

شکل بهینه‌ی وصله‌ی مواد مرکب در ترمیم چسبی نامتقارن

محمدعلی کوچک‌زاده (استادیار)

پرینسا قناتی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

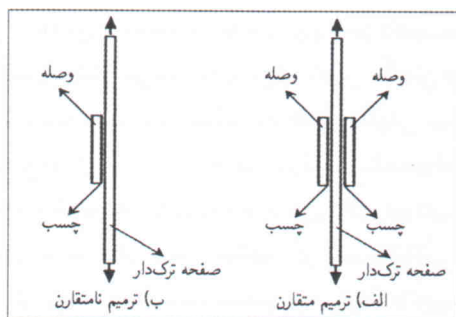
ترمیم چسبی ترک‌های موجود در سازه‌ی هواپیما به وسیله‌ی وصله‌ی مواد مرکب به دلیل مقاومت زیاد، وزن کم، سهولت و سرعت انجام کار، در دو دهه‌ی اخیر کاربرد زیادی پیدا کرده است. در این نوشتار با تحلیل دوبعدی یک ترمیم چسبی نامتقارن در یک صفحه‌ی آلومینیومی با ترک مرکزی که امتداد آن عمود بر جهت الیاف وصله و امتداد بار است، به روش اجزاء محدود، به جست‌وجوی شکل بهینه‌ی وصله با ضخامت ثابت پرداخته می‌شود. برای این منظور، وصله‌ی با حجم ثابت در اشکال مستطیل، بیضی و شش ضلعی با ابعاد متغیر مدل شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شش ضلعی شکل مناسبی برای وصله در ترمیم نامتقارن است.

مقدمه

اعمال شده را از ناحیه‌ی آسیب دیده انتقال می‌دهد و توسط این عنصر، جابه‌جایی نوک ترک محدود می‌شود. به این ترتیب ضریب شدت تنش به طور قابل توجهی افت می‌کند. روش ترمیم چسبی در مقایسه با روش‌های مکانیکی از قبیل پیچ و پرچ، بار انتقالی یکنواخت‌تر و مؤثرتری را از ناحیه‌ی اطراف ترک به وصله منتقل می‌کند و ضریب شدت تنش کم‌تری را به وجود می‌آورد. مقاومت در برابر خوردگی، سرعت و سهولت انجام ترمیم، دارا بودن انعطاف‌پذیری و نسبت استحکام به وزن بالای مواد مرکب از دیگر مزایای مهم این روش به شمار می‌آید. مطابق شکل ۱، ترمیم چسبی به لحاظ هندسی به دو دسته‌ی متقارن (یا اتصال دوطرفه) و نامتقارن (یا اتصال یک‌طرفه) تقسیم می‌شود. در حالت اول، دو تکه تقویت‌کننده از دو طرف به صفحه‌ی ترک‌دار متصل می‌شود. این نحوه‌ی قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها باعث می‌شود که وقتی صفحه‌ی ترک‌دار تحت بار کششی است، اجزاء ترمیم تنها تحت تنش کششی صفحه‌ی قرار بگیرند. اما در شرایط ترمیم نامتقارن که یک تکه تقویت‌کننده از یک طرف به صفحه‌ی ترک‌دار متصل می‌شود،

ترک ناشی از خستگی یکی از معایبی است که پس از پروازهای متعدد در سازه‌ی هواپیما به وجود می‌آید. از دیدگاه مکانیک شکست، به علت کارکرد و یا بارهای تناوبی، ترک ایجاد شده در قطعات با گذشت زمان رشد می‌کند.^[۱] استحکام سازه به واسطه‌ی وجود ترک، کم‌تر از استحکام اولیه می‌شود و بعد از مدت معینی قطعه تحمل بار را ندارد. اگر تعداد ترک‌ها کم، و طول آنها نسبت به اندازه‌ی کل سازه کوچک باشد، ترمیم آن نسبت به تعویض کل قطعه اقتصادی‌تر است. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از رشد ترک یا کاهش سرعت رشد آن وجود دارد. یکی از روش‌های ترمیم سازه‌های ترک‌دار هواپیما، استفاده از یک ورق (وصله) از جنس سازه‌ی اولیه در محل ترک، و اتصال آن به منطقه‌ی ترک‌دار توسط اتصالات مکانیکی (پیچ و پرچ) است.^[۲] این روش که ترمیم مکانیکی نام دارد، اولین روش ترمیم سازه‌های ترک‌دار هواپیما بوده که به صورت استاندارد از آن استفاده می‌شود.^[۳]

انجام این نوع ترمیم نیاز به سوراخ‌کاری سازه دارد و این امر خود باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شود که می‌تواند زمینه را برای به وجود آمدن ترک‌هایی در اطراف سوراخ‌ها، به دلیل خستگی، فراهم کند. علاوه بر این، طولانی بودن زمان ترمیم و خوردگی زیاد به دلیل نفوذ و باقی ماندن رطوبت بین وصله و صفحه‌ی ترک‌دار فلزی از معایب این روش به شمار می‌رود. در دو دهه‌ی اخیر، روش ترمیم چسبی کاربرد بیشتری در صنایع هوایی پیدا کرده است. در این روش وصله‌ی ساخته شده از مواد مرکب به عنوان تقویت‌کننده توسط چسب به ناحیه‌ی ترک‌دار صفحه متصل می‌شود. با کاربرد این روش، تقویت‌کننده مانند یک پل تنش



شکل ۱. نمای جانبی از صفحه‌ی تحت بار کششی ترمیم شده با وصله.

جابه‌جایی محور خنثی به ایجاد گشتاور خارج از صفحه می‌انجامد و صفحه‌ی ترمیم شده دچار خمش خارج از صفحه می‌شود. به همین دلیل، ترمیم نامتقارن نسبت به ترمیم متقارن، کارایی کم‌تری در جلوگیری از رشد ترک و کاهش سرعت رشد آن دارد. ولی چون اغلب دسترسی به قسمت‌های درونی سازه امکان‌پذیر نیست، استفاده از ترمیم نامتقارن رایج‌تر است.

صورت علمی طراحی و اجرای ترمیم سازه‌های هوایی در اوایل دهه‌ی هفتاد میلادی شروع شد. اولین پیشرو در این زمینه، آلن بیکر^[۳] در آزمایشگاه تحقیقات هوایی استرالیا، وابسته به نیروی هوایی سلطنتی این کشور بود. کالینان^[۴] و همکارانش از یک مدل کامل سه‌بعدی اجزاء محدود برای تحلیل ترمیم نامتقارن که به وسیله‌ی یک لایه ماده‌ی مرکب در یک سمت صفحه‌ی آلومینیومی ایجاد شده بود، استفاده کردند. رز^[۵] یک حل تحلیلی برای مسائل ترمیم ارائه کرد. سان^[۶] و همکارانش اثر خمش در ترمیم نامتقارن را با استفاده از المان صفحه‌ی میندیلین، به جای وصله و صفحه‌ی فلزی و المان فتر به جای لایه چسب، به روش اجزاء محدود بررسی کردند و ضرایب شدت تنش را با روش اصلاح شده‌ی بسته‌شدن نوک ترک محاسبه کردند. نولسی و مال^[۷] یک مدل اقتصادی مناسب دوبعدی به منظور تحلیل ترمیم نامتقارن ارائه کردند به طوری که هر سه لایه‌ی وصله، چسب و صفحه‌ی فلزی را با المان صفحه‌ی میندیلین مدل کردند. رناد و هانسن^[۸] از المان سه‌بعدی با سه درجه‌ی آزادی انتقالی به جای لایه‌ی چسب که بین المان‌های میندیلین وصله و صفحه‌ی فلزی قرار گرفته، استفاده کردند. تاکنون تلاش‌هایی برای بهینه‌سازی شکل هندسی وصله در ترمیم چسبی انجام شده است. کایا و هلر^[۹] به بهینه‌سازی در راستای ضخامت وصله و چسب با هدف کاهش جدایش ماده‌ی چسب، و به عبارت دیگر کاهش تنش برشی ماده‌ی چسب پرداختند. ماهادش کومار و حکیم^[۱۱] نیز به بررسی تأثیر ابعاد هندسی وصله در کاهش ضریب شدت تنش نوک ترک در ترمیم متقارن پرداختند.

تحقیقاتی که در مورد بررسی اثر ضخامت وصله در کارایی ترمیم چسبی انجام شده^[۱۱]، نشان می‌دهد که افزایش ضخامت وصله همواره باعث افزایش کارایی ترمیم - چه متقارن، چه نامتقارن - می‌شود. از طرفی با افزایش ضخامت وصله تنش ون میسر لایه‌ی چسب در لبه‌های اتصال افزایش می‌یابد. علت این امر کاهش ناگهانی ضخامت در لبه‌های وصله است. برای جلوگیری از کاهش ناگهانی ضخامت و افزایش سطح انتقال بار از چسب به وصله در لبه‌های ناحیه‌ی اتصال، در لبه‌های وصله ضخامت را با شیب به صفر می‌رسانند. این شیب ممکن است خطی یا غیرخطی باشد. چنانچه ذکر شد، تحقیقاتی به منظور بهینه‌کردن توزیع ضخامت وصله، به خصوص در لبه‌ها، یا نحوه‌ی شیب دادن به لبه‌های وصله با هدف کمینه کردن مقدار بیشینه‌ی تنش ون

میسز در لایه‌ی چسب انجام شده است. توزیع ضخامت بهینه‌ی وصله در لبه‌ها، بیشتر به بار اعمالی به سیستم ترمیم بستگی دارد تا به شکل و ابعاد وصله. در برخی تحقیقات انجام شده در این مورد نیز بهینه‌سازی در راستای ضخامت وصله به صورت دوبعدی انجام شده است.^[۱۰] با توجه به نکات ذکر شده، در این تحقیق، و با این فرض که توزیع ضخامت وصله تأثیر چندانی در تعیین شکل و ابعاد بهینه‌ی وصله ندارد، ضخامت وصله ثابت و یکنواخت فرض می‌شود و با استفاده از روش نولسی و مال برای تحلیل دوبعدی ترمیم نامتقارن، به بررسی اثر ابعاد هندسی وصله با ضخامت ثابت در کاهش ضریب شدت تنش نوک ترک در ترمیم نامتقارن پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی و تحلیل از کد المان محدود ANSYS به همراه قیدهای لازم برای مدل سه‌لایه‌ی استفاده شده است.

روش تحلیل

برای تحلیل ترمیم چسبی به روش اجزاء محدود باید از مدلی استفاده شود که تحت شرایط کارکرد، حتی الامکان رفتار واقعی سیستم ترمیم را به درستی شبیه‌سازی کند. انتخاب تکنیک مدل‌کردن بستگی به هندسه‌ی ترمیم و بارگذاری آن دارد. مشکلی که در مدل‌کردن ترمیم وجود دارد این است که حتی زمانی که صفحه‌ی ترک‌دار تحت بارگذاری صفحه‌ی قرار می‌گیرد باز هم تنش‌های سه‌بعدی پیچیده‌ی، به خصوص در ترمیم نامتقارن، ظاهر می‌شود که علت آن خمش ناشی از وجود وصله است.^[۶] اگرچه روش تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی اثرات خمش را پوشش می‌دهد، برای رسیدن به جواب دقیق در این روش باید از تعداد زیادی المان نازک در راستای ضخامت استفاده کرد که این نیز بهای زیادی می‌طلبد.^[۶]

در این تحقیق برای دست‌یابی به سرعت بالاتر و دقت قابل قبول، از روش سه‌لایه‌ی نولسی و مال^[۷] برای مدل‌کردن اجزاء ترمیم استفاده می‌شود. در مدل سه‌لایه‌ی هر سه جزء ترمیم، یعنی صفحه‌ی ترک‌دار فلزی، وصله‌ی ماده مرکب و چسب، با المان صفحه‌ی میندیلین مدل می‌شود. در نظریه‌ی صفحه‌ی میندیلین مطابق شکل ۲، میدان جابه‌جایی خطی در امتداد ضخامت صفحه در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، علاوه بر وارد شدن اثرات خمش در ترمیم نامتقارن، با در نظر گرفتن کرنش برشی عرضی γ_{xz} و γ_{yz} که در امتداد محور z ثابت فرض می‌شود، می‌توان از طریق تحلیل دوبعدی به جواب دقیق‌تری رسید. مطابق شکل ۳، چرخش‌های مربوط به هر لایه مستقل از دیگری در نظر گرفته شده و از معادلات قیدی برای ارضاء روابط سازگاری در مرز بین لایه‌ها استفاده می‌شود. در این مدل، هر المان از ۸ گره تشکیل شده و هر گره دارای ۶ درجه آزادی است. اگر \bar{U}_x و \bar{U}_y و \bar{U}_z به ترتیب جابه‌جایی‌ها در صفحه‌ی میانی المان در جهت x و y و z باشند،

محاسبه‌ی ضریب شدت تنش

در اغلب تحقیقات مربوط به ترمیم چسبی یک صفحه‌ی ترک‌دار، از ضریب شدت تنش نوک ترک به‌عنوان معیار مناسبی برای شناسایی چگونگی رشد ترک و فرایند شکست استفاده می‌شود.

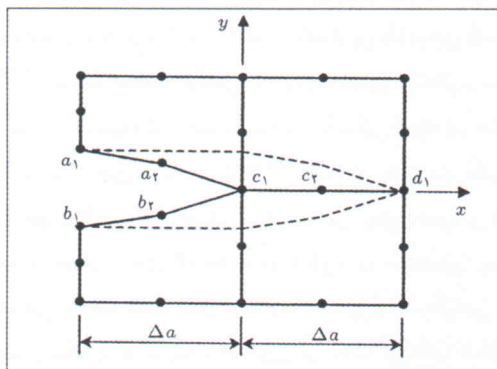
در این تحقیق، به‌دلیل شرایط بارگذاری و هندسه‌ی مدل، مود اول ضریب شدت تنش مدنظر است و روش اصلاح‌شده‌ی بسته‌شدن نوک ترک را برای محاسبه‌ی آن به‌کار می‌بریم. [۷۶] این روش که بر پایه‌ی نظریه‌ی ایروین استوار است، چنین بیان می‌کند که مطابق شکل ۴، کار لازم برای بستن نوک ترک از a به $a + \Delta a$ ، برابر با انرژی آزاد شده برای رشد آن از a به $a + \Delta a$ است. [۱۳ و ۱۴] در این روش برای محاسبه‌ی نرخ انرژی کرنشی آزاد شده باید المان‌های پشت و جلو نوک ترک مشابه هم باشند ولی نیاز به هم‌اندازه بودن آنها نیست. [۱۴] در این تحقیق برای سادگی محاسبات از المان‌های چهارگوش صفحه‌ی میندلین دارای ۸

گره که در اطراف ترک مربع‌های هم‌اندازه‌اند، استفاده شده است. مطابق شکل ۴، نوک ترک در نقطه‌ی c_1 است و سپس به اندازه‌ی Δa تا نقطه‌ی d_1 باز می‌شود. اگر Δa کوچک باشد، فرض می‌شود که اندازه‌ی باز شدن ترک در مسیر c_1 تا d_1 که با خط چین نشان داده شده است، مانند اندازه‌ی باز شدن ترک در فاصله‌ی Δa جلو نوک ترک یعنی a_1 تا c_1 است. در این صورت، نرخ آزادی انرژی کرنشی به‌هنگام باز شدن از c_1 تا d_1 برابر است با کار انجام شده توسط نیروها و ممان‌های گره‌های c_1 و c_2 برای بستن جابه‌جایی‌ها و چرخش‌های گره‌های a_1 و a_2 و b_1 و b_2 . به‌این ترتیب نرخ انرژی کرنشی آزاد شده در جهت رشد مود اول از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید: [۱۵]

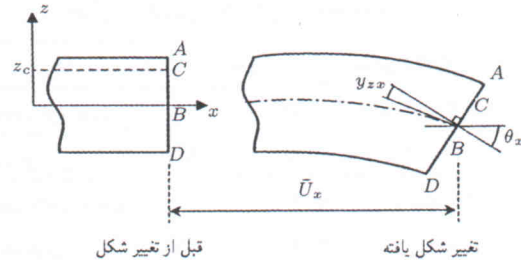
$$G_I = G_I^U + G_I^\theta$$

$$G_I^U = \frac{1}{2\Delta a} \sum_{i=1}^2 [F_y^{c_i} (U_y^{a_i} - U_y^{b_i})]$$

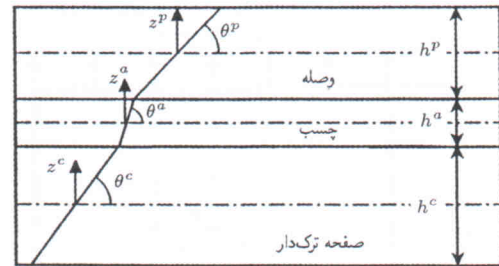
$$G_I^\theta = \frac{1}{2\Delta a} \sum_{i=1}^2 [M_x^{c_i} (\theta_y^{a_i} - \theta_y^{b_i})] \quad (4)$$



شکل ۴. شکل المان‌ها در نوک ترک.



شکل ۲. جابه‌جایی نقاط در راستای ضخامت در صفحه‌ی میندلین.



شکل ۳. اتصال بین لایه‌های صفحه‌ی ترک‌دار، چسب و وصله ماده مرکب.

مطابق نظریه‌ی صفحه میندلین خواهیم داشت:

$$U_x = \bar{U}_x + z\theta_x$$

$$U_y = \bar{U}_y - z\theta_y$$

$$U_z = \bar{U}_z \quad (1)$$

لازم به‌ذکر است که کمیت z ، مؤلفه‌ی موقعیت در جهت ضخامت هر لایه بوده که در وسط لایه $z = 0$ است و θ_x و θ_y چرخش سطح مقطع حول محورهای x و y هستند. در مرز بین لایه‌ی چسب و صفحه‌ی فلزی معادلات قیدی جابه‌جایی که مؤلفه‌های جابه‌جایی در مرز بین لایه‌ها را مساوی هم قرار می‌دهد، به‌صورت زیر خواهد بود:

$$U_x^a = U_x^c$$

$$U_y^a = U_y^c$$

$$U_z^a = U_z^c \quad (2)$$

توان a, c به‌ترتیب مربوط به صفحه‌ی فلزی و چسب است. در مرز بین لایه‌ی چسب و وصله نیز روابط به‌صورت زیر می‌شود:

$$U_x^a = U_x^p$$

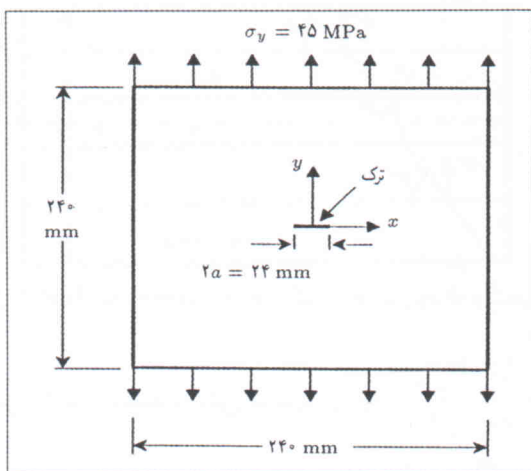
$$U_y^a = U_y^p$$

$$U_z^a = U_z^p \quad (3)$$

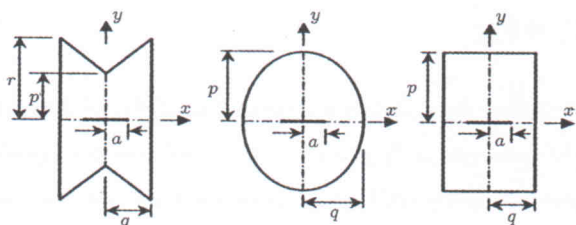
توان p نیز نشان‌دهنده‌ی وصله است.

جدول ۱. خواص مکانیکی و ضخامت اجزاء.^[۸]

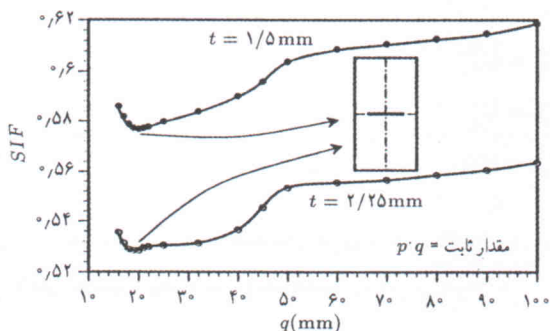
خواص مکانیکی	ضخامت (mm)	لایه
$E = 71/709 \text{ GPa}, \nu = 0/23$	۳	صفحه‌ی آلومینیومی
$E = 2/158 \text{ GPa}, \nu = 0/25$	۰/۲۵	چسب اپوکسی
$E_1 = 135, E_T = E_r = 9 \text{ GPa}$		وصله‌ی ماده‌ی مرکب
$G_{rr} = 8, G_{1r} = G_{1z} = 5 \text{ GPa}$	۲/۲۵	با الیاف کربن
$\nu_{rr} = 0/02, \nu_{1r} = \nu_{1z} = 0/3$		(CFRP)



شکل ۵. هندسه‌ی صفحه‌ی ترک‌دار آلومینیومی تحت بار کششی یکنواخت.



شکل ۶. هندسه‌ی وصله در شکل‌های مستطیل، بیضوی و شش ضلعی.



شکل ۷. تغییرات ضریب شدت تنش با تغییر طول ضلع موازی با ترک در وصله‌ی مستطیلی با حجم ثابت.

ضریب شدت تنش نوک ترک در صفحه‌ی میانی المان محاسبه و با استفاده از رابطه‌ی ۷ بی‌بعد شده است:

در روابط ۴، U_y و θ_y به ترتیب، جابه‌جایی در جهت y و چرخش حول محور x بوده و F_y و M_x نیز به ترتیب نیرو در جهت y و ممان حول محور x است.

برای یک ترمیم متقارن، ترم چرخشی انرژی کرنشی وجود ندارد و با فرض تنش صفحه‌ی رابطی بین ضریب شدت تنش و انرژی چنین است:

$$K_I = \sqrt{\frac{G_I^U E_c}{t_c}} \quad (5)$$

که در آن، E_c و t_c به ترتیب مدول الاستیسیته و ضخامت صفحه‌ی ترک‌دار هستند. در این حالت فرض می‌شود که ضریب شدت تنش در راستای ضخامت صفحه‌ی ثابت است. در ترمیم نامتقارن، به دلیل وجود خمش، ترم چرخشی انرژی کرنشی وجود دارد و سان^[۱۵] رابطه‌ی برای توزیع ضریب شدت تنش در راستای ضخامت صفحه‌ی میندلین، که تحت خمش قرار گرفته، ارائه داده است. در این رابطه، ضریب شدت تنش به صورت خطی در راستای ضخامت تغییر می‌کند و از مقدار بیشینه‌ی خود در سطح آزاد (بدون وصله) به مقدار کمینه‌اش در سطح ترمیم شده می‌رسد.

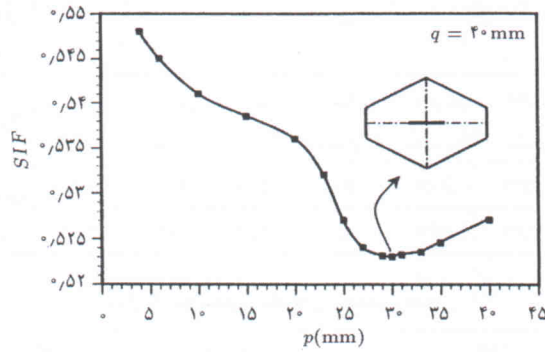
از آنجا که فرض تنش صفحه‌ی در ترمیم نامتقارن درست نیست، اطراف ترک در حالت کرنش صفحه‌ی فرض می‌شود^[۱۶] و لذا رابطه‌ی ضریب شدت تنش و انرژی به صورت رابطه‌ی ۶ خواهد بود:

$$K_I = \sqrt{\frac{G_I^U E_c}{(1-\nu^2)t_c}} - \frac{2z}{t_c} \sqrt{\frac{3G_I^\theta E_c}{t_c}} \quad (6)$$

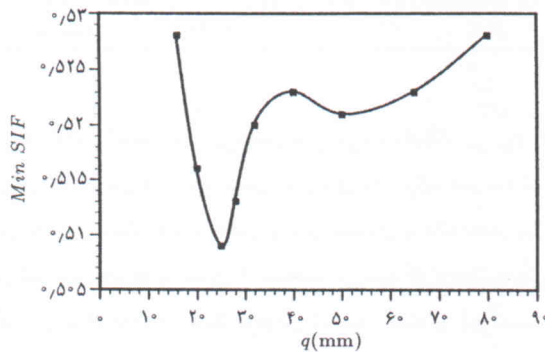
در رابطه‌ی بالا z در وسط صفحه برابر صفر، و در سطح آزاد برابر $\frac{t_c}{4}$ است، و ν نیز ضریب پواسون صفحه‌ی ترک‌دار است.

تعریف مدل

مدل تحلیل شده در این تحقیق، یک صفحه‌ی آلومینیومی با ترک مرکزی است که مطابق شکل ۵، تحت تنش کششی یکنواخت ۴۵MPa قرار گرفته و وصله‌ی ماده‌ی مرکب از جنس الیاف کربن با زمینه‌ی پلاستیک (CFRP) توسط چسب اپوکسی بر روی ناحیه‌ی ترک‌دار و در یک سمت صفحه چسبیده شده است. خواص مکانیکی اجزاء در جدول ۱ داده شده است. طول ترک برابر ۲۴mm است که به صورت افقی قرار گرفته و جهت الیاف در وصله، در امتداد بار، یعنی عمود بر امتداد ترک است. مطابق شکل ۶، وصله در شکل‌های مستطیل، بیضی و شش‌ضلعی با ابعاد متغیر مدل شده است. تغییر ابعاد به‌گونه‌ی است که حجم وصله، یا به عبارت دیگر، وزن آن ثابت می‌ماند. شکل‌های ۷ تا ۱۲ نشانگر نتایج به دست آمده‌اند. لازم به ذکر است که مقدار



شکل ۱۱. تغییرات ضریب شدت تنش با تغییر طول بعد p در وصله‌ی شش ضلعی با حجم ثابت و $q = 40 \text{ mm}$.



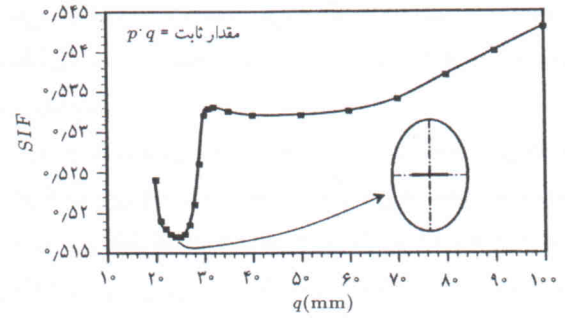
شکل ۱۲. مقادیر کمترین ضریب شدت تنش با تغییر طول بعد موازی ترک در وصله‌ی شش ضلعی با حجم ثابت.

شده نوک ترک مطابق روش شرح داده شده، برای یک مدل ترمیم چسبی نامتقارن با ترک مرکزی و تحت بار کششی یکنواخت عمود بر امتداد ترک محاسبه شده و مقدار حاصل با مقادیر ضریب شدت تنش به دست آمده در تحقیق‌های دیگر برای مدل مزبور مقایسه شده است. [۶-۱۶] ابعاد هندسی و خواص مواد در مدل مزبور، در هرکدام از منابع مذکور قابل دستیابی است. در این مدل طول ترک برابر 5 mm بوده و شکل وصله، مستطیلی و الیاف آن عمود بر امتداد ترک است.

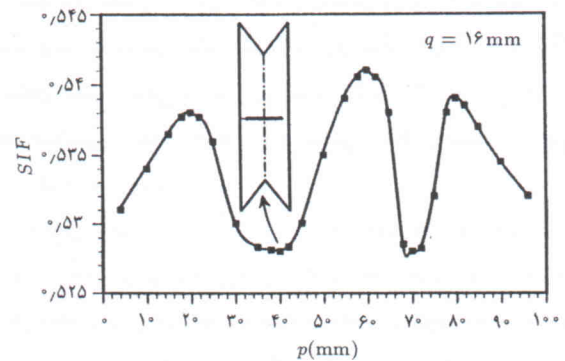
برای آزمون همگرایی، مقدار ضریب شدت تنش بی‌بعد شده نوک ترک، در مود اول و در سطح میانی، در تعداد المان‌های متفاوت محاسبه شده است. با افزایش تعداد المان‌ها، اندازه‌ی المان‌های نوک ترک یعنی Δa ، ریزتر شده است (جدول ۲). از آنجا که مطابق تئوری ترک، مقدار

جدول ۲. نتایج آزمون همگرایی

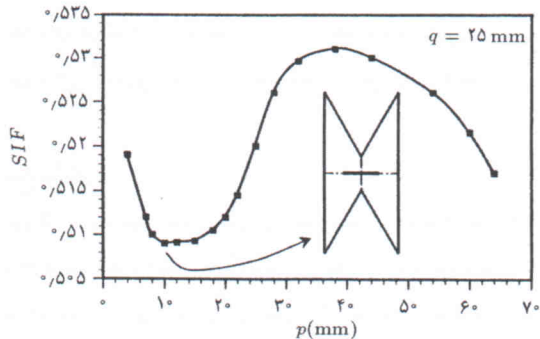
تعداد المان	۱۲۰	۶۲۴	۱۵۴۸	۲۶۴۹	۳۷۵۰	۴۱۵۰
$\Delta a(\text{mm})$	۶	۴	۳	۱٫۵	۱	۰٫۷۵
SIF	۰٫۴۹۱	۰٫۴۸۹	۰٫۵۴۵	۰٫۵۳۹	۰٫۵۳۱	۰٫۵۲۹



شکل ۸. تغییرات ضریب شدت تنش با تغییر قطر موازی با ترک در وصله‌ی بیضوی با حجم ثابت.



شکل ۹. تغییرات ضریب شدت تنش با تغییر طول بعد q در وصله‌ی شش ضلعی با حجم ثابت و $q = 16 \text{ mm}$.



شکل ۱۰. تغییرات ضریب شدت تنش با تغییر طول بعد p در وصله‌ی شش ضلعی با حجم ثابت و $q = 25 \text{ mm}$.

$$SIF = \frac{K_I}{\sigma_y \sqrt{\pi a}} \quad (7)$$

در این رابطه، a نصف طول ترک است. به دلیل تقارن نسبت به محور افقی و عمودی، فقط ربع کل صفحه‌ی ترمیم شده مدل شده است.

اعتبارسنجی و آزمون همگرایی

در این تحقیق برای بررسی اعتبار روش مدل‌سازی و تحلیل به‌کار گرفته شده که بر اساس روش سه‌لایه‌یی و با استفاده از کد المان محدود ANSYS انجام شده است، مقدار ضریب شدت تنش بی‌بعد

جدول ۳. مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش بی بعد شده در سطح میانی و آزاد

SIF	مدل سه لایه‌یی [۷]	مدل نظری [۱۶]	روش مدل فنر [۶]	مدل سه بعدی [۶]	مدل شبه مدل سه بعدی [۸]	تحقیق حاضر
میانی	۰٫۵۷۰	۰٫۴۸۱	۰٫۵۳۶	۰٫۶۱۲	۰٫۶۰۶	۰٫۵۲۹
آزاد	۰٫۹۸۲	۰٫۹۰۲	۰٫۹۵۳	۰٫۹۸۵	۰٫۹۹۷	۰٫۹۴۹

جدول ۴. مقایسه‌ی شکل‌های مختلف وصله.

شکل وصله	اندازه (mm)	حجم (mm ^۳)	SIF
شش ضلعی	$p = ۱۰, q = ۲۵$	۷۲۰۰	۰٫۵۰۹
بیضی	$q = ۲۵$	۷۲۰۰	۰٫۵۱۷
مستطیل	$q = ۲۰$	۷۲۰۰	۰٫۵۲۸

تنش در نوک ترک به سمت بی نهایت میل می‌کند، انتظار می‌رود که با افزایش تعداد المان‌ها و ریزتر شدن المان‌های نوک ترک، ضریب شدت تنش، به دلیل افزایش دقت تحلیل، با سیر صعودی به یک مقدار بیشینه میل کند. ولی با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که نحوه‌ی همگرایی با افزایش تعداد المان‌ها، کاملاً صعودی نیست. علت این امر آنست که در حالت ترمیم شده، با افزایش تعداد المان‌ها، علاوه بر بالا رفتن دقت تحلیل که باعث افزایش ضریب شدت تنش می‌شود، تعداد قیدهایی که باعث اتصال اجزاء ترمیم می‌شوند نیز افزایش یافته و در نتیجه انتقال بار از صفحه‌ی ترک‌دار به وصله، در مدل اجزاء محدود، بیشتر و بهتر صورت می‌گیرد و باعث کاهش ضریب شدت تنش می‌شود. علت دیگر این امر، غیرهمسان بودن مواد تشکیل دهنده مدل در حالت ترمیم یافته است. در جدول ۳ مقدار SIF در سطح میانی و سطح آزاد صفحه‌ی ترک‌دار، به دست آمده از این تحقیق و دیگر مقالات مقایسه شده است.

نتایج

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات ضریب شدت تنش را با تغییر طول q در صفحاتی با وصله‌ی مستطیلی و بیضوی نشان می‌دهد. برای نشان دادن اثر ضخامت وصله، وصله‌ی مستطیلی در دو ضخامت کم و زیاد مدل شده است. مقایسه‌ی منحنی‌های شکل ۷ مؤید مطالب اخیر در مورد اثر ضخامت وصله در کارایی ترمیم است. تحقیق اخیر [۱۷] در مورد بررسی اثر شکل و ابعاد هندسی وصله در کارایی ترمیم چسبی نامتقارن نشان داده بود که در وصله‌ی مستطیلی و بیضوی با تغییر یکی از طول‌های p و q ، و ثابت ماندن دیگری ضریب شدت تنش به طور نوسانی کم و زیاد می‌شود و حالت بهینه برای یک وصله‌ی مستطیلی و بیضوی، زمانی است که طول p و q تقریباً مساوی باشند. ولی

منحنی‌های شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهد که حالت بهینه برای وصله‌ی مستطیلی و بیضوی با حجم ثابت زمانی است که طول q تقریباً مساوی طول ترک باشد.

برای وصله‌ی شش ضلعی نیز تغییرات ضریب شدت تنش به ازای مقادیر ثابت طول q و با تغییر طول p ، به گونه‌یی که حجم وصله ثابت بماند (با تغییر طول بعد p ، طول بعد r نیز تغییر می‌کند و $r + p$ ثابت می‌ماند) بررسی می‌شود. در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز سه نمونه از این منحنی‌ها نشان داده شده است. این منحنی‌ها نیز رفتار نوسانی دارند ولی هر کدام یک مقدار بهینه برای طول p می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌شود برای مقدار کم طول q که بازه‌ی تغییرات طول p بزرگ‌تر است تعداد نوسانات منحنی بیشتر است. بر روی شکل‌های ۹ تا ۱۱ شکل وصله‌ی شش ضلعی که کم‌ترین ضریب شدت تنش را می‌دهد، با ابعاد متناسب با مقادیر p ، q و r و متناظر با نقطه‌ی کمینه‌ی منحنی نشان داده شده است.

منحنی شکل شماره‌ی ۱۲ مقادیر کمینه‌ی ضریب شدت تنش به دست آمده از این منحنی‌ها را با تغییر مقدار ثابت طول q متناظر با هر منحنی نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار کمینه‌ی ضریب شدت تنش زمانی است که مقدار ثابت طول q تقریباً مساوی طول ترک باشد.

در جدول ۴ کم‌ترین مقدار ضریب شدت تنش به ازای حجم ثابت وصله برای هر شکل آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، وصله‌ی شش ضلعی کم‌ترین مقدار ضریب شدت تنش را می‌دهد.

جمع بندی

به طور کلی در ترمیم چسبی افزایش بعد وصله در امتداد محور x ، یعنی امتداد ترک، باعث انتقال بار کششی از نواحی بالای ترک به دو سمت ترک می‌شود، و این امر از باز شدن ترک می‌کاهد. برعکس، افزایش بعد وصله در امتداد محور y (یعنی امتداد عمود بر ترک) باعث تمرکز بار انتقالی در نواحی بالای ترک و در نتیجه افزایش ضریب شدت تنش می‌شود. از طرف دیگر، در ترمیم چسبی نامتقارن به ازای مقدار ثابت بعد y ، افزایش بعد x باعث افزایش خمش و در نتیجه افزایش ضریب شدت تنش می‌شود. ولی به ازای مقدار ثابت بعد x ، افزایش بعد y ، باعث کاهش خمش و در نتیجه کاهش ضریب شدت تنش می‌شود. بنابراین تداخل این دو اثر باعث می‌شود که منحنی‌ها رفتار نوسانی داشته باشند. [۱۷] ولی مطابق نتایج به دست آمده می‌توان گفت حالت بهینه برای وصله‌ی با حجم ثابت زمانی است که طول بعد وصله در امتداد ترک تقریباً دو برابر طول ترک باشد و از بین اشکال هندسی بررسی شده، شکل شش ضلعی شکل مناسبی برای وصله در ترمیم نامتقارن است.

منابع

1. Forrest, P.J. *Fatigue of Metals*, Addison-Wesley, Reading, Mass, (1962).
 2. Domazet, and Zljko, "Compartion of fatigue crack retardation methods," *Engineering Failure Analysis*, **3** (2) pp137-147(1996).
 3. Baker, A.A., and Jones, R., *Bonded Repair of Aircraft Structures*, Martinus-Nijhoff Publishers, the Netherlands (1988).
 4. Callinan, R.J., Rose, L.R.F. and Wang, C.H. "Three dimensional stress analysis of crack patching", *Advances in Fracture Research*, **4**, pp. 2151-2158 (1997).
 5. Rose, L.R.F., "A cracked plate repaired by bonded reinforcements", *Int. J. Fracture*, **18** (2), pp.135-144.
 6. Sun, C.T., Klug, J.C., and Arent, C. "Analysis of a cracked aluminum plate repaired with composite patches", *AIAA Journal* **34** (2), pp. 369-374 (1996).
 7. Naboulsi, S., and Mall, S. "Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch using three layer technique", *Composite Structures*, **35**, pp. 95-308 (1996).
 8. Renaud, G., and Hansen, J.S. "A quasi- three-dimensional model for cracked structure repaired with composite patches", *Canadian Aeronautics and Space Journal*, **45** (2), pp.90-98 (1999).
 9. Kaye, R.H., and Heller, M. "Through- thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **22**, pp. 7-21 (2002).
 10. Heller, M., and Kye, R.H. "Computational shape optimization of bonded repairs,;; 6th joint FAA/DOD/NASA again aircraft conference-Sept.16-19 (2002).
 11. Mahadesh Kumar, A., and Hakeem, S.A., "Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet", *Composite Structures*, **49**, pp. 285-292 (2000).
 12. Renaud, G., and Hansen, J.S., "Shape optimization of a composite patch repair", *Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, **93**, pp. 327-333 (Nov.1989).
 13. Jin, C.J., and Sun, C.T. "Evaluation of finite elements based crack-closure method for calculation statics and dynamics strain energy release rates", *Engineering Fracture Mechanics*, **37**, (2) pp313-322 (1990).
 14. Rybicki, E.F., and Kanninen, M.F., "A Finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral," *Engineerin Fracture Mechanics*, **9**, pp. 931-938 (1997).
 15. Young, M.J., and Sun, C.T., "On the strain energy release rate for a cracked plate subjected to out-of plane bending moment", *Int. J. Fracture*, **60**, pp.227-247 (1993).
 16. Chue, C.H., Change, L.C., and Tsai, J.S. "Bonded repair of a plate with central inclined crack under biaxial loading", *Composite Structures*, **28**, pp39-45 (1994)
۱۷. کوچک‌زاده، محمدعلی. و قناتی، پریسا. «بررسی اثر پارامترهای هندسی در عملکرد ترمیم چسبی نامتقارن»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی و پنجمین کنفرانس سراسری انجمن هوافضای ایران، اصفهان، صص. ۴۶۵-۴۷۴، بهمن (۱۳۸۲).

