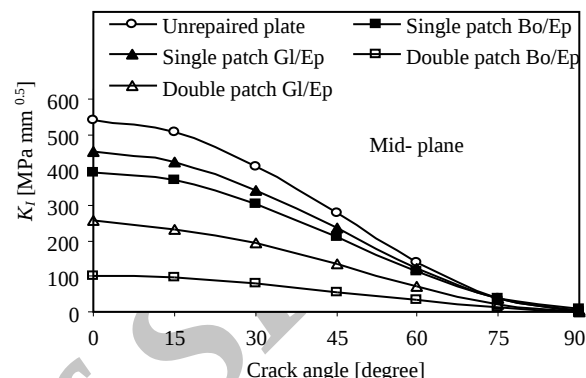


Fig. 10 The variation of K_I with crack angle for composite patches

شکل 10 تغییرات ضریب شدت تنش مود یک برحسب زاویه ترک برای وصله‌های کامپوزیتی

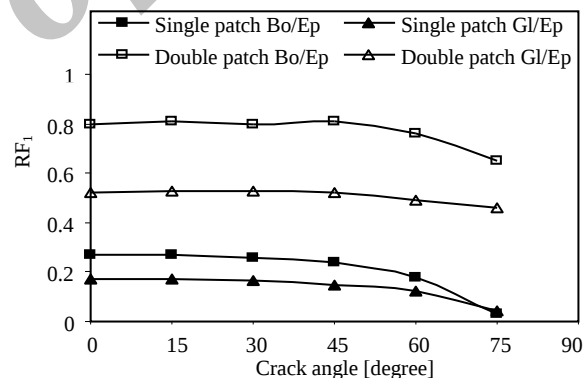


Fig. 11 Reduction of mode I stress intensity factor with respect to crack angle

شکل 11 میزان تغییرات ضریب شدت تنش مود یک برحسب زاویه ترک

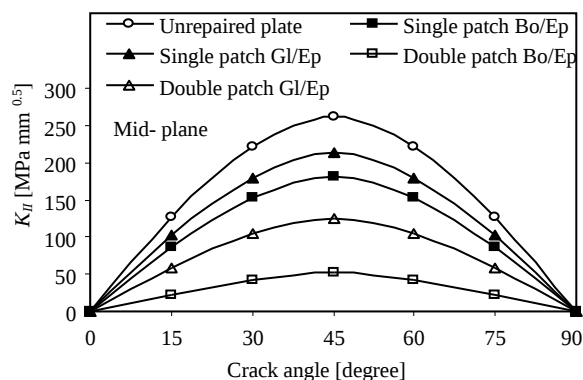


Fig. 12 The variation of K_{II} with crack angle for composite patches

شکل 12 تغییرات ضریب شدت تنش مود دو برحسب زاویه ترک برای وصله‌های کامپوزیتی

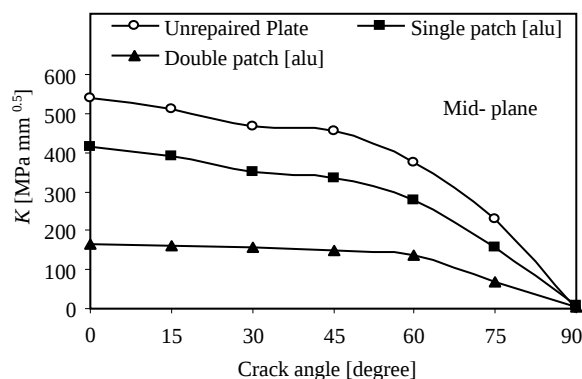


Fig. 18 The variation of K with crack angle for aluminum patch

شکل 18 تغییرات K معادل برحسب زاویه ترک برای وصله‌های آلومینیومی

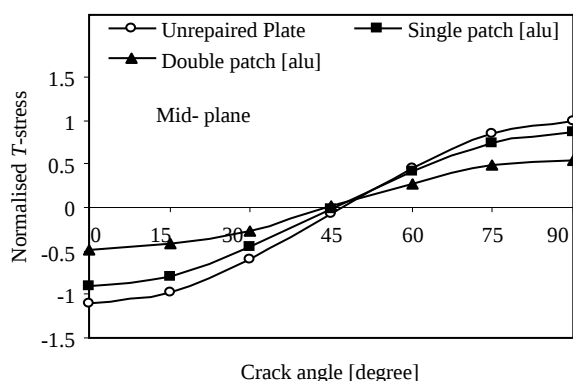


Fig. 19 The variation of T -stress with crack angle for aluminum patch

شکل 19 تغییرات تنش T برحسب زاویه ترک برای وصله‌های آلومینیومی

نیز مربوط به زاویه ترک 45 درجه است.

3-6- بررسی نقش خمشی خارج از صفحه در عملکرد ترمیم یک طرفه
با افزودن وصله‌های یک طرفه به ورق‌های ترک‌دار محور خمشی تغییر مکان داده و با خروج از مرکزیت نیروها ممان خمشی خارج از صفحه رخ می‌دهد و می‌تواند عملکرد ترمیم را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. تأثیر خمشی خارج از صفحه با تغییر هندسه و یا نوع بارگذاری افزایش و یا کاهش خواهد یافت. افزایش ضخامت وصله و لایه چسب موجب تغییر مکان محور خمشی شده و ممان خمشی خارج از صفحه بیشتری ایجاد می‌شود. در ادامه تأثیر افزایش ضخامت وصله و لایه چسب بر تغییرات ضریب شدت تنش مود I و II مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ورق مورد بررسی در این بخش دارای ترکی با زاویه 30 درجه نسبت به راستای x است. جنس وصله انتخابی در این بخش بورن/اپوکسی با زاویه الیاف 90 درجه نسبت به محور x است. شکل 20 تغییرات ضریب شدت تنش مود I را برای سه صفحه ترمیم شده، میانی و ترمیم نشده برای ضخامت‌های متفاوت وصله نشان می‌دهد. افزایش ضخامت وصله موجب افزایش کارایی ترمیم شده و این موضوع در سطح فاقد ترمیم محسوس‌تر است. در واقع تقابل عامل افزایش استحکام با افزایش ضخامت وصله و عامل منفی تغییر مکان محور خمشی و به دنبال آن خمشی خارج از صفحه با افزایش ضخامت تعیین‌کننده نقش ضخامت وصله در عملکرد ترمیم است؛ بنابراین کاهش ضریب شدت تنش نشان از غلبه عامل افزایش استحکام بر خمشی خارج از صفحه دارد و در نتیجه ضریب شدت تنش با افزایش ضخامت وصله کاهش می‌یابد.

شکل 21 تغییرات ضریب شدت تنش مود II را برای ضخامت‌های متفاوت

وصله آلومینیومی است. کاهش ضریب شدت تنش مود I برای زوایای ترک کمتر از 45 درجه با به کار بردن وصله یک طرفه حدود 23% است و کارایی وصله با افزایش زاویه ترک کاهش یافته است به گونه‌ای که در زاویه ترک 75 درجه فقط 5% کاهش می‌یابد و ترمیم یک طرفه در کاهش ضریب شدت تنش در زوایای بزرگ‌تر تأثیری ندارد.

شکل 16 همچنین نشان می‌دهد که اعمال وصله‌های دو طرفه کاهش 68 درصدی ضریب شدت تنش مود I را به دنبال دارد. البته میزان افول ضریب شدت تنش در زوایای ترک بیشتر از 75 درجه کاهش می‌یابد.

شکل 17 تغییرات ضریب شدت تنش مود II در زوایای مختلف ترک برای سه حالت فاقد ترمیم، ترمیم با وصله یک طرفه و ترمیم با وصله‌های دو طرفه را نشان می‌دهد. ترمیم یک طرفه کاهش حدود 25 درصدی را به همراه دارد و ترمیم دو طرفه کاهش 66% را نتیجه می‌دهد. استفاده از وصله‌های فلزی نیز کاهش ضریب شدت تنش مود II را به دنبال خواهد داشت. مقادیر کاهش در تمامی زوایای ترک نسبت به وصله‌های کامپوزیتی بورن/اپوکسی کمتر و نسبت به وصله شیشه/اپوکسی بیشتر است.

شکل 18 تغییرات ضریب شدت تنش معادل را برحسب زوایای مختلف ترک در نمونه‌های ترمیم نشده و ترمیم شده با وصله‌های یک طرفه و دو طرفه را نشان می‌دهد. کاهش ضریب شدت تنش معادل برای تمام زوایای ترک مشهود است. این کاهش نسبت به استفاده از وصله‌های کامپوزیتی به مراتب کمتر است.

تغییرات تنش T در زوایای مختلف ترک برای نمونه‌های ترمیم نشده و ترمیم شده با وصله‌های یک و دو طرفه در شکل 19 نشان داده شده است. بیشترین کاهش تنش T در زاویه ترک 0 درجه و کم‌ترین کاهش قدرمطلق

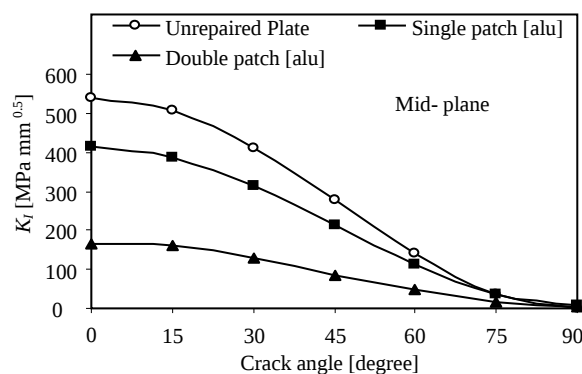


Fig. 16 The variation of K_I with crack angle for aluminum patch

شکل 16 تغییرات ضریب شدت تنش مود یک برحسب زاویه ترک وصله آلومینیومی

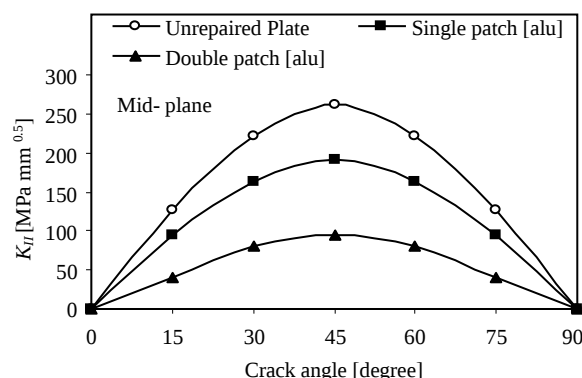


Fig. 17 The variation of K_{II} with crack angle for aluminum patch

شکل 17 تغییرات ضریب شدت تنش مود دو برحسب زاویه ترک وصله آلومینیومی

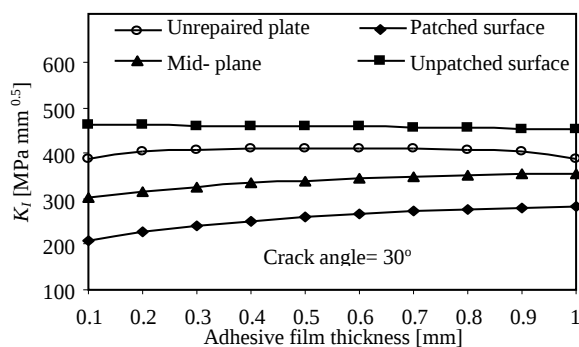


Fig. 22 The variation of K_I with respect to the adhesive film thickness

شکل 22 تغییرات ضرایب شدت تنش مود یک بر حسب ضخامت لایه چسب

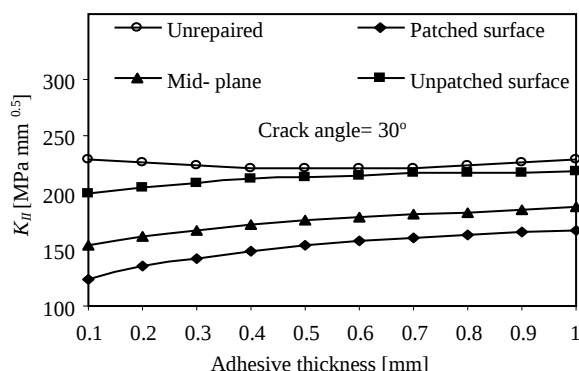


Fig. 23 The variation of K_{II} with respect to the adhesive film thickness

شکل 23 تغییرات ضرایب شدت تنش مود دو بر حسب ضخامت لایه چسب

نوع وصله متفاوت شامل کامپوزیتی الیافی و فلزی به صورت یک طرفه و دو طرفه و نیز نقش خمش خارج از صفحه در ترمیم با وصله‌های یک طرفه با استفاده از روش المان محدودی سه بعدی و با فرض غیرخطی بودن، تحت بارگذاری در مود ترکیبی و نیز لحاظ لایه چسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به طور خلاصه به صورت زیر است.

- تغییرات ضرایب شدت تنش در راستای ضخامت ورق با به کار بردن وصله‌های یک طرفه مشهود است.
- دو نمونه وصله کامپوزیتی بررسی و مشخص شد هرچه وصله به کار برده شده مستحکم‌تر باشد یعنی صلبیت بالاتری داشته باشد، کارایی ترمیم افزایش می‌یابد.
- استفاده از وصله‌های یک طرفه باعث خمش خارج از صفحه شده که نقش مهمی در عملکرد ترمیم دارد.
- افزایش ضخامت وصله موجب افزایش کارایی ترمیم می‌شود و در نقطه مقابل افزایش ضخامت لایه چسب مقادیر ضرایب شدت تنش بالاتر را نتیجه می‌دهد.
- استفاده از وصله‌های مختلف تأثیر زیادی بر اندازه تنش T داشته و این تأثیر در زاویه ترک 0 درجه بیشتر است.
- در زاویه ترک کم‌تر از 45 درجه نسبت به سایر زوایا تأثیر ترمیم بر تغییرات تنش T بیشتر است.

8- مراجع

- [1] A. Baker, Bonded composite repair of fatigue cracked primary aircraft structures, *Composite Structures*, Vol. 47, No. 1, pp. 431-35, 1999.
- [2] A. Baker, Fatigue cracked propagation studies on aluminum panels patched whit boron/epoxy composites, *International Conference on Aircraft Damage*

وصله در سه صفحه فاقد ترمیم، میانی و ترمیم شده نشان می‌دهد. هر چه از سطح ترمیم شده فاصله گرفته شود، تأثیر ضخامت وصله بر تغییرات ضرایب شدت تنش مشهودتر خواهد شد. نکته قابل تمایز در مود II شکست برای سطح فاقد ترمیم این است که ضخامت 0.5 تا 1.5 میلی‌متر عملکرد مشابه در کاهش ضریب شدت دارند. به عبارت دیگر انتخاب ضخامتی برای وصله‌های کامپوزیتی در بازه یادشده با توجه به نتایج به دست آمده از وصله ترمیم نشده عملکرد یکسان ترمیم را نتیجه می‌دهد که با توجه به اهمیت فاکتور وزن به ویژه در سازه‌های هوافضایی انتخاب وصله با ضخامت بهینه نقش بسیار مهمی خواهد داشت.

شکل‌های 22 و 23 تغییرات ضرایب شدت تنش مود I و II را در ضخامت‌های متفاوت لایه چسب برای صفحات فاقد ترمیم، میانی و ترمیم شده نشان می‌دهد. می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که افزایش استحکام ناشی از افزایش ضخامت لایه چسب نمی‌تواند بر عامل خمش خارج از صفحه غلبه کرده و در نتیجه عملکرد ترمیم با افزایش ضخامت لایه چسب تضعیف خواهد شد. نکته جالب این است که افزایش ضخامت لایه چسب در سطوح فاقد ترمیم تأثیر محسوسی بر تغییرات ضرایب شدت تنش مود I نداشته و در مود II شکست برای ضخامت‌های بالاتر از 0.5 میلی‌متر این موضوع رخ می‌دهد. از طرفی، تأثیر افزایش ضخامت لایه چسب بر تغییرات ضرایب شدت تنش در صفحات میانی و ترمیم شده برخلاف عامل افزایش ضخامت وصله مشهود است.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله تغییرات ضرایب شدت تنش در راستای ضخامت و عملکرد دو

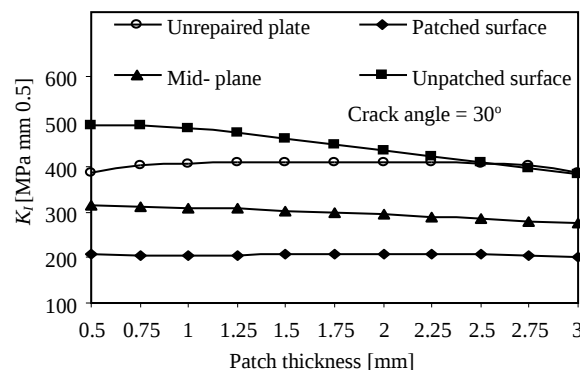


Fig. 20 The variation of K_I with respect to the patch thickness

شکل 20 تغییرات ضرایب شدت تنش مود یک بر حسب ضخامت وصله

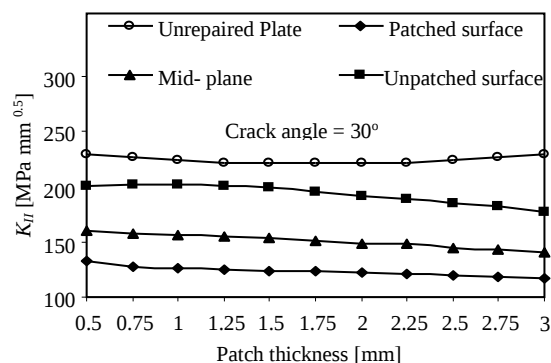


Fig. 21 The variation of K_{II} with respect to the patch thickness

شکل 21 تغییرات ضرایب شدت تنش مود دو بر حسب ضخامت وصله

- patch repairs of the plates, *Engineering Research and Application*, Vol. 7, No. 1, pp. 10-18, 2017.
- [20] G. H. Payganeh, F. Ashenai Ghassemi, A. Pourkamali Anaraki, A. Fallah Rahmatabadi, Numerical analysis for determination of the J integral and crack opening displacement in the cracked aluminum plates repaired with FML composite patches, *Applied Science*, Vol. 12, No. 21, pp. 2259-2265, 2012.
- [21] F. Ashenai Ghassemi, A. Pourkamali Anaraki, A. H. Rouzbahai, Using XFEM for investigating the crack growth of cracked aluminum plates repaired with fiber metal laminate (FML) patches, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 15-27, 2014. (in Persian فارسی)
- [22] F. Ashenai Ghassemi, E. Aligholizadeh Firozjaei, A. Pourkamali Anaraki, An experimental study of temperature effect on low-velocity impact response of notched aluminum plates repaired by FML composite patches, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 175-82, 2014. (in Persian فارسی)
- [23] F. Ashenai Ghassemi, Gh. Bagheri, A. Pourkamali Anaraki, experimental analysis of tensile strength of lateral notched aluminum plates reinforced by the fiber metal laminate (FML) Patches, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 1-8, 2015. (in Persian فارسی)
- [24] M. Ahmadi Najafabadi, H. 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 فارسی)
- [25] M. M. Mousavi Nasab, H. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. 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 فارسی)
- [26] C. H. Chue, J. C. Liu, The effects of laminated composite patch with different stacking sequences on bonded repair, *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 223-30, 1995.
- [27] M. A. Meggiolaro, A. C. O. Miranda, J. T. P. Castro, L. F. Martha, Stress intensity factors equations for branched crack growth, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, No. 3, pp. 127-135, 2005.
- [28] P. Paris, F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation law, *Fluids Engineering*, Vol. 85, No. 4, pp. 38-47, 1963.
- [29] M. L. Williams, On the stress distribution at the base of a stationary crack, *Applied Mechanics*, Vol. 24, No. 1, pp. 109-14, 1957.
- [30] D. Smith, M. Ayatollahi, M. Pavier, The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed mode loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24, No. 2, pp. 137-50, 2001.
- [31] G. S. Sih, *Handbook of Stress Intensity Factors*, pp. 126-151, Bethlehem, Institute of Fracture and Solid Mechanics, Lehigh University, USA, 1973.
- Assessment and Repair, University of Melbourne, Melbourne, Australia, June 9-11, 1991.
- [3] J. J. Denny, *Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel with Partially Bonded Composite Patch*, MSc Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology, USA, 1995.
- [4] J. Rayan, T. B. Mills, The effects of disbands on patching efficiency over thicker structure, *Proceedings of the 1998 USAF Structural Integrity Program Conference*, San Antonio, Texas, USA, April 2-5, 1998.
- [5] R. A. Mitchel, R. J. Woolley, D. J. chwirut, Analysis of composite reinforced cut-outs and cracks, *AAIA*, Vol. 13, No. 8, pp. 744-49, 1975.
- [6] R. Jones, R. J. Callinan, Finite element analysis of patched cracks, *Structure Mechanic*, Vol. 7, No. 2, pp. 107-30, 1979.
- [7] M. M. Ratwani, Analysis of cracked adhesively bonded laminated structures, *AAIA*, Vol. 17, No. 8, pp. 267-89, 1979.
- [8] Turaga, Ripudaman, Modeling of patch repairs to a thin cracked sheet, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 62, No. 4, pp. 267-89, 1999.
- [9] A. Bassetti, P. Colombia, A. Nussbaumer, Finite element analysis of steel members repaired by prestressed composite patch, *XV Congresso Nazionale Del Gruppo Italiano Fratture*, Bari, Italy, March 28-30, 2000.
- [10] B. B. Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode, *Composite Structures*, Vol. 56, No. 1, pp. 401-406, 2003.
- [11] K. H. Chung, W. H. Yang, mixed mode fatigue crack growth in aluminum plates, *Fatigue*, Vol. 125, No. 14, pp. 325-333, 2003.
- [12] H. Toudeshky, B. Mohammadi, A simple method to calculate the crack growth life of adhesively repaired aluminum panels, *Composite Structures*, Vol. 79, No. 3, pp. 234-41, 2007.
- [13] M. R. Ayatollahi, R. Hashemi, Mixed mode fracture in an inclined center crack repaired by composite patching, *Composite Structures*, Vol. 81, No. 3, pp. 264-73, 2007.
- [14] M. R. Ayatollahi, R. Hashemi, Computation of stress intensity factors (K_I , K_{II}) and T-stress for cracks reinforced by composite patching, *Composite Structures*, Vol. 78, No. 5, pp. 602-609, 2007.
- [15] M. Ramji, R. srilakshmi, Design of composite patch reinforcement applied to mixed mode cracked panel using finite element analysis, *Reinforced Plastics & Composite*, Vol. 31, No. 9, pp. 585-595, 2012.
- [16] F. Benyahia, A. Albedah, B. Bouiadjra, Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of aircraft structures, *Materials and Design*, Vol. 54, No. 1, pp. 18-24, 2014.
- [17] S. Y. W. Kwon, B. L. Hall, Analyses of cracks in thick stiffened plates repaired with single-sided composite patches, *Composite Structures*, Vol. 119, No. 8, pp. 727-37, 2015.
- [18] X. Zhang, H. Mingyong, Y. Liu, An analytical model and stress analysis of one-sided bonded composite patch to metal reinforcement, *Adhesion & Adhesives*, Vol. 25, No. 1, pp. 63-69, 2015.
- [19] C. Ramakrishna, J. Krishna, S. Raja, Finite element analysis of the composite



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)



کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو