

## مطالعه عددی عوامل موثر ناشی از وصله کامپوزیتی بر افزایش عملکرد استوانه حاوی ترک نیم‌بیضی

سید مهدی نبوی\*

مجید جمال‌امیدی

حامد شریفی

استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله تأثیر وصله کامپوزیتی برای ترمیم لوله‌ی استوانه‌ای حاوی ترک سطحی تحت فشار داخلی با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. لوله استوانه‌ای، حاوی ترک نیم‌بیضی محیطی خارجی بوده و محدوده‌ی نسبت ابعادی ترک بین ۰/۲ تا ۱ و عمق نسبی آن ۰/۲ و ۰/۸ می‌باشد. ابتدا به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، استوانه‌ی حاوی ترک سطحی تحت کشش یکنواخت شبیه‌سازی و نتایج حاصل با داده‌های موجود مقایسه شده است. ضرایب شدت تنش در نوک ترک با استفاده از انتگرال  $J$  تعیین شده است. سپس به ترمیم استوانه ترک‌دار تحت فشار داخلی با استفاده از وصله کامپوزیتی به صورت موضعی پرداخته شده است. در این راستا به منظور انتخاب وصله مناسب، تأثیر پارامترهای مختلف مانند طول، پهنا، ضخامت، جنس و زاویه‌ی قرارگیری الیاف چند لایه‌ی کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش ارزیابی شده است. نتایج تحقیق کاهش به میزان ۳۰ درصد را در میزان ضریب شدت تنش با استفاده از وصله گذاری مناسب نشان داده است. این امر سبب افزایش طول عمر به دلیل کاهش نرخ رشد ترک می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ترک نیم‌بیضی محیطی، ضریب شدت تنش، ترمیم کننده‌ی کامپوزیتی، روش اجزاء محدود سه بعدی.

## Numerical Study of Effective Factors Caused by Composite Patch on Increasing the Performance of Semi-Elliptical Cracked Cylinder

S. M. Nabavi

Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

M. Jamal-Omidi

Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

H. Sharifi

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

In this paper, the effect of composite patch on reinforcement of cylindrical tube containing a surface crack under internal pressure is investigated using a three dimensional finite element method. The cylindrical tube contains an external circumferential semi-elliptical crack and the aspect ratio of the cracks is between 0.2 and 1 and its relative depths are 0.2 and 0.8. In order to ensure the accuracy of modelling, first, a cylinder containing a surface crack is simulated under uniform tension loading and the results are compared with the available data. The stress intensity factor at the crack tip is determined using the  $J$ -integral. Then, the cracked cylinder under internal pressure is repaired using topical composite patch. In this regard, in order to select the appropriate patch, the effect of different parameters such as length, width, thickness, material and angle of composite multi-layer fibers on the stress intensity factors are examined. The results indicate that the stress intensity factors can decrease about 23% by using the appropriate patches which caused the increase of fatigue life due to the decrease of fatigue crack growth rate.

**Keywords:** Circumferential semi-elliptical crack, Stress intensity factor, Composite repair, 3D finite element method.

می‌باشد. در این روش نیاز به توقف فرآیند انتقال سیال و خارج شدن از وضعیت عملیاتی وجود ندارد. همچنین در این روش مانند روش ترمیم فلزی، ریسک ایجاد ترک در نواحی اتصال لوله (جوش) وجود ندارد. این روش ۲۴٪ مقرون به صرفه‌تر از جوش دادن و ۷۳٪ مناسب‌تر از تعویض می‌باشد [۴].

کارهای تحقیقاتی مختلفی در زمینه‌ی وجود ترک در استوانه و بررسی آن ارائه شده است. در برخی مقاله‌ها، ترک نیم‌بیضی محیطی در جداره بیرونی استوانه مورد بررسی قرار گرفته است. شاهانی و حبیبی [۵] ترک نیم‌بیضی در سطح خارجی استوانه‌ای توخالی را با استفاده از روش اجزاء محدود مدل نمودند. در آن تحقیق، ترک تحت مد ترکیبی ناشی از نیروی محوری، گشتاور خمشی و پیچشی قرار دارد. کارپینتری و همکارانش [۶ و ۷]، ترک سطحی محیطی در لوله

### ۱- مقدمه

قطعات و تجهیزات فراوانی در صنعت دارای شکل هندسی استوانه‌ای هستند. لوله‌ها، مخازن تحت فشار، سیلندرهای هیدرولیک از جمله‌ی این قطعات می‌باشند. به دلیل خوردگی و یا بارگذاری خستگی در نقاط بحرانی سازه، امکان پدیدار شدن ترک وجود دارد که منجر به وجود ریسک نشستی، انفجار، آسیب‌های ایمنی و محیط زیستی و در نهایت هزینه‌های سرسام‌آور می‌گردد [۱]. از این‌رو روش‌های مختلف پایش وضعیت و آزمون‌های غیرمخرب جهت کشف ترک به کار برده می‌شود [۲]. بعد از عیب‌یابی مهمترین موضوع نحوه ترمیم آن می‌باشد. معمولاً جهت رفع این مشکل، قسمت آسیب دیده تعویض و یا با استفاده از وصله فلزی یا کامپوزیتی ترمیم می‌شود [۳]. ترمیم با وصله کامپوزیتی مقرون به صرفه‌تر از تعویض قسمت آسیب دیده

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nabavi@mut.ac.ir

نفوذ کرده است. وو و همکارانش [۲۱] با استفاده از روش بسته شدن دهانه‌ی ترک (VCCT) به بررسی رفتار لوله‌ی حاوی ترک محیطی راه به در ترمیم شده با وصله‌ی کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی پرداختند. نبوی و همکارانش [۲۲] به ارزیابی ترک محیطی داخلی سرتاسری تقویت شده با کامپوزیت دور تا دور با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته‌اند. زرین‌زاده و همکارانش [۲۳ و ۲۴] به بررسی رفتار خستگی لوله‌ی آلومینیومی حاوی ترک راه به در محیطی ترمیم شده با وصله‌ی کامپوزیتی موضعی شیشه/اپوکسی پرداختند. برای این منظور با استفاده از روش XFEM و تست تجربی رشد ترک ناشی از بارگذاری محوری نوسانی را پس از ترمیم با در نظر گرفتن اثر المان چسب و جدایش آن ارزیابی نمودند.

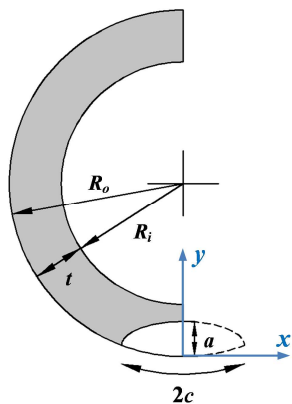
همانگونه که ملاحظه می‌شود، تحلیل‌های صورت گرفته در ترمیم لوله‌های ترک‌دار با استفاده از کامپوزیت‌ها، به دو بخش کلی دسته‌بندی می‌شود. در بخش اول تمرکز بر مدل‌سازی و تحلیل ترک نیم‌بیضوی تحت انواع بارهای اعمالی می‌باشد و در دسته‌ی دوم که مبتنی به استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی است، ترک ساده‌سازی شده و بیشتر به صورت راه به در و تمام عمقی در نظر گرفته شده و بر روی کامپوزیت متمرکز می‌شوند. ترک‌های سطحی که معمولاً در اثر خوردگی یا بارگذاری خستگی ایجاد می‌شوند در ابتدا ماهیت نامنظم داشته و به مرور زمان به سمت شکل نیم‌بیضوی میل می‌کنند. از این‌رو تحلیل این نوع ترک‌ها اهمیت فراوانی پیدا می‌نماید. از طرف دیگر تحلیل این نوع ترک‌ها در استوانه‌ها به دلیل انحنای جبهه‌ی ترک از منظر حل‌های نرم‌افزاری پیچیده و زمان‌بر است. همچنین در مواردی که دسترسی آزاد به دور تا دور لوله میسر نباشد استفاده از وصله‌ی موضعی گریزناپذیر است. بنابراین بر حسب نوع الزامات کاربردی مدل‌سازی ترک و وصله صورت می‌گیرد. در مقاله حاضر استوانه حاوی ترک نیم‌بیضوی در سطح خارجی و در راستای محیطی تحت شرایط بارگذاری کشش محوری و فشار داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نوع ترک عملاً نشی در لوله وجود ندارد و جبهه‌ی ترک به صورت نیم‌بیضوی و منحنی در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی استوانه حاوی ترک با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی و استفاده از المان‌های تکین [۲۵] در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶.۱۴ انجام شده است. پس از صحت‌سنجی روند مدل‌سازی با نتایج موجود در حالت خاص بارگذاری (کشش محوری) و اطمینان از همگرایی و دقت المان بندی، لوله ترک‌دار با شرایط بارگذاری فشاری شبیه‌سازی و با استفاده از وصله‌ی موضعی کامپوزیتی محل ترک ترمیم شده است. انتخاب این وصله نسبت به نوع دور تا دوری آن به تبع، صرفه‌جویی در مصرف مواد را به همراه دارد. چسب به صورت یک ماده‌ی همسانگرد مدل‌سازی می‌گردد و از تخریب و آسیب آن صرف‌نظر شده است. در فرآیند تحقیق تغییرات ضرایب شدت تنش به عنوان پارامتر ارزیابی ترک نسبت به تغییر ضخامت، پهنا و جنس لایه‌های کامپوزیتی و محدوده‌ی زاویه‌ی نصب ترمیم در محدوده‌ی وسیعی از تغییرات نسبت ابعادی ( $0.2 \leq a/c \leq 1.0$ ) و عمق نسبی ترک ( $0.18 \leq a/t \leq 0.2$ ) ارزیابی شده است. نتایج نشان داد امکان انتخاب ابعاد مناسب وصله‌ی کامپوزیتی به منظور صرفه‌جویی در مصرف مواد با رویکرد بیشترین کاهش ضرایب شدت تنش میسر است.

تحت بار سیکنی محوری را مورد بررسی قرار دادند. بیشترین مقدار ضریب شدت تنش در عمیق‌ترین نقطه ترک بدست آمده است. در مقاله‌ی دیگری پردن و همکارانش [۱۸]، ضرایب شدت تنش را برای ترک نیم‌بیضوی در استوانه توخالی و تحت پیچش خالص و در مُد ترکیبی با روش اجزاء محدود محاسبه نمودند. در کار خرمی‌شاد و آیت‌اللهی [۹]، لوله مدفون حاوی ترک نیم‌بیضوی در سطح خارجی و در راستای طولی با استفاده از روش اجزاء محدود مدل شده است. ضرایب شدت تنش برای ترک سطحی نیم‌بیضوی در مخازن تحت فشار با استفاده از روش المان محدود موضعی/کلی (global-local finite element) توسط دایمنتودیس و همکارانش [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. دائو و همکارانش [۱۱] به مطالعه ضرایب شدت تنش نوک ترک در لوله‌های حفاری که تحت خمش، پیچش و کشش می‌باشند، پرداختند. ضریب شدت تنش و میزان رشد ترک به دلیل خستگی ترک نیم‌بیضوی در استوانه تو خالی مورد بررسی و نتایج آن حاصل شده است. زارعی و نبوی [۱۲] با استفاده از روش تابع وزن به تحلیل ضرایب شدت تنش در ترک نیم‌بیضوی محیطی واقع در جدار داخلی لوله پرداختند.

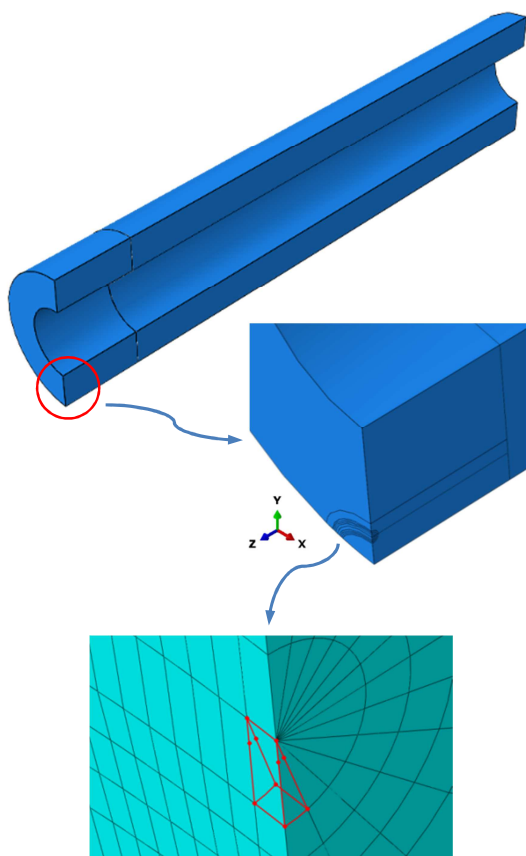
در برخی از مقاله‌ها تأثیر شکل هندسی بر روی ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفته است. راجو و نیومن [۱۳] ضریب شدت تنش را برای ترک محیطی در سطح خارجی لوله‌ها و میله‌ها تحت بار کششی و خمشی با استفاده از روش المان محدود سه بعدی مدل‌سازی و مورد بررسی قرار دادند. نتیجه برجسته این تحقیق وابستگی بیشتر فاکتور ضریب شدت تنش در لوله به مقدار نسبت شعاع داخلی به ضخامت در مقایسه با بقیه عوامل می‌باشد. سفیح و همکارانش [۱۴] ترک نیم‌بیضوی در لوله‌های استوانه‌ای با سطح مقطع متغیر را مدل نمودند. سپس اثرات ترک مشابه را در استوانه‌ای با ضخامت ثابت و مشخص بررسی و مقایسه کرده‌اند. آنها دریافتند که تأثیر مخرب ترک در استوانه‌هایی با سطح مقطع متغیر بیشتر است. شاهانی و خیرخواه [۱۵] ضریب شدت تنش ترک مُد اول نیم‌بیضوی در جداره داخلی مخزن کامپوزیتی را مدل کرده و تأثیر لایه کامپوزیتی سرتاسری را بر کاهش این ضریب بررسی نمودند. همچنین در این مقاله پارامترهای دیگر تأثیرگذار در ضریب تنش مانند فشار داخلی مخزن، ضخامت و مشخصات فیزیکی لایه کامپوزیتی بررسی شده است. لایه‌ی سرتاسری کامپوزیتی منجر به بهبود حدود ۱۰ درصدی ضریب شدت تنش شده است. در مقاله چن و همکارانش [۱۶]، ضریب شدت تنش در مخازن حاوی گاز طبیعی فشرده (CNG) دارای ترک نیم‌بیضوی در راستای طولی و در سطح داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. این مخازن توسط وصله کامپوزیتی دورتادوری تقویت شده است. حل با کمک روش المان محدود سه بعدی انجام شده است. نتایج نشان داد در مخازن با شرایط مشابه و ابعاد ترک یکسان، با افزایش شعاع داخلی خطر بیشتری ایجاد می‌شود.

بخش دیگری از تحقیقات انجام شده، بررسی اثر ترمیم ترک با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی می‌باشد. آیت‌اللهی و همکارانش [۱۷]، بن‌یحیی و همکارانش [۱۸]، مری‌پن‌زبان و همکارانش [۱۹] و ملکان و سیمینی [۲۰] به بررسی اثر ترمیمی وصله کامپوزیتی دور تا دوری بر کاهش ضریب شدت تنش در استوانه‌ای حاوی ترک پرداختند. شکل ترک تحلیل شده به صورت راه به در فرض شده که در کل ضخامت

ایجاد می‌گردد. این موضوع در المان شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایش طرح‌واره مدل ترک نیم‌بیضی و پارامترهای آن



شکل ۲- هندسه و المان‌بندی ربع مدل با استفاده از صفحات تقارن در سطح مقطع عرضی و طولی

در این تحقیق روش محاسبه ضریب شدت تنش بر اساس روش انرژی و محاسبه انتگرال  $J$  می‌باشد. ضریب شدت تنش بی‌بعد با رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$K^* = K_I / (\sigma \sqrt{\pi a / Q}) \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma$  و  $K_I$  به ترتیب تنش محوری اعمال شده و ضریب شدت تنش حاصل از روش اجزاء محدود در مُد اول می‌باشند. پارامتر

## ۲- مدل‌سازی ترک نیم‌بیضی محیطی با استفاده از

### روش اجزاء محدود سه بعدی

استوانه مورد بررسی در این تحقیق جدار ضخیم بوده و نسبت شعاع خارجی به داخلی ( $R_o/R_i$ ) برابر دو می‌باشد. به منظور چشم‌پوشی تأثیر لبه‌ها بر روی ضرایب شدت تنش، طول استوانه بلند در نظر گرفته شده است. در این حالت معمولاً طول مدل‌سازی ۱۰ برابر شعاع داخلی در نظر گرفته می‌شود. جنس لوله فولادی با مدول الاستیسیته‌ی ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی و هندسی در تمامی مدل‌ها ثابت بوده و تفاوت مدل‌های مختلف در نسبت ابعاد ( $a/c$ ) و عمق نسبی ( $a/t$ ) می‌باشد.  $a/c$ های مورد بررسی برابر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۱ و  $a/t$ های مورد بررسی برابر ۰/۲ و ۰/۸ می‌باشند.

در ابتدا با توجه به سابقه تحقیق با شبیه‌سازی لوله استوانه‌ای ترک‌دار و اعمال نیروی کشش یکنواخت در دوردست، نتایج با داده‌های موجود [۱۳]، صحت‌گذاری شده است. سپس نوع بارگذاری به حالت واقعی و عملیاتی که همان لوله‌ی تحت فشار می‌باشد، تغییر داده شده و در این حالت ترمیم لوله‌ی ترک‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور صرف‌نظر از اثر شرایط مرزی اعمالی در لبه‌ها، طول لوله بلند در نظر گرفته شده است. با این فرض انتخاب هر نوع شرط مرزی در انتهای لوله روی عملکرد ترک بی‌تأثیر می‌گردد. برای مدل‌سازی رفتار واقعی، جابجایی انتهای لوله در راستای طولی مقید شده تا حالت کرنش صفحه‌ای موجود در لوله‌های بلند به خوبی اعمال گردد.

با توجه به موقعیت ترک که در مقطع عرضی لوله، مطابق شکل ۱ قرار دارد در مدل‌سازی می‌توان از یک صفحه‌ی تقارن عرضی (صفحه‌ی  $xy$ ) استفاده نمود. در این حالت برای اعمال شرط مرزی تقارن، به غیر از صفحه‌ی ترک سایر نقاط این صفحه در راستای طولی (محور  $z$ ) مقید شده است. همچنین صفحه‌ی مقطع طولی گذرنده از عمقی‌ترین نقطه‌ی جبهه‌ی ترک (صفحه‌ی  $yz$ ) نیز صفحه‌ی تقارن دوم هندسه می‌باشد که در واقع بیضی را به دو قسمت مشابه در راستای عمق  $a$  تقسیم می‌نماید. از این‌رو با توجه به وجود دو صفحه‌ی تقارن در هندسه و بارگذاری مسأله، ربع مدل در نرم‌افزار -که نیمی در سطح مقطع عرضی و نیم دیگر در راستای محور استوانه (محور  $z$ ) می‌باشد- مورد تحلیل قرار می‌گیرد (شکل ۲). همچنین مقدار  $c$  در مدل‌سازی برابر نصف طول واقعی ترک در جهت محیطی قطر بیرونی استوانه لحاظ شده است (شکل ۱).

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه ۶.۱۴ استفاده شده است. مهمترین مرحله مدل‌سازی اجزاء محدود، المان‌بندی است. این مهم با ایجاد قسمت‌های مناسب تحقق می‌یابد. همچنین به منظور افزایش دقت حل در محدوده‌ی اطراف ترک، از المان بندی با چگالی بالا استفاده می‌شود. برای المان بندی کانتور حول جبهه ترک از المان سه بعدی گوه‌ای ۱۵ گره‌ای مرتبه ۲ (C3D15)، برای کانتورهای بلوک ترک از المان سه بعدی شش وجهی ۲۰ گره‌ای مرتبه ۲ (C3D20R) و برای سایر قسمت‌های استوانه از المان سه بعدی شش وجهی ۸ گره‌ای خطی (C3D8R) استفاده شده است. در المان گوه‌ای با انتقال موقعیت گره میانی به فاصله‌ی یک چهارم نوک المان، امکان مدل‌سازی تکینگی تنش در جبهه‌ی ترک

است. به منظور امان بندی وصله از امان هشت گره‌ای پوسته (Shell) با تعریف تکنیک لایه‌های کامپوزیتی و برای امان بندی چسب از امان سه بعدی شش وجهی ۲۰ گره‌ای مرتبه ۲ (C3D20R) استفاده شده است. چسب در مدل‌سازی انجام شده به عنوان یک ماده همگن در نظر گرفته شده است. در این مطالعه رفتار چسب از نقطه نظر جدایش و تخریب مورد بررسی قرار نگرفته 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 گره (Tie) اتصال داده شده است. روش گره حالت خاصی است که در آن مفادیر جابه‌جایی یک سطح با سطح دیگر دقیقاً همسان می‌شود. لازم به ذکر است در مواردی که آسیب لوله به صورت کندگی سطح لوله باشد، ابتدا باید حفره با چسب پر شده و سپس با استفاده از وصله تقویت و ترمیم شود. در تحقیق حاضر آسیب لوله به صورت ایجاد ترک منظور شده است. وصله‌ی کامپوزیتی مناسب به نحوی انتخاب می‌شود که برای تمامی شرایط هندسه ترک (با توجه به احتمال رشد آن)، مناسب و اقتصادی باشد. بدیهی است وصله با ابعاد بزرگ منجر به تقویت بیشتر خواهد شد ولی نرخ این تأثیر ثابت نبوده و در نقطه‌ای بهینه این تأثیر بیشینه می‌باشد. از این رو وصله‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین تأثیر بر روی ضریب شدت تنش نسبت به ماده مورد استفاده را داشته باشد. مشخصه‌های مورد بررسی وصله شامل پارامترهای ابعادی وصله (زاویه کمان، پهنا و ضخامت وصله)، ماده‌ی کامپوزیتی و زاویه قرار گیری الیاف می‌باشد. خواص مکانیکی وصله‌های کامپوزیتی و چسب در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی مدل [۲۶]

ماده			واحد	خواص
چسب	کربن/اپوکسی	بور/اپوکسی		
۰/۹۷	۱۷۲/۴	۲۰۸	GPa	$E_1$
-	۱۰/۳۴	۲۵/۴	GPa	$E_3$ و $E_2$
۰/۳۳	۰/۳	۰/۱۷	-	$\nu_{13}$ و $\nu_{12}$
-	۰/۱۸	۰/۰۴	-	$\nu_{23}$
-	۴/۸۲	۷/۲۴	GPa	$G_{13}$ و $G_{12}$
-	۳/۱	۴/۹۴	GPa	$G_{23}$

برای بررسی تأثیر پارامترهای وصله در بهبود اثرات ترک در استوانه و کاهش ضرایب شدت تنش، ابتدا وصله‌ای به صورت پیش فرض انتخاب شده است (جدول ۴). سپس با بررسی حالت‌های ممکن هر پارامتر، حالت مناسب انتخاب می‌شود. وصله پیش فرض (اولیه)، وصله‌ای متعارف حاصل از مدل‌سازی‌های مختلف، بررسی نتایج و همچنین استفاده از مراجع می‌باشد.

جدول ۴- مشخصات پارامترهای پیش فرض وصله کامپوزیتی

ضخامت بی‌بعد <sup>۱</sup>	پهنای بی‌بعد <sup>۲</sup>	ماده	چیدمان <sup>۳</sup>
۰/۳	۲	کربن/اپوکسی	[۰]₈

۱- نسبت ضخامت وصله به ضخامت استوانه؛ ۲- نسبت پهنای وصله به شعاع داخلی استوانه؛ ۳- زاویه قرار گیری الیاف در راستای عمود بر محور طولی استوانه

شکل هندسی ترک  $Q$  از تقریب بسط سری انتگرال بیضوی بدست می‌آید و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \quad (for \frac{a}{c} \leq 1) \quad (2)$$

نتایج عددی ضرایب شدت تنش بی‌بعد و مقایسه آن با مرجع [۱۳] در جدول ۱ آورده شده است. دقت بدست آمده بسیار مناسب بوده و میانگین خطا برابر ۴/۵ درصد است. پس از اطمینان از عملکرد مدل، استوانه تحت فشار داخلی قرار گرفته است. فشار داخلی، مؤلفه تنشی در راستای محور استوانه ایجاد می‌کند و منجر به ایجاد ترک مد اول می‌شود. تفاوت مدل فشار داخلی و کشش محوری در بارگذاری دو مدل بوده و دیگر موارد منطبق بر شرایط مدل‌سازی حالت کششی می‌باشد. نتایج حاصل از اعمال فشار داخلی در جدول ۲ ارائه شده است. بی‌بعد سازی ضرایب شدت تنش در بارگذاری فشار داخلی نیز بر اساس رابطه (۱) می‌باشد. برای تبدیل فشار داخلی به تنش محوری از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$\sigma_z = \frac{P_i R_i^2}{R_i^2 - R_o^2} \quad (3)$$

جدول ۱- نتایج ضرایب شدت تنش بی‌بعد تحت کشش محوری

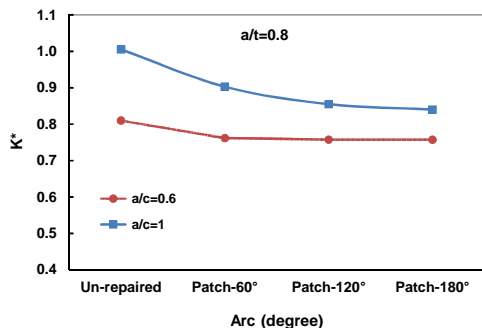
$K^*$	تحقیق حاضر	راجو و نیومن [۱۳]	$a/t$	$a/c$
			-	۱/۱۰
-	۱/۳۸	۰/۸	۰/۲	۰/۲
۱/۱۱	۱/۰۸	۰/۲	۰/۸	۰/۶
۱/۴۶	۱/۳۹	۰/۲	۰/۸	۰/۶
۱/۰۲	۱/۰۲	۰/۲	۱	۱
۱/۰۸	۱/۱۸	۰/۸	۱	۱

جدول ۲- نتایج ضرایب شدت تنش بی‌بعد تحت فشار داخلی

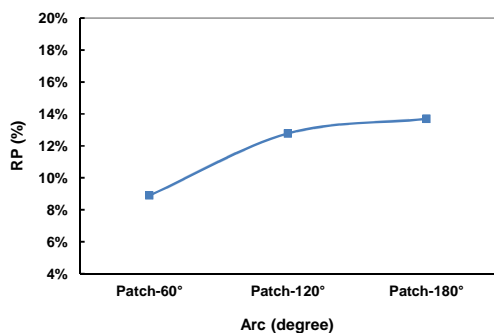
$K^*$	$a/t$	$a/c$
۰/۶۶	۰/۲	۰/۲
۰/۷۲	۰/۵	۰/۲
۰/۶۴	۰/۲	۰/۶
۰/۷۱	۰/۵	۰/۶
۰/۸۱	۰/۸	۰/۶
۰/۷۴	۰/۲	۱
۰/۸۴	۰/۵	۱
۱/۰۰	۰/۸	۱

### ۳- ترمیم ترک با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی

در این بخش پس از اطمینان از صحت شبیه سازی سه بعدی استوانه حاوی ترک به بررسی فرآیند ترمیم آسیب با استفاده از وصله کامپوزیتی پرداخته شده است. معیار بهبود وضعیت ترک میزان درصد کاهش ضریب شدت تنش بی‌بعد شده می‌باشد. در فرآیند مدل‌سازی، وصله‌ی کامپوزیتی توسط چسبی به ابعاد مشابه خود وصله و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر به لوله چسبانده شده است. این لایه در همه مدل‌ها وجود داشته و ضخامت آن ثابت است. در این بخش مشابه با قسمت‌های ایجاد شده بر استوانه ترک‌دار، لایه چسب و وصله نیز قسمت‌بندی شده



شکل ۵- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب زاویه کمان وصله در  $a/t=0.8$



شکل ۶- درصد میانگین بهبود برحسب زاویه کمان وصله موضعی

جدول ۵- مشخصات پارامترهای وصله بعد از انتخاب زاویه کمان

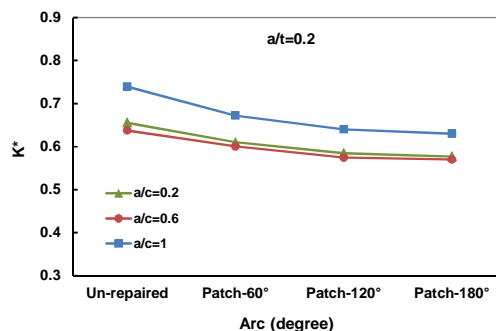
زاویه کمان	ضخامت بی‌بعد	پهنای بی‌بعد	ماده	زاویه لایه‌ها	درصد تقویت
۱۲۰°	۰/۳	۲	کربن اپوکسی	[۰]۸	۱۲/۷۸

### ۲-۳- بررسی تأثیر ضخامت لایه وصله موضعی در ترمیم ترک

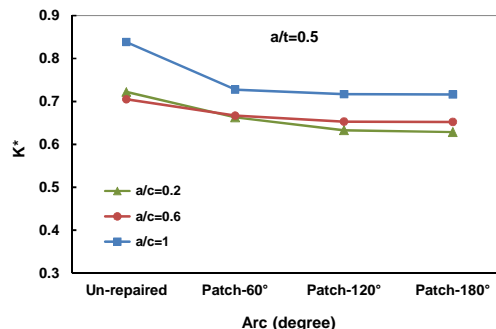
ضخامت وصله پارامتر دوم مورد بررسی است که در فرآیند تحقیق نسبت به ضخامت استوانه بی‌بعد شده است. در شکل‌های ۷ تا ۹ مقدار ضرایب شدت تنش به ازای تغییر ضخامت وصله و نسبت ابعاد و عمق‌های نسبی متفاوت نمایش داده شده است. سایر پارامترهای وصله مشابه جدول ۵ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش ضخامت وصله موجب افزایش عملکرد ترمیم خواهد شد. میانگین ضرایب شدت تنش  $a/c$  و  $a/t$  (های مختلف) به ازای ضخامت‌های مختلف وصله در شکل ۱۰ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ضخامت بی‌بعد ۰/۳، ضخامتی با تأثیرگذاری مناسب می‌باشد. این ضخامت ۳۰ درصد ضخامت استوانه بوده و اختلاف تأثیر آن با ضخامت ۰/۲ بیش از یک درصد و با ضخامت ۰/۴ و ۰/۵ به ترتیب حدود ۰/۳۹ و ۰/۶۴ درصد است. نتایج نشان می‌دهد ضخامت ۰/۳ تا ۰/۵ عملکرد مشابهی در کاهش ضریب شدت دارد. به عبارت دیگر انتخاب ضخامتی برای وصله در بازه یادشده با توجه به نتایج به دست آمده عملکرد یکسان ترمیم را نتیجه می‌دهد که با توجه به اهمیت فاکتور وزن در سازه‌ها، انتخاب وصله با ضخامت مناسب نقش بسیار مهمی خواهد داشت. لذا ضخامت بی‌بعد ۰/۳ به عنوان ضخامت مناسب لحاظ شده و پیش فرض اولیه انتخاب مناسبی بوده است.

### ۱-۳- بررسی زاویه کمان وصله موضعی در ترمیم ترک

فرآیند وصله گذاری بر روی سطح خارجی استوانه می‌تواند به صورت کامل یا موضعی باشد. در حالت موضعی زاویه کمان وصله باید به گونه‌ای انتخاب شود که به طور میانگین برای تمامی هندسه‌های ترک  $a/c$  و  $a/t$  (های مختلف) مناسب بوده و تأثیر بیشینه‌ای داشته باشد. برای بررسی تأثیر میزان زاویه کمان وصله در کاهش ضریب شدت تنش، وصله با زاویه کمان ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه مدل شده و وصله‌ای موضعی با بیشترین تأثیر انتخاب شده است. سایر پارامترهای مؤثر طبق جدول ۴ به صورت پیش فرض می‌باشد. در شکل‌های ۳ تا ۵ میزان کاهش ضرایب شدت تنش بی‌بعد به ازای زوایای مختلف کمان و شرایط هندسی ترک آورده شده است. نتایج نرخ کاهشی ضریب شدت تنش را با افزایش زاویه کمان وصله نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب زاویه کمان وصله در  $a/t=0.2$

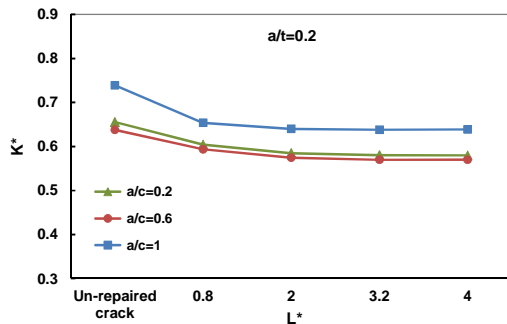


شکل ۴- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب زاویه کمان وصله در  $a/t=0.5$

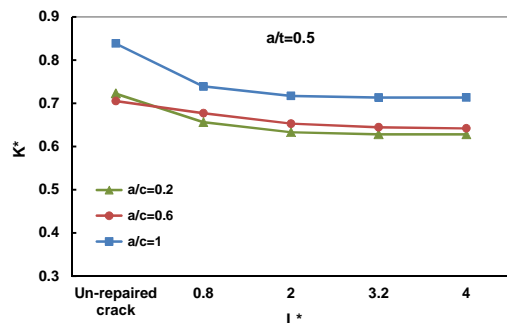
میزان بهبود آسیب برحسب زاویه کمان‌های مختلف وصله موضعی در شکل ۶ آورده شده است. درصد میانگین بهبود آسیب در فرآیند ترمیم به ازای زوایای کمان ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه به ترتیب برابر ۱۲/۷۸، ۱۳/۶۹ و ۱۲/۷۸ درصد می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود اختلاف تأثیر در میزان کاهش ضریب شدت تنش بی‌بعد در زاویه کمان ۱۲۰ با زاویه کمان ۶۰، ۳/۸۸ درصد و با زاویه کمان ۱۸۰ کمتر از یک درصد می‌باشد. در اینجا هدف، انتخاب زاویه‌ای است که بیشترین تأثیر را نسبت به کمترین استفاده از ماده‌ی مورد نیاز داشته باشد. لذا زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به بقیه حالات انتخاب مناسب‌تری در پروسه ترمیم استوانه ترک‌دار می‌باشد. پارامترهای وصله جهت دستیابی به ترمیم مناسب با احتساب زاویه کمان ۱۲۰ درجه در جدول ۵ ارائه شده است.

### ۳-۳- بررسی تأثیر پهنای وصله موضعی در ترمیم ترک

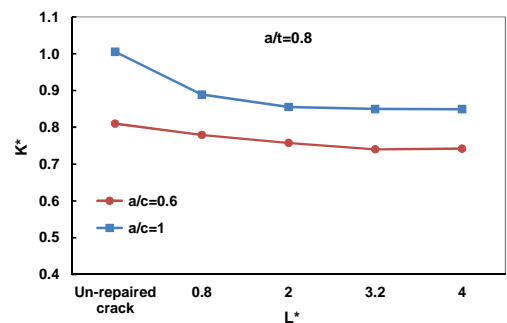
پارامتر بعدی، بررسی تأثیر پهنای وصله در فرآیند ترمیم استوانه حاوی ترک می‌باشد. پهنای وصله در راستای محور طولی استوانه بوده و نسبت به شعاع داخلی بی‌بعد شده است. در ابتدا، پهنای وصله ۰/۸ انتخاب شده است. پارامترهای وصله مطابق جدول ۵ می‌باشد. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مقدار ضرایب شدت تنش به ازای پهنای بی‌بعد شده وصله در  $a/t$  و  $a/c$ های مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب پهنای وصله موضعی در  $a/t=0.2$

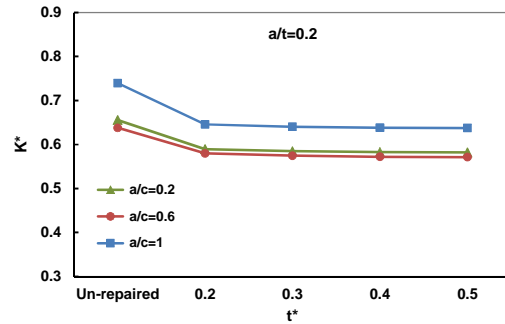


شکل ۱۲- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب پهنای وصله موضعی در  $a/t=0.5$

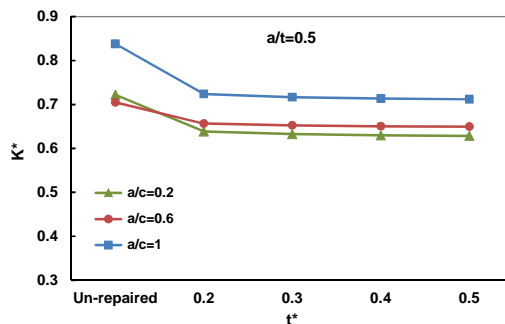


شکل ۱۳- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب پهنای وصله موضعی در  $a/t=0.8$

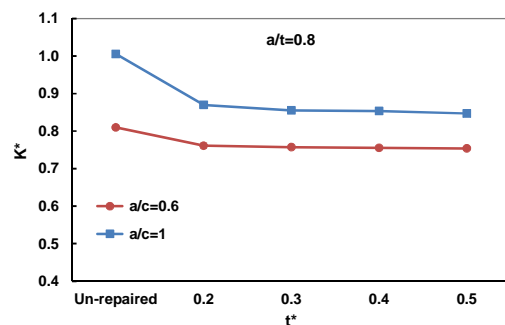
میانگین ضریب شدت تنش در  $a/t$  و  $a/c$ های مختلف به ازای پهنای وصله در شکل ۱۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد پهنای بی‌بعد ۰/۲، پهنایی با تأثیر مناسب است. اختلاف تأثیر آن با مرحله قبل (پهنای ۲) بیش از یک و با مرحله بعد (پهنای ۴) کمتر از ۰/۲



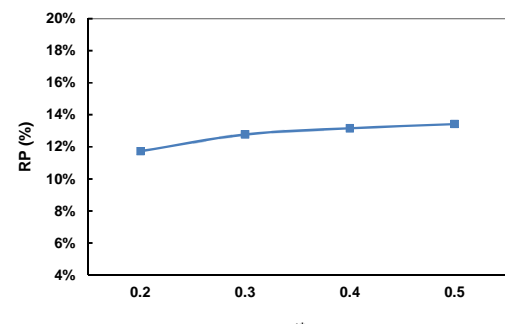
شکل ۷- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب ضخامت وصله موضعی در  $a/t=0.2$



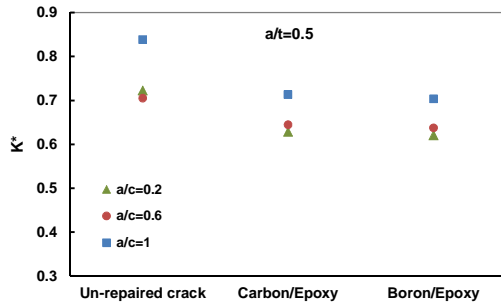
شکل ۸- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب ضخامت وصله موضعی در  $a/t=0.5$



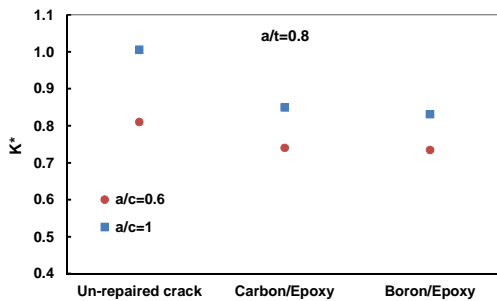
شکل ۹- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب ضخامت وصله موضعی در  $a/t=0.8$



شکل ۱۰- درصد میانگین بهبود برحسب ضخامت وصله موضعی

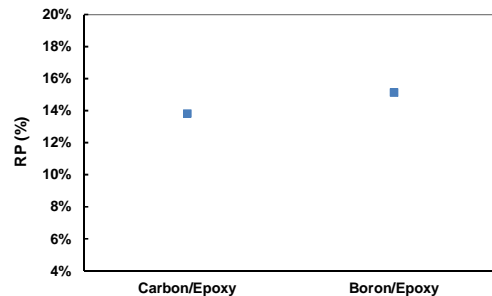


شکل ۱۶- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد بر حسب جنس وصله موضعی در  $a/t=0.5$



شکل ۱۷- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد بر حسب جنس وصله موضعی در  $a/t=0.8$

در شکل ۱۸ درصد میانگین بهبود سازه آسیب دیده پس از ترمیم آورده شده است. عملکرد ترمیم با افزایش میزان صلبیت وصله افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی به سبب داشتن سفتی بالاتر نسبت به وصله کربن/اپوکسی، عملکرد مطلوب‌تری را نشان داده است. نتایج بررسی پارامترهای تأثیرگذار تا این مرحله در جدول ۷ لیست شده است.

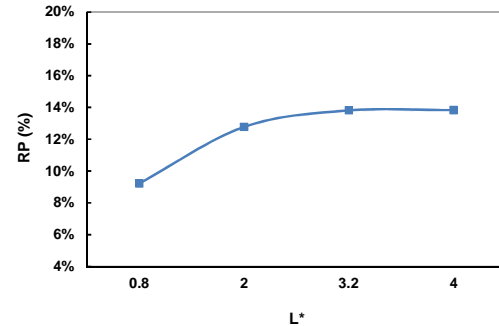


شکل ۱۸- درصد میانگین بهبود بر حسب جنس وصله موضعی

جدول ۷- مشخصات پارامترهای وصله بعد از انتخاب زاویه کمان، ضخامت، پهنا و نوع ماده

زاویه کمان	ضخامت بی‌بعد	پهنای بی‌بعد	ماده	زاویه لایه‌ها	درصد تقویت
۱۲۰°	۰/۳	۳/۲	بور/اپوکسی	[۰]₈	۱۵/۱۳

درصد می‌باشد. بنابراین پهنای بی‌بعد ۳/۲ به عنوان پهنای مناسب انتخاب شده است. خلاصه نتایج بخش در جدول ۶ لیست شده است.



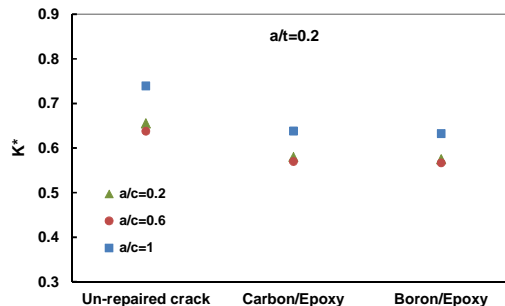
شکل ۱۴- درصد میانگین بهبود بر حسب پهنای وصله موضعی

جدول ۶- مشخصات پارامترهای وصله بعد از انتخاب زاویه کمان، ضخامت و پهنا

زاویه کمان	ضخامت بی‌بعد	پهنای بی‌بعد	ماده	زاویه لایه‌ها	درصد تقویت
۱۲۰°	۰/۳	۳/۲	کربن/اپوکسی	[۰]₈	۱۳/۸۱

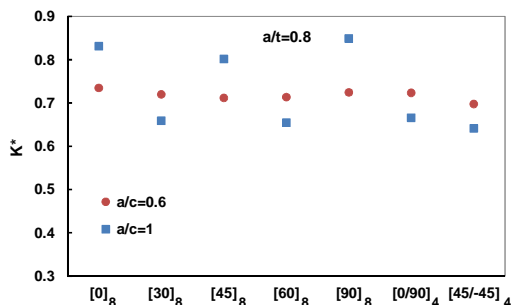
### ۳-۴- بررسی تأثیر ماده کامپوزیت وصله موضعی در ترمیم ترک

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند ترمیم سازه‌های آسیب دیده، بهره‌گیری از مواد کامپوزیتی مناسب با بهترین بازدهی در فرآیند ترمیم می‌باشد. ترمیم می‌تواند به کمک وصله‌های کامپوزیتی مختلف انجام گیرد. در این بخش از دو ماده‌ی کامپوزیتی بور/اپوکسی و کربن/اپوکسی جهت بررسی میزان تأثیرگذاری بر کاهش ضریب شدت تنش استفاده شده است (جدول ۲). سایر پارامترهای وصله مطابق جدول ۶ می‌باشد. میزان کاهش ضریب شدت تنش بی‌بعد برای دو ماده کربن/اپوکسی و بور/اپوکسی در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ آورده شده است. با محاسبه مقادیر کاهش ضریب شدت تنش مشاهده شد استفاده از وصله بور/اپوکسی بالاترین میزان کاهش با مقدار ۳۰٪ و استفاده از وصله کربن/اپوکسی کم‌ترین میزان کاهش (۱۸/۳۴٪) را به همراه دارد.

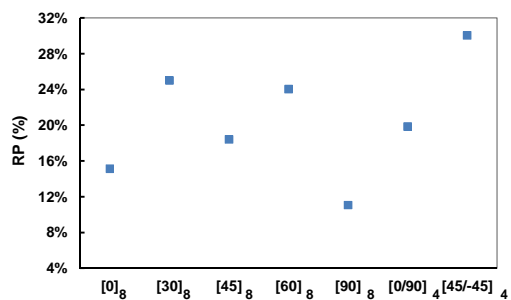


شکل ۱۵- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد بر حسب جنس وصله موضعی در  $a/t=0.2$

پارامترهای مناسب و نهایی وصله کامپوزیتی در فرآیند ترمیم استوانه‌ای ترک‌دار در جدول ۸ آورده شده است.



شکل ۲۱- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب چیدمان وصله موضعی در  $a/t=0.8$



شکل ۲۲- درصد میانگین بهبود برحسب چیدمان وصله موضعی

جدول ۸- مشخصات نهایی پارامترهای وصله شامل زاویه کمان، ضخامت، پهنا، نوع ماده و چیدمان

زاویه کمان	ضخامت بی‌بعد	پهنای بی‌بعد	ماده	زاویه لایه‌ها	درصد تقویت
۱۲۰°	۰/۳	۳/۲	بوراپوکسی	$[45/-45]_4$	۳۰/۰۴

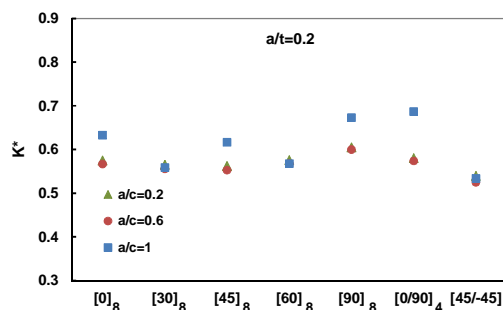
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد لوله استوانه‌ای حاوی ترک نیم‌بیضی محیطی خارجی تحت فشار داخلی، قبل و پس از ترمیم با استفاده از وصله کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انتخاب وصله مناسب و دستیابی به مناسب‌ترین عملکرد استوانه آسیب دیده پس از ترمیم، تأثیر پارامترهای مختلف وصله بررسی و نتایج ذیل حاصل شده است.

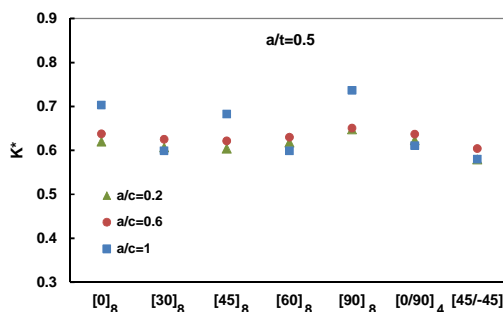
- استفاده از وصله مناسب تأثیر زیادی در ترمیم ناحیه آسیب و کاهش ضریب شدت تنش دارد. در فرآیند ترمیم، با بررسی پارامترهای مؤثر و بهره‌گیری از مقدار مناسب هر پارامتر، درصد تقویت از  $12/78$  درصد به  $30/04$  درصد افزایش داشته است.
- نرخ تقویت استوانه به ازای افزایش پارامترهای ابعادی ترمیم‌کننده - و بزرگتر کردن وصله- ثابت نبوده و بعد از مرحله‌ای تأثیر آن ناچیز می‌باشد. به عنوان مثال در مرحله اول با افزایش زاویه کمان وصله، میزان تقویت برابر  $3/88$

#### ۳-۵- بررسی تأثیر لایه‌چینی وصله کامپوزیتی در ترمیم ترک

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند طراحی ترمیم سازه‌های آسیب دیده به کمک وصله‌های کامپوزیتی، بهره‌گیری از لایه‌چینی مناسب می‌باشد. زاویه صفر درجه به معنی قرارگیری الیاف وصله در راستای محیطی و زاویه ۹۰ درجه به معنی قرارگیری الیاف وصله هم راستا با محور طولی استوانه می‌باشد. در این بخش تأثیر لایه‌چینی لایه‌های کامپوزیتی بوراپوکسی با چیدمان‌های  $[0]_8$ ،  $[30]_8$ ،  $[45]_8$ ،  $[60]_8$ ،  $[90]_8$ ،  $[0/90]_4$  و  $[45/-45]_4$  در فرآیند ترمیم استوانه حاوی ترک مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. سایر پارامترهای وصله مطابق جدول ۷ می‌باشد. میزان کاهش ضریب شدت تنش بی‌بعد به ازای چیدمان‌های مختلف در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر در کاهش میزان ضرایب شدت تنش بی‌بعد در بهره‌گیری وصله با لایه‌چینی  $[45/-45]_4$  می‌باشد.



شکل ۱۹- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب چیدمان وصله موضعی در  $a/t=0.2$



شکل ۲۰- تغییرات ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب چیدمان وصله موضعی در  $a/t=0.5$

میانگین درصد تأثیر برای چیدمان‌های مختلف الیاف در  $a/t$  و  $a/c$ ‌های مختلف در شکل ۲۲ نمایش داده شده است. طبق نتایج لایه‌چینی  $[45/-45]_4$  بیشترین تأثیر در افزایش استحکام و کاهش ضریب شدت تنش را نشان می‌دهد (میانگین درصد تقویت  $30/04$ ). کمترین تأثیر در کاهش ضریب شدت تنش در بکارگیری وصله با لایه‌چینی  $[90]_8$  می‌باشد (میانگین درصد تقویت  $11/06$ ). لازم به ذکر است در نمونه‌های مورد بررسی در تمامی موارد وجود وصله باعث افزایش عمر سازه و کاهش ضرایب شدت تنش شده است. مشخصات



[5] Shahani A. R. and Habibi S. E., Stress Intensity Factors in a Hollow Cylinder Containing a Circumferential Semi-Elliptical Crack subjected to Combined Loading. *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 128-140, 2007.

[6] Carpinteri A. and Brighenti R., Circumferential Surface Flaws in Pipes under Cyclic Axial Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, No. 4, pp. 383-396, 1998.

[7] Carpinteri A., Brighenti R. and Spagnoli A., Part-Through Cracks in Pipes under Cyclic Bending. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 185, pp. 1-10, 1998.

[8] Predan J., Mocičnik V. and Gubeljak N., Stress Intensity Factors for Circumferential Semi-Elliptical Surface Cracks in a Hollow Cylinder subjected to Pure Torsion. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 105, pp. 152-168, 2013.

[9] Khoramshad H. and Ayatollahi M. R., Finite Element Analysis of a Semi-Elliptical External Crack in a Buried Pipe. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 399-409, 2009.

[10] Diamantoudis A. T. and Labeas G. N., Stress Intensity Factors of Semi-Elliptical Surface Cracks in Pressure Vessels by Global-Local Finite Element Methodology. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, pp. 1299-1312, 2005.

[11] Dao N. H. and Sellami H., Stress Intensity Factors and Fatigue Growth of a Surface Crack in a Drill Pipe During Rotary Drilling Operation. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, pp. 626-640, 2012.

[12] Zareei A. and Nabavi S. M., Weight Function for Circumferential Semi-Elliptical Cracks in Cylinders due to Residual Stress Fields Induced by Welding. *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 86, No. 7, pp. 1219-1230, 2016.

[13] Raju I. S. and Newman J. C., Stress-Intensity Factors for Circumferential Surface Crack in Pipe and Rods under Tension and Bending Loads. *Fracture Mechanics*, Vol. 17, pp. 789-805, 1986.

[14] Saffih A., Hariri S., Comparison of Semi-Elliptical Cracks in Cylinders with a Thickness Transition and in a Straight Cylinders—Elastic-Plastic Behavior. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 2685-2697, 2006.

[15] Shahani A. R. and Kheirikhah M. M., Stress Intensity Factor Calculation of Steel-Lined Hoop-Wrapped Cylinders with Internal Semi-Elliptical Circumferential Crack. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 2004-2013, 2007.

[16] Chen J. and Pan H., Stress Intensity Factor of Semi-Elliptical Surface Crack in a Cylinder with Hoop Wrapped Composite Layer. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 110, pp. 77-81, 2013.

[۱۷] آیت‌آلهی م.، آزاد ه.، هاشمی ر.، بررسی رفتار لوله‌های ترک‌دار تقویت شده توسط وصله کامپوزیتی. *اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته*، تهران، ۱۳۸۶.

[18] Benyahia F., Albedah A. and Bachir Bouiadjr, B., Stress Intensity Factor for Repaired Circumferential Cracks in Pipe with Bonded Composite Wrap. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 136, pp. 041201-1-5, 2014.

[19] Meriem-Benziane M., Abdul-Wahab S. A., Zahloul H., Babaziane B., Hadj-Meliani M. and Pluvinage G., Finite Element Analysis of the Integrity of an API X65 Pipeline with a Longitudinal Crack Repaired with Single- and Double-Bonded Composites. *Composites Part B*, Vol. 77, pp. 431-439, 2015.

[20] Malekan M. and Cimini Jr C. A., Finite Element Analysis of a Repaired Thin-Walled Aluminum Tube Containing a Longitudinal Crack with Composite Patches under Internal Dynamic Loading. *Composite Structures*, Vol. 184, pp. 980-1004, 2018.

درصد بوده که این مقدار در مرحله دوم به ۰/۹۱ درصد رسیده است. همچنین در مرحله اول افزایش پهنای وصله، میزان تقویت برابر ۳/۵۵ درصد بوده که این مقدار در مرحله دوم به ۱/۰۴ درصد و در مرحله سوم به ۰/۰۲ درصد رسیده است.

▪ زاویه قرارگیری الیاف وصله ترمیمی یکی از مؤثرترین پارامترها در کاهش ضریب شدت تنش و افزایش میزان تقویت می‌باشد. در این تحقیق با بررسی و انتخاب لایه‌چینی مناسب، درصد تقویت با استفاده از وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی از ۱۵/۱۳ به ۳۰/۰۴ درصد افزایش یافته است.

▪ با بررسی‌های انجام شده در پارامترهای وصله‌گذاری، ضخامت وصله کمترین میزان تأثیر را در فرآیند ترمیم داشته است. به طوری که با دو برابر شدن مقدار اولیه ضخامت وصله، ضریب تقویت حدود ۱/۵ درصد افزایش داشته، در صورتی که این مقدار برای دو پارامتر دیگر (زاویه کمان و پهنای وصله) بالاتر از ۳/۵ درصد بوده است.

## ۵- نمادها

$a$	عمق ترک (m)
$c$	طول ترک (m)
$a/c$	نسبت ابعاد ترک
$a/t$	عمق نسبی ترک
$E$	مدول الاستیسیته (GPa)
$G$	مدول برشی (GPa)
$P_i$	فشار داخلی (MPa)
$R_i$	شعاع داخلی استوانه (m)
$R_o$	شعاع خارجی استوانه (m)
$t$	ضخامت استوانه (m)
$v$	نسبت پواسون

## ۶- مراجع

[1] Duga J. J., Fisher W. H., Buxbaum R. W., Rosenfield A. R., Buhar A. R., Honton E. J. and McMillan S. C., *The Economic Effects of Fracture in the United States*. 1<sup>st</sup> Edition, National Bureau of Standards Washington, 1983.

[۲] شریفی ح.، نبوی س.م.، کاربرد نگهداشت پیشگویانه در حفظ سلامت تجهیزات و بررسی روش‌های آن. *چهارمین کنگره سراسری فناوری‌های نوین ایران*، تهران، ایران، ۱۳۹۵.

[۳] فلاح م.، ترمیم سازه‌های هوایی ترک‌دار با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی تحت بار خستگی. *پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد*، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲.

[4] Saeed N., Ronagh H. and Virk A., Composite Repair of Pipelines, Considering the Effect of Live Pressure-Analytical and Numerical Models with Respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 605-610, 2014.

[21] Woo K. S., Ahn J. S. and Yang, S. H., Cylindrical Discrete-Layer Model for Analysis of Circumferential Cracked Pipes with Externally Bonded Composite Materials. *Composite Structures*, Vol. 143, pp. 317-323, 2016.

[۲۲] نبوی س. م.، پورعبدل میانجی ا.، جمال‌امیدی م.، بررسی عددی اثر وصله‌های کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی کامل. نشریه مهندسی سازه و ساخت، پذیرفته شده، ۱۳۹۷.

[23] Zarrinzadeh H., Kabir M. Z. and Deylami A., Crack Growth and Debonding Analysis of an Aluminum Pipe Repaired by Composite Patch under Fatigue Loading. *Thin-Walled Structures*, Vol. 112, pp. 140-148, 2017.

[24] Zarrinzadeh H., Kabir M. Z. and Deylami A., Experimental and Numerical Fatigue Crack Growth of an Aluminium Pipe Repaired by Composite Patch. *Engineering Structures*, Vol. 133, pp. 24-32, 2017.

[25] Anderson T. L., *Fracture mechanics fundamentals and application*, 4<sup>th</sup> Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2017.

[26] Jamal-Omidi M., Falah M. and Taherifar D., 3-D Fracture Analysis of Cracked Aluminum Plates Repaired with Single and Double Composite Patches using XFEM. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 50, No. 4, pp. 525-539, 2014.