ترمیم استوانه‌ی حاوی ترک راه به در محیطی با استفاده از وصله کامپوزیتی موضعی

مجید جمال‌امیدی[۱]، سید مهدی نبوی[۲*]، امیرحسین پارسانیا[۳]

[۱] دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ j_omidi@mut.ac.ir
[۲] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ nabavi@mut.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ amirparsaengi@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:
لوله‌ی استوانه‌ای
ترک راه به در محیطی
ضریب شدت تنش
وصله کامپوزیتی موضعی
روش اجزا محدود سه بعدی

چکیده

در این مقاله اثر وصله کامپوزیتی در ترمیم لوله‌ی استوانه‌ای حاوی ترک راه به در محیطی تحت فشار داخلی بررسی شده است. برای این منظور با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی و انتگرال J، ضرایب شدت تنش قبل و بعد از ترمیم تعیین شده است. جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی، استوانه‌ی حاوی ترک محیطی راه به در، تحت کشش یکنواخت شبیه‌سازی و نتایج حاصل با حل تئوری مقایسه شده است. سپس به ترمیم استوانه ترک‌دار تحت فشار داخلی با استفاده از چهار وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به صورت موضعی پرداخته شده است. نتایج تحقیق، تأثیر قابل توجه وصله‌های کامپوزیتی را در کاهش ضریب شدت تنش استوانه‌ی ترک‌دار نشان داده است. مشاهده شد استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با سفتی بالاتر اثر کاهنده بیشتری بر ضریب شدت تنش دارد. همچنین تأثیر چیدمان وصله کامپوزیتی، خواص و ضخامت چسب بر ضرایب شدت تنش روی جبهه‌ی ترک ارزیابی شده است.

The Repair of Circumferential Through-Wall Cracked Pipe by Using Local Composite Patch

Majid Jamal-Omidi[1], Seyed Mehdi Nabavi[2*], Amir Hossien Parsania[3]

[1] Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology; j_omidi@mut.ac.ir
[2] Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology; nabavi@mut.ac.ir
[3] Master of Science, Malek Ashtar University of Technology; amirparsaengi@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 Sep. 2018
Accepted: 2 Nov. 2019

Keywords:
Cylindrical Pipe
Circumferential Through-Wall Crack
Stress Intensity Factor
Local Composite Patch
Three-Dimensional Finite Element Method

ABSTRACT

In this paper, the effect of composite patch on cylindrical pipe with circumferential through-wall crack has been investigated under internal pressure. For this purpose, using three-dimensional finite element and *J*-integral, stress intensity factors is determined before and after the repair. In order to ensure the accuracy of modeling, a pipe with circumferential through-wall crack under uniform tension load is simulated and the results are compared with theoretical data. Then, the cracking cylinder is repaired using four composite patches of Boron/Epoxy, Carbon/Epoxy, Kevlar/Epoxy and Glass/Epoxy in a local manner. The results of study are shown the significant effect of composite patches on reducing the stress intensity factor of cracked cylinder. It is observed that the use of composite patches with higher stiffness has a more decreasing effect on stress intensity factor. Also, the effect of composite patch, properties and thickness of adhesive on stress intensity factors along crack front is evaluated.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

۱ - مقدمه

کشتی‌ها و سازه‌های دریایی در حین کار معمولاً دچار آسیب‌های ناشی از خوردگی و ترک می‌گردند. در کشتی‌های باری ترمیم آسیب‌ها با استفاده از جوشکاری وصله در بنادر صورت می گیرد. این در حالی است که وقتی کشتی دور از ساحل باشد این تعمیر و ترمیم باید با ایمنی بیشتر و استفاده از روش‌های کم‌خطر صورت پذیرد. همچنین در خطوط لوله انتقال نفت و گاز این موضوع اهمیت بیشتری داشته و توقف تولید به معنی انباشت ضرر تلقی می‌شود.

لوله‌ها، مخازن تحت فشار و سیلندرهای هیدرولیک از جمله‌ی قطعات در صنعت می‌باشند که دارای شکل هندسی استوانه‌ای هستند. به دلیل خوردگی در نقاط بحرانی به ویژه درز جوش‌ها، امکان پدیدار شدن ترک به صورت موضعی وجود دارد که در برخی از موارد منجر به توقف تولید و هزینه‌های تحمیلی می‌گردد. از این‌رو بعد از عیب‌یابی و کشف ترک، مهمترین موضوع نحوه ترمیم آن می‌باشد. معمولاً جهت رفع این مشکل، قسمت آسیب دیده تعویض و یا با وصله فلزی و یا کامپوزیتی ترمیم می‌شود. استفاده از وصله کامپوزیتی مقرون به صرفه‌تر از تعویض قسمت آسیب دیده می‌باشد و در این روش نیاز به توقف فرآیند انتقال سیال و خارج شدن از وضعیت عملیاتی وجود ندارد.

کارهای تحقیقاتی مختلفی در زمینه‌ی وجود ترک در استوانه و بررسی آن ارائه شده است. در این تحقیقات در برخی از انواع ترک‌های در نظر گرفته شده به صورت راه به در[1] و در برخی دیگر به صورت سطحی[2] می‌باشند. در ترک‌های راه به در که جبهه‌ی ترک در عمق جداره پیشروی کرده است، نشتی رخ می‌دهد در صورتیکه در ترک‌های سطحی این پدیده رخ نمی‌دهد. لام و همکارانش [۱] با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی، ترمیم بوم فولادی یک جرثقیل حاوی ترک را با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی تحلیل نمودند. ترک از نوع محیطی راه به در و با ابعاد خاص و وصله به صورت یک طرفه در نظر گرفته شده است. اثر وصله بر عمر خستگی بوم ترک‌دار نیز تخمین زده شده است. مری‌پم‌بنزیانه و همکارانش [۲] با استفاده از روش اجزاء محدود، لوله‌ی گاز API X65 حاوی ترک محیطی را تحلیل نمودند. ارزیابی استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی موضعی یک طرفه و دو طرفه از جنس کربن/اپوکسی به منظور ترمیم ترک راه به در، هدف اصلی این تحقیق گزارش شده است. وو و همکارانش [۳] با استفاده از روش بسته شدن دهانه‌ی ترک (VCCT) لوله‌ی تحت کشش و دارای ترک محیطی راه به در، که به وسیله‌ی وصله‌ی کامپوزیتی ترمیم شده را، تحلیل نمودند. زرین‌زاده و همکارانش [۴ و ۵] به بررسی خستگی لوله‌ی آلومینیومی حاوی ترک راه به در محیطی که با وصله‌ی کامپوزیتی موضعی شیشه/اپوکسی ترمیم شده است، 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. بن‌یحیی و همکارانش [۶] به تحلیل ترک محیطی راه به در و ترمیم شده با وصله‌ی دورتادوری کامپوزیتی در استوانه‌ی تحت فشار پرداختند. مدل‌سازی ترک با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و ضرایب شدت تنش با استفاده از روش بسته شدن دهانه‌ی ترک محاسبه شده است. نوع وصله‌ی کامپوزیتی به صورت کامل و از جنس شیشه/اپوکسی می‌باشد و به کمک چسب FM73 به لوله‌ی فولادی متصل شده است. نتایج نشان داد که وصله‌ی مورد استفاده تا ۶۳ درصد مقدار ضریب شدت تنش را کاهش می‌دهد. آیت‌اللهی و همکارانش [۷] به مقاوم‌سازی لوله حاوی ترک سطحی تحت فشار با استفاده از وصله‌ی دورتادوری کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی پرداختند. در تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی ترک نیم‌بیضوی طولی داخلی با استفاده از نرم‌افزار انسیس صورت گرفته است. نتایج نشان داد اثر فشار داخلی روی مقدار ضریب شدت تنش در حالت مقاوم شده مانند حالت مقاوم نشده به صورت خطی است. بِل‌حَدری و همکارانش [۸] همین مسأله را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس با لحاظ مودهای لغزشی و پاره‌گی ترک تحلیل نمودند. نوع وصله‌ی کامپوزیتی به صورت دورتادوری کامل از جنس شیشه/اپوکسی بوده و ترمیم کننده با استفاده از چسب FM73 به لوله‌ی فولادی X65 متصل شده است. بیشینه کاهش مقادیر شدت تنش پس از ترمیم در مودهای اول تا سوم ترک به ترتیب ۴۶، ۵۵ و ۷۲ درصد ذکر شده است. مجذوب و همکارانش [۹] به بررسی عددی ترمیم لوله‌ی حاوی ترک نیم‌بیضوی طولی با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی به کمک نرم‌افزار آباکوس پرداختند. در فرآیند ترمیم، وصله‌گذاری به صورت موضعی (با ابعاد محدود) روی ترک که در سطح خارجی لوله قرار دارد، انجام شده است. ولَدی و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش XFEM به ترمیم لوله‌ی حاوی ترک راه به در طولی با استفاده از کامپوزیت به صورت دورتادوری پرداختند. چهار حالت ترمیم با استفاده از کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی با جهت‌گیری الیاف در زوایای ۰ و ۹۰ درجه نسبت به طول استوانه، بررسی گردید. نبوی و همکارانش [۱۱] تأثیر وصله‌ی کامپوزیتی موضعی در ترمیم لوله‌ی ترک‌دار تحت فشار داخلی را با استفاده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. لوله حاوی ترک نیم‌بیضوی محیطی خارجی بوده و ضرایب شدت تنش در نوک ترک با استفاده از انتگرال $\boldsymbol{J}$ در نرم‌افزار آباکوس تعیین شده است. به منظور انتخاب وصله موضعی مناسب، تأثیر پارامترهای مختلف مانند طول، پهنا، ضخامت، جنس و زاویه‌ی قرارگیری الیاف چندلایه‌ای کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش ارزیابی شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

نتایج تحقیق کاهشی به میزان ۳۰ درصد را در میزان ضریب شدت تنش با استفاده از وصله‌گذاری مناسب نشان داده است. این امر سبب افزایش طول عمر به دلیل کاهش نرخ رشد ترک می‌گردد. ونگ و همکارانش [۱۲] لوله‌ی حاوی ترک نیم‌بیضوی محیطی و طولی را با استفاده از وصله‌ی دورتادوری کامپوزیتی با استفاده از نرم‌اقزار انسیس تحلیل نمودند. لوله از جنس فولاد X100 و وصله کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی با زاویه قرارگیری بهینه‌ی ۶۰± درجه می‌باشد.

دسته‌ی دیگری از تحقیقات صورت گرفته [۱۳-۲۱] به ترمیم ترک‌های سطحی با عمق ثابت در استوانه‌ها می‌پردازد که با استفاده از وصله‌ی دورتادوری کامپوزیتی انجام می‌گیرد. اسماعیل و همکارانش [۱۳] با استفاده از چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تک جهته، ترک سطحی خارجی با عمق ثابت را در مخزن استوانه‌ای ترمیم نمودند. مخزن دچار خوردگی ناشی از آب نمک شده بود و بخش خورده شده با ترکی با عمق ثابت معادل‌سازی شده است. تحلیل مخزن ترک‌دار ترمیم‌شده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. ترمیم کننده کامپوزیتی به صورت الاستیک خطی و مخزن فلزی به صورت غیرخطی مدل‌سازی شده است. شومن و طاهری [۱۴] لوله‌ی خورده شده را با استفاده از چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی به صورت دورتادوری ترمیم نمودند. نوع ترک به صورت عمق ثابت و در سطح بیرونی لوله و در جهت طولی فرض شده است. همچنین نتایج تحلیل آباکوس با نتایج تست مقایسه شده است. غفاری و حسینی‌تودشکی [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار انسیس به تحلیل لوله‌ی سوراخ شده در اثر خوردگی و ترمیم آن با کامپوزیت به صورت دورتادوری پرداختند. ترک به صورت طولی و جبهه‌ی مستقیم لحاظ شده و جنس ترمیم‌کننده کامپوزیتی و چسب به ترتیب شیشه/اپوکسی و FM73 می‌باشند. در تحلیل‌ها از مود ترکیبی برای ارزیابی رفتار ترک استفاده شده است. لیاپین و همکارانش [۱۶] با استفاده از نرم‌افزار انسیس به بررسی ترمیم خرابی ناشی از کنده‌شدن بخشی از ضخامت سطح خارجی لوله فولادی X42 به کمک کامپوزیت دورتادوری پرداختند. حفره ایجاد شده در سطح خارجی به صورت دو بعدی با عمق ثابت و در جهات طولی و محیطی لحاظ شده است. لوکاس و همکارانش [۱۷] مخزن حاوی ترک طولی تمام عمقی را با استفاده از کامپوزیت دورتادوری از جنس الیاف کربن در ماتریس پلیمری ترمیم نمودند. تحلیل با استفاده از نرم‌افزار I-DEAS صورت گرفته است. ملکان و سیمینی [۱۸] به ترمیم لوله‌ی حاوی ترک تمام عمقی طولی با استفاده از ترمیم‌کننده‌های کامپوزیتی بور/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به کمک نرم‌افزار آباکوس پرداختند. لوله مورد بررسی، تحت فشار متحرک در سطح داخلی خود می‌باشد. جهت اتصال ترمیم‌کننده‌ها به لوله‌ی حاوی ترک از چسب FM73 استفاده شده و ترمیم در سطح بیرونی لوله و به صورت دورتادوری انجام شده است. مری‌یِم‌بنزیانه و همکارانش [۱۹] استوانه‌ی حاوی ترک طولی راه به در را با استفاده از کامپوزیت به صورت دورتادوری کامل ترمیم نمودند. فرآیند ترمیم با استفاده از کامپوزیت کربن/اپوکسی در دو حالت یک طرفه (فقط بیرونی) و دوطرفه (درونی و بیرونی) به کمک نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است.

دوست‌وندی و زین‌الدینی [۲۰] لوله‌ی حاوی ترک مورب تمام عمقی را با استفاده از وصله‌ی دورتادوری کامپوزیتی کربن/اپوکسی ترمیم نمودند. به منظور ارزیابی عملکرد لوله‌ی ترمیم شده، در زوایای مختلف ترک، لوله تحت فشار هیدرواستاتیک تست گردید و مشاهده شد در حالت ترک محیطی (زاویه ۹۰ درجه) بدترین عملکرد نسبی را وصله‌ی درتادوری تک جهته از خود نشان می‌دهد. نبوی و همکارانش [۲۱] لوله‌ی تحت فشار داخلی حاوی دو نوع ترک محیطی کامل در سطح داخلی و خارجی را با استفاده از کامپوزیت به صورت دورتادوری ترمیم نمودند. در فرآیند ترمیم از کامپوزیت‌های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی استفاده شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس و به صورت سه بعدی صورت گرفته و تأثیر پارامترهای جنس و ضخامت وصله، تأثیر چیدمان الیاف بر مقاوم‌سازی لوله‌ی ترمیم شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، عمده‌ی تحلیل‌های صورت گرفته در لوله‌های حاوی ترک‌های راه به در و ترک‌های سطحی با استفاده از روش اجزاء محدود و همچنین ترمیم ترک‌ها با استفاده از کامپوزیت‌ها می‌باشد. در تحلیل عددی ترک‌های راه به در، به دلیل موقعیت موضعی ترک، باید از روش اجزاء محدود سه‌بعدی استفاده نمود و مدل‌های دو بعدی کارایی لازم را برای تحلیل ندارد. همچنین ترمیم با استفاده از کامپوزیت‌های دورتادوری و به صورت کامل صورت گرفته است. در مواردی که درز جوش به صورت محیطی باشد موقعیت بروز ترک ناشی از خوردگی و یا ناشی از وجود تنش پس‌ماند در راستای جوش بیشتر است. این موضوع در مواردی که لوله در معرض محیط خورنده به ویژه آب دریا قرار داشته باشد بیشتر اتفاق می‌افتد و ترمیم این نوع ترک با استفاده از وصله‌ی موضعی تاکنون صورت نگرفته است.

در مقاله حاضر استوانه‌ی تحت فشار داخلی حاوی ترک راه به در و تمام عمقی محیطی، که با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی موضعی ترمیم شده با استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی تحلیل شده است. برای این منظور با مدل‌سازی سه بعدی ترک در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از المان‌های تکین در جبهه‌ی آن ابتدا ترک محیطی مدل‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی مدل، ضرایب شدت تنش حاصل از انتگرال J در حالات خاص با نتایج تئوری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

مقایسه شده است. پس از اطمینان از دقت و صحت مدل‌سازی ترک، به ترمیم استوانه‌ی حاوی ترک با استفاده از وصله‌ی موضعی یک‌طرفه با جنس‌های مختلف کامپوزیت‌های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی پرداخته شده است. همچنین در فرآیند تحقیق تاثیر چیدمان وصله کامپوزیتی، خواص چسب و ضخامت چسب بر روی ضرایب شدت تنش روی جبهه‌ی ترک ارزیابی شده است. انتخاب نوع وصله‌ی موضعی سبب صرفه‌جویی در مصرف مواد کامپوزیتی می‌گردد.

۲ - روش‌های تعیین ضرایب شدت تنش

جهت محاسبه‌ی عددی مقادیر ضرایب شدت تنش در مواد همسانگرد روش‌های مختلفی ارائه شده است که هر یک مزایا و معایب خود را دارا می‌باشند. ساده‌ترین نوع استفاده مستقیم از میدان جابجایی حاصل از حل به روش اجزاء محدود در حول نوک ترک و در قالب روش برون‌یابی جابجایی[۳] می‌باشد. در این مدل چنانچه از المان‌های تکین استفاده نشود، به دلیل انفراد تنش در جبهه‌ی ترک، خطای محاسبات زیاد خواهد بود. در این روش ضرایب شدت تنش به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_I = \frac{2\mu}{(1+k)}\sqrt{\frac{2\pi}{\delta}}U_y \qquad (۱)$$

که در آن μ مدول برشی، $k=(3-\nu)/(1+\nu)$ برای حالت تنش صفحه‌ای و $k=(3-4\nu)$ در حالت کرنش صفحه‌ای می‌باشد. همچنین δ فاصله عمودی از جبهه‌ی ترک و U_y جابجایی نقاط در راستای عمودی و حاصل از روش اجزاء محدود است.

روش مشتق سفتی[۴] بر مبنای انرژی استوار است. اساس این نوع بر پایه‌ی رشد مجازی ترک در نوک ترک استوار است و به دقت المان‌بندی در جبهه‌ی ترک حساس می‌باشد. از آنجائیکه رشد مجازی ترک باید صورت گیرد، لذا برای حل باید دو بار مسأله حل شود تا بتوان اختلاف انرژی پتانسیل دو حالت را بدست آورد. در روش مشتق سفتی، تغییر انرژی جسم ترک‌دار بازای رشد مجازی ترک مبنای تعیین ضرایب شدت تنش به صورت زیر می‌باشد:

$$K_I^{\,2} = -\frac{H}{2}\{u\}^T(\partial[K]/\partial l)\{u\} \qquad (۲)$$

که در آن $\{u\}$ بردار جابجایی نقاط گرهی، $[K]$ ماتریس سفتی و $[l]$ طول ترک می‌باشد. همچنین $H=E$ برای حالت تنش صفحه‌ای و $H=E/(1-\nu^2)$ در حالت کرنش صفحه‌ای است. مشتق سفتی در این معادله به ازای رشد مجازی ترک به اندازه‌ی بسیار کوچک نسبت به طول المان صورت می‌گیرد.

روش دیگر استفاده از انتگرال J می‌باشد که این معایب را نداشته و قابل استفاده در ترک‌های دو بعدی و سه بعدی می‌باشد. ماهیت انتگرال J در مکانیک شکست الاستیک خطی، نرخ رهایش انرژی است که به صورت اختلاف مقدار انرژی پتانسیل یک جسم ترک‌دار در دو طول ترک مختلف در قالب یک انتگرال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \oint_{\Gamma}[Wn_1 - t_i(\partial u_i/\partial x_1)]\,ds \qquad (۳)$$

که در آن Γ مسیر بسته دلخواه است که الزاماً باید از سطح پایین ترک شروع و به سطح بالای آن ختم گردد. به عبارت دیگر حول جبهه‌ی ترک محیط می‌شود. در ترک‌های سه بعدی باید توجه شود که این مسیر دلخواه باید داخل صفحه‌ی عمود بر جبهه‌ی ترک قرار داشته باشد. همچنین W چگالی انرژی کرنشی، n_1 مؤلفه‌ی بردار یکه‌ی عمود بر این مسیر در راستای محور x_1، t_i و u_i به ترتیب بردارهای نیروی سطحی و جابجایی می‌باشند. عملاً مقادیر داخل این انتگرال از حل روش اجزاء محدود محاسبه می‌شود و سپس با انتگرالگیری عددی مقدار J محاسبه می‌شود. حُسن استفاده از این روش عدم محدودیت آن در تحلیل‌های الاستیک و پلاستیک می‌باشد. ضرایب شدت تنش با تعیین J به صورت زیر بدست می‌آید:

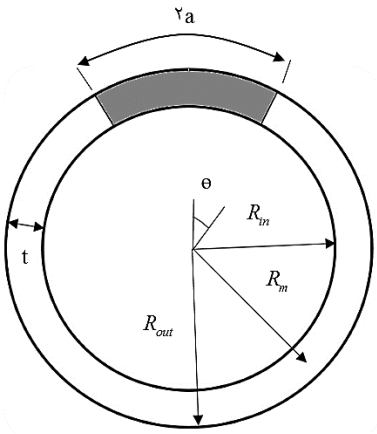
$$K_I = \sqrt{\frac{8\mu J}{(1+k)}} \qquad (۴)$$

۳ - مدل هندسی و مواد

در این تحقیق به بررسی رفتار لوله‌های استوانه‌ای فولادی آسیب‌دیده حاوی ترک محیطی با طول ترک‌های مختلف قبل و بعد از ترمیم پرداخته شده است. در تحقیق به منظور اعتبارسنجی مدل‌های مورد بررسی، ابتدا، لوله استوانه‌ای با ترک محیطی به ازای طول ترک‌های مختلف تحت بارگذاری کششی محوری شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل شده است. در این حالت لوله ترک‌دار به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و مقادیر ضرایب شدت تنش در نوک ترک به ازای طول ترک‌های مختلف محاسبه و با نتایج تئوری مقایسه و ارزیابی شده است. سپس به ترمیم لوله استوانه‌ای حاوی ترک محیطی با استفاده از مواد کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری فشاری پرداخته شده است. پیکربندی هندسی لوله ترک خورده در شکل ۱ آورده شده است. لوله استوانه‌ای دارای شعاع داخلی $R_i = ۱۹۰/۴\ mm$، طول $L_c = ۴۰۰۰\ mm$ و ضخامت دیواره لوله $t = ۹/۶\ mm$ می‌باشد. در فرآیند ترمیم از کامپوزیت‌های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی استفاده شده است. خواص مکانیکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

لوله ترک‌دار، وصله‌های کامپوزیتی و چسب در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ – لوله ترک‌دار حاوی ترک محیطی راه به در تمام عمقی

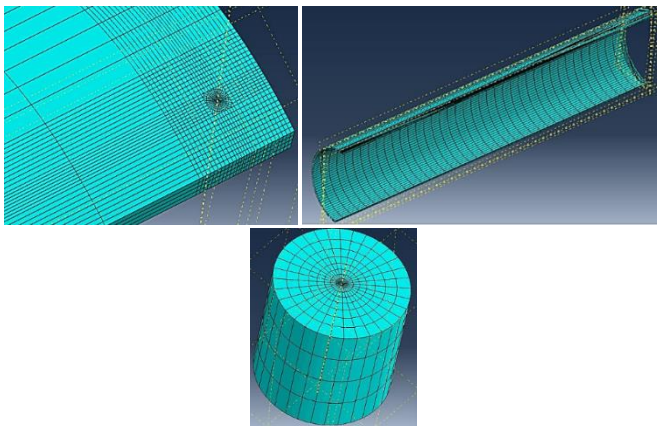
جدول ۱ - خواص مکانیکی مواد بررسی در تحقیق حاضر [۲۲]

خواص	فولاد	چسب	بور/ اپوکسی	کربن/ اپوکسی	کولار/ اپوکسی	شیشه/ اپوکسی
E_1 $[GPa]$	۲۰۰	۲/۵۵	۲۰۸	۱۷۲/۴	۸۰	۴۱
$E_2=E_3$ $[GPa]$	–	–	۲۵/۴۰	۱۰/۳۴	۵/۵۰	۱۲
$G_{13}=G_{12}$ $[GPa]$	–	–	۷/۲۴	۴/۸۲	۲/۲۰	۵/۵۰
G_{23} $[GPa]$	–	–	۴/۹۴	۳/۱۰	۱/۸۰	۳/۵۰
$\nu_{13}=\nu_{12}$	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۲۸
ν_{23}	–	–	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۵۰

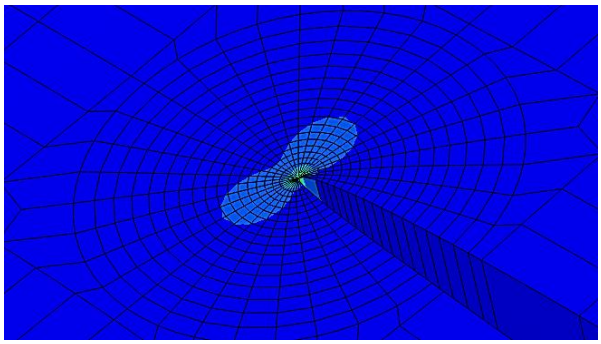
۴ - مدل اجزاء محدود

۴-۱- لوله ترک‌دار بدون وصله ترمیمی

در این بخش جهت اعتبار بخشی مدل‌های پیشنهادی، ابتدا لوله استوانه‌ای حاوی ترک محیطی به ازای طول ترک‌های مختلف تحت کشش محوری ($\sigma = ۱۰۰\ MPa$) به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و نتایج حاصل با نتایج تئوری ارزیابی شده است. برای مش‌بندی لوله از المان C3D20R که یک المان آجری مرتبه بالا و دارای ۲۰ گره است، استفاده شده است. نوع انتگرالگیری در این المان از نوع کاهش یافته می‌باشد. برای مدل‌سازی اطراف نوک ترک از المان هرمی C3D15 برای اعمال تکینگی نوک ترک استفاده شده است. در این نوع المان با انتقال گره میانی به موقعیت یک چهارم، در نوک المان تکینگی رخ می‌دهد که برای مدل‌سازی جبهه‌ی ترک باید از این نوع المان استفاده نمود. به دلیل وجود دو صفحه‌ی تقارن (طولی و عرضی) در مدل ترک‌دار از مدل یک چهارم با اعمال شرایط مرزی معادل (جابجایی صفر عمود بر صفحه‌ی تقارن) استفاده شده است. مش‌بندی نمونه و پالایش مش در ناحیه نوک ترک و نتایج عددی توزیع تنش اطراف نوک ترک به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲ – نمایش مش بندی لوله ترک‌دار با ترک محیطی



شکل ۳ – نمایش توزیع تنش در اطراف نوک ترک

برای محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش نوک ترک از روش انتگرال J استفاده شده است. با توجه به آنکه ماهیت این روش به گونه‌ای است که در صورت المان‌بندی مناسب، نتایج مستقل از مسیر انتخابی برای تعیین ضریب شدت تنش می‌باشند، لذا نتایج هر مسیر باید با هم برابر بوده و یا بسیار به هم نزدیک باشند که در این صورت نتایج همگرا خوانده می‌شوند. از این‌رو همگرایی نتایج انتگرال J با تغییر و انتخاب المان‌بندی مناسب در کلیه‌ی مدل‌ها اعمال شده است. نتایج ضریب شدت تنش به ازای طول ترک‌های مختلف برای پنج مسیر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ - نتایج ضریب شدت تنش به ازای طول ترک‌های مختلف در مسیرهای مختلف

طول ترک، a $[mm]$	KI $[MPa.m^{1/2}]$				
	مسیر ۱	مسیر ۲	مسیر ۳	مسیر ۴	مسیر ۵
۲۵/۴	۲۹/۴۵۷	۲۹/۹۴۶	۲۹/۹۴۷	۲۹/۹۴۷	۲۹/۹۴۹
۳۸/۱	۳۸/۷۲۸	۳۸/۹۳۴	۳۸/۹۳۵	۳۸/۹۳۵	۳۸/۹۳۷
۵۰/۸	۴۷/۳۶۵	۴۷/۷۶۵	۴۷/۷۶۶	۴۷/۷۶۶	۴۷/۷۶۸
۶۳/۵	۵۶/۰۱۲	۵۶/۲۷۲	۵۶/۲۷۳	۵۶/۲۷۳	۵۶/۲۷۵
۷۶/۲	۶۶/۱۲۴	۶۶/۶۰۶	۶۶/۶۰۷	۶۰۷/۶۶	۶۶/۶۰۹
۸۹/۹	۷۷/۰۳۹	۷۷/۵۰۶	۷۷/۵۰۷	۷۷/۵۰۷	۷۷/۵۰۹

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

به منظور اثبات صحت مدل سازی عددی از حل تئوری استفاده شده است. ضریب شدت تنش لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی تحت بارگذاری کششی به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$K_I = (F_t \sigma_t)\sqrt{\pi R\theta} \qquad (۵)$$

که در آن F_t ضریب تصحیح کششی می‌باشد. تنش اسمی به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_t = \frac{P}{2\pi Rt} \qquad (۶)$$

ضریب تصحیح کششی برای ضرایب شدت تنش در استوانه حاوی ترک محیطی تحت کشش محوری بر طبق مطالعات تاکاشی [۲۳] به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$F_t = \left[A_t + B_t(\theta/\pi) + C_t(\theta/\pi)^2 + D_t(\theta/\pi)^3 + E_t(\theta/\pi)^4\right] \qquad (۷)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} A_t &= 1; \\ B_t &= -1.040 - 3.183\lambda - 4.83\lambda^2 - 2.369\lambda^3; \\ C_t &= 16.71 + 23.10\lambda + 50.82\lambda^2 + 18.02\lambda^3; \\ D_t &= -25.85 - 12.05\lambda - 87.24\lambda^2 - 30.39\lambda^3; \\ E_t &= 24.70 - 54.18\lambda + 18.09\lambda 2 + 6.745\lambda^3; \\ \lambda &= \log\left(\frac{t}{R}\right) \end{aligned} \qquad (۸)$$

مقایسه نتایج حاصل از روش عددی به ازای طول ترک‌های مختلف با نتایج تئوری در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی تطابق خوبی را با نتایج تئوری نشان می‌دهد.

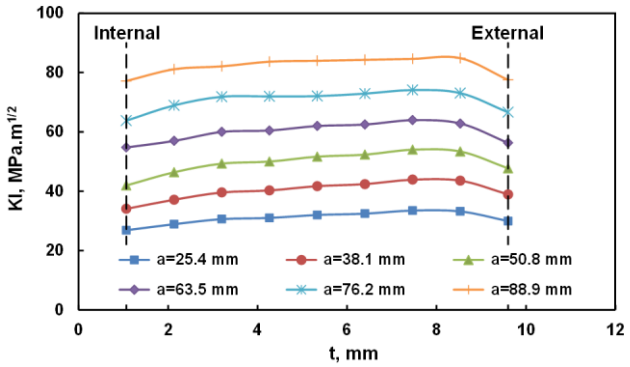
جدول ۳- مقایسه ضرایب شدت تنش در استوانه فولادی ترک‌دار تحت کشش محوری (۱۰۰ *MPa*)

طول ترک، a $[mm]$	تئوری، KI $[MPa.m^{1/2}]$	عددی، KI $[MPa.m^{1/2}]$	خطا ٪
۲۵/۴	۲۹/۸۳	۲۹/۹۴	۰/۳۶
۳۸/۱	۳۸/۶۱	۳۸/۹۳	۰/۵۶
۵۰/۸	۴۷/۵۷	۴۷/۷۶	۰/۴۰
۶۳/۵	۵۵/۸۳	۵۶/۲۷	۰/۷۸
۷۶/۲	۶۵/۶۶	۶۶/۶۰	۱/۴۳
۸۸/۹	۷۶/۳۶	۷۷/۵۰	۱/۴۹

نتایج ضرایب شدت تنش نقاط مختلف جبهه ترک در طول ضخامت استوانه با نعریف نه گره از شعاع داخلی استوانه تا شعاع بیرونی تحت بارگذاری کششی در جدول ۴ و شکل ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴- ضریب شدت تنش روی جبهه ترک برای طول ترک مختلف در استوانه تحت کشش یکنواخت محوری (۱۰۰ *MPa*)

شماره گره روی جبهه ترک	KI $[MPa.m^{1/2}]$					
	۲۵/۴ $[mm]$	۳۸/۱ $[mm]$	۵۰/۸ $[mm]$	۶۳/۵ $[mm]$	۷۶/۲ $[mm]$	۸۸/۹ $[mm]$
۱ (External)	۲۹/۹۴	۳۸/۹۳	۴۷/۷۰	۵۶/۲۷	۶۶/۶۰	۷۷/۵۰
۲	۳۳/۲۰	۴۳/۵۶	۵۳/۳۹	۶۲/۸۲	۷۳/۰۶	۸۴/۸۵
۳	۳۳/۴۹	۴۳/۸۹	۵۴/۰۰	۶۳/۹۵	۷۴/۱۰	۸۴/۶۱
۴	۳۲/۴۴	۴۲/۴۰	۵۲/۳۳	۶۲/۴۷	۷۲/۹۰	۸۴/۲۸
۵	۳۲/۰۰	۴۱/۷۰	۵۱/۶۶	۶۱/۹۹	۷۲/۰۵	۸۳/۹۶
۶	۳۳/۰۱	۴۰/۲۷	۵۰/۰۰	۶۰/۴۶	۷۱/۹۵	۸۳/۶۶
۷	۳۰/۶۰	۳۹/۵۸	۴۹/۳۰	۵۹/۹۹	۷۱/۸۴	۸۲/۰۹
۸	۲۸/۸۹	۳۷/۱۴	۴۶/۳۹	۵۶/۹۵	۶۸/۹۳	۸۱/۱۲
۹ (Internal)	۲۶/۸۶	۳۴/۰۷	۴۱/۹۵	۵۴/۷۶	۶۳/۷۸	۷۷/۱۵



شکل ۴ – نمایش ضرایب شدت تنش روی جبهه ترک برای طول ترک‌های مختلف تحت کشش

۴-۲- لوله ترک‌دار با وصله‌های ترمیمی

در این قسمت عملکرد لوله استوانه‌ای حاوی ترک محیطی قبل و بعد از ترمیم با استفاده از مواد کامپوزیتی تحت فشار داخلی ($\sigma = ۵\ MPa$) مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه بین شعاع درونی، فشار درونی و فشار عبارت است:

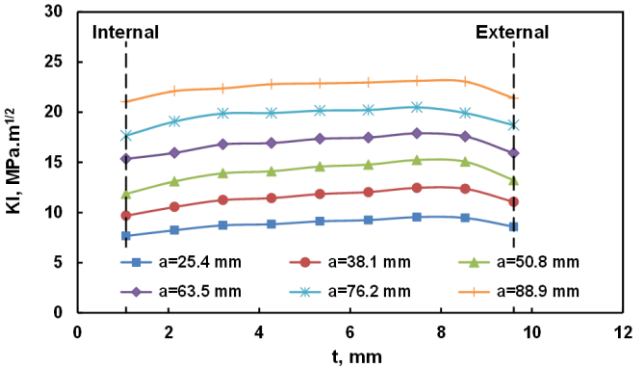
$$\sigma = \frac{PR_i}{2t} \qquad (۹)$$

نتایج ضرایب شدت تنش نقاط مختلف جبهه ترک در طول ضخامت استوانه از شعاع داخلی استوانه تا شعاع بیرونی تحت بارگذاری فشاری در جدول ۵ و شکل ۵ نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

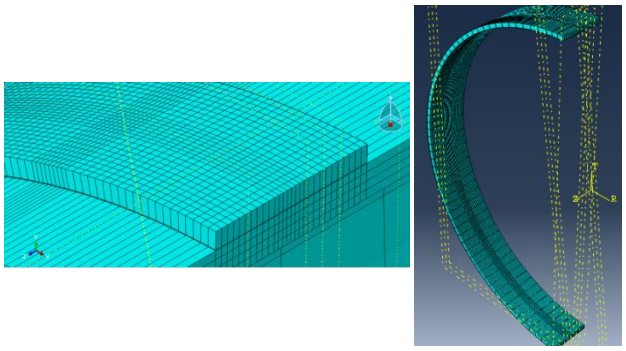
جدول ۵- ضریب شدت تنش روی جبهه ترک برای طول ترک مختلف در استوانه تحت فشار داخلی (۵ *MPa*)

شماره گره روی جبهه ترک	$KI\ [MPa.m^{1/2}]$					
	۲۵/۴ [*mm*]	۳۸/۱ [*mm*]	۵۰/۸ [*mm*]	۶۳/۵ [*mm*]	۷۶/۲ [*mm*]	۸۸/۹ [*mm*]
۱ (External)	۸/۵۳	۱۱/۰۵	۱۳/۲۲	۱۵/۹۰	۱۸/۷۰	۲۱/۳۹
۲	۹/۴۶	۱۲/۳۶	۱۵/۰۶	۱۷/۵۸	۱۹/۹۲	۲۳/۰۵
۳	۹/۵۴	۱۲/۴۶	۱۵/۲۴	۱۷/۸۹	۲۰/۴۹	۲۳/۱۲
۴	۹/۲۴	۱۲/۰۳	۱۴/۷۷	۱۷/۴۷	۲۰/۲۱	۲۲/۹۶
۵	۹/۱۲	۱۱/۸۴	۱۴/۵۸	۱۷/۳۵	۲۰/۱۶	۲۲/۸۷
۶	۸/۸۳	۱۱/۴۳	۱۴/۱۱	۱۶/۹۲	۱۹/۹۱	۲۲/۷۹
۷	۸/۷۲	۱۱/۲۴	۱۳/۹۱	۱۶/۷۹	۱۹/۸۷	۲۲/۳۷
۸	۸/۲۳	۱۱/۵۵	۱۳/۱۰	۱۵/۹۴	۱۹/۰۷	۲۲/۱۰
۹ (Internal)	۷/۹۹	۹/۶۸	۱۱/۸۵	۱۵/۳۵	۱۷/۶۶	۲۱/۰۴

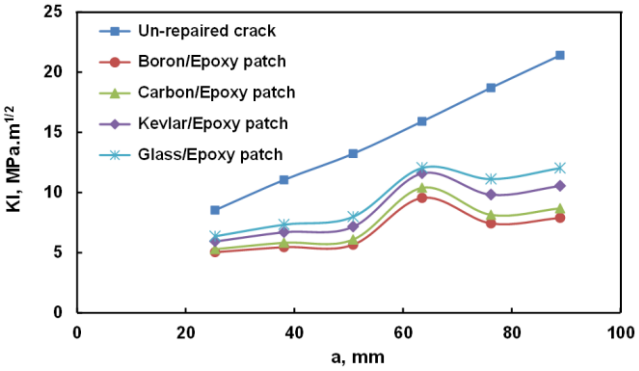


شکل ۵ – نمایش ضرایب شدت تنش روی جبهه ترک برای طول ترک‌های مختلف تحت فشار داخلی

پس از بررسی رفتار عددی استوانه ترک‌دار تحت فشار داخلی به تجزیه و تحلیل روند ترمیم این نوع آسیب با استفاده از ترمیم کننده‌های کامپوزیتی پرداخته شده است. لوله ترک‌دار، چسب و وصله کامپوزیتی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. لوله استوانه‌ای با چهار لایه المان، چسب با یک لایه المان و وصله کامپوزیتی با یک لایه المان در جهت ضخامت مدل سازی شده است (شکل ۶). ترمیم کننده کامپوزیتی با استفاده از المان C3D8R (المان ۸ گره‌ای آجری شکل) و لایه چسب با استفاده از المان COH3D8 (المان سه بعدی و ۸ گرهی با ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره) مدل‌سازی شده است. همچنین برای تعریف تماس بین سطوح از اندرکنش Surface-to-Surface contact استفاده شده و اتصال سطوح به کمک قید Tie برقرار شده است. برای ترمیم و تقویت از کامپوزیت‌های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی استفاده شده و اتصال وصله‌های کامپوزیتی به لوله ترک‌دار با یک لایه چسب به ضخامت ۰/۲ *mm* ایجاد شده است. ضخامت وصله پس از بارگذاری و بررسی میزان تاثیرگذاری آن بر شدت تنش در نوک ترک، ۵ *mm* و طول وصله دو برابر طول ترک لحاظ شده است. نتایج تغییرات ضریب شدت تنش به صورت تابعی از طول ترک در شرایط قبل و بعد از ترمیم با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی مختلف در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ترمیم نقش عمده‌ای را در بازآوری استحکام قطعه ترک‌دار ایفا می‌کند. نتایج تحقیق کاهشی به میزان ۲/۱۶، ۲/۰۰، ۱/۷۲ و ۱/۶۰ برابری را در ضریب تنش به ترتیب برای وصله‌های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی، کولار/اپوکسی و شیشه/اپوکسی نشان داده است (جدول ۶).



شکل ۶ – نمایش مش بندی اجزا لوله ترک‌دار ترمیم شده



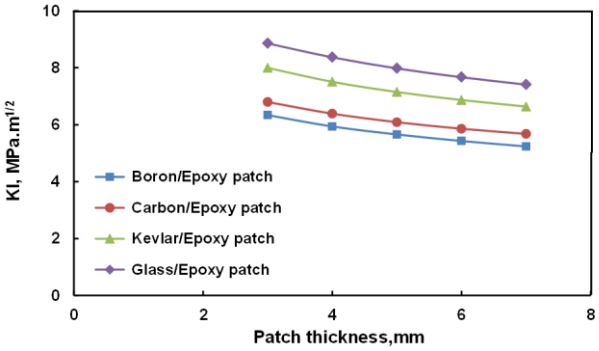
شکل ۷ – تغییرات ضرایب شدت تنش در توک ترک (External) برای طول ترک‌های مختلف قبل و بعد از ترمیم

جدول ۶- مقایسه میانگین ضرایب شدت تنش قبل و بعد از ترمیم به کمک وصله‌های کامپوزیتی

وضعیت استوانه ترک‌دار	میانگین ضریب شدت تنش در نوک ترک، $KI\ [MPa.m^{1/2}]$
بدون ترمیم	۱۴/۸۰
ترمیم با وصله بور/اپوکسی	۶/۸۴
ترمیم با وصله کربن/اپوکسی	۷/۴۰
ترمیم با وصله کولار/اپوکسی	۸/۶۲
ترمیم با وصله شیشه/اپوکسی	۹/۴۷

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

اثر افزایش ضخامت وصله‌های کامپوزیتی بر استحکام لوله ترک‌دار به ازای طول ترک mm ۵۰/۸ و جهت گیری الیاف در راستای محیط استوانه در شکل ۸ و جدول ۷ آورده شده است.



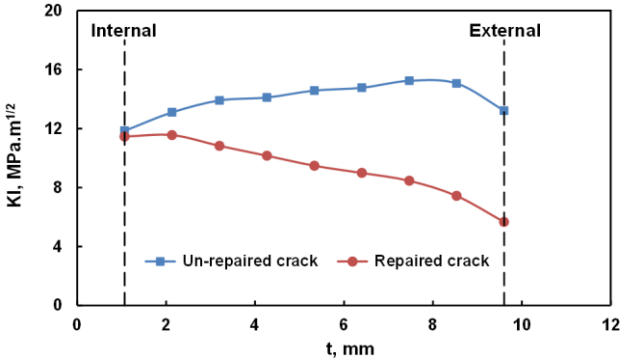
شکل ۸ – اثر ضخامت وصله‌های کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش استوانه ترک‌دار با طول ترک mm ۵۰/۸

جدول ۷- نتایج تغییر ضخامت وصله‌های کامپوزیتی بر فرآیند ترمیم استوانه ترک‌دار با طول ترک mm ۵۰/۸

ضخامت وصله $[mm]$	ضریب شدت تنش در نوک ترک، KI $[MPa.m^{1/2}]$			
	بور/ اپوکسی	کربن/ اپوکسی	کولار/ اپوکسی	شیشه/ اپوکسی
۳	۶/۳۴	۶/۸۰	۸/۰۰	۸/۸۶
۴	۵/۹۴	۶/۳۹	۷/۵۱	۸/۳۷
۵	۵/۶۶	۶/۰۹	۷/۱۵	۷/۹۸
۶	۵/۴۳	۵/۸۶	۶/۸۷	۷/۶۷
۷	۵/۲۴	۵/۶۸	۶/۶۴	۷/۴۱

همانطور که مشاهده می‌شود ماده کامپوزیتی بور/اپوکسی به سبب داشتن مدول الاستیسیته بالاتر نسبت به سه ماده دیگر، کاهش بیشتری را ضریب شدت تنش ایجاد می‌کند. به بیان دیگر استحکام و مدول یانگ بالای ماده ترمیمی، سبب می‌شود تا ضخامت وصله مورد نیاز به حداقل مقدار خود برسد. ضخامت بیش از حد وصله، سبب جدایش زود هنگام و عدم کارایی وصله و افزایش هزینه می‌شود.

نتایج ضرایب شدت تنش نقاط مختلف جبهه ترک به ازای طول ترک a=۵۰/۸ mm در طول ضخامت استوانه قبل و بعد از ترمیم به کمک وصله بور/اپوکسی در شکل ۹ آورده شده است. نتایج ترمیم در راس بیرونی ترک تاثیر بیشتری را در کاهش شدت تنش به دلیل تماس مستقیم وصله نسبت به راس داخلی آن نشان می‌دهد.

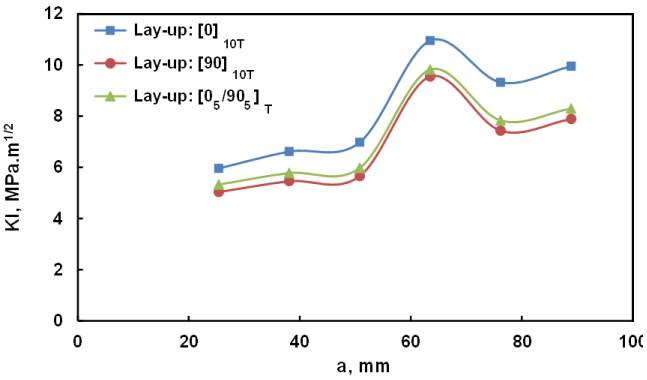


شکل ۹ – ضرایب شدت تنش در طول ضخامت استوانه ترک‌دار (a=۵۰/۸ mm) قبل و بعد از ترمیم با وصله بور/اپوکسی

در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای جهت گیری الیاف، جنس چسب و ضخامت چسب بر رفتار سازه آسیب دیده پس از ترمیم پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است بر اساس نتیجه عملکرد بهتر وصله بور/اپوکسی در فرآیند ترمیم، این ماده کامپوزیتی مبنای بررسی اثر پذیری قرار گرفته است.

۴-۲-۱- تاثیر چیدمان وصله کامپوزیتی

به منظور بررسی تأثیر چیدمان کامپوزیت بر ضریب شدت تنش، وصله‌ی کامپوزیتی بور/اپوکسی با ده لایه و جهت گیری‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل عددی برای چیدمان‌های ۰ و ۹۰ درجه در شکل ۱۰ آورده شده است. نتایج، کاهش قابل توجهی را در حوزه‌های تنش و متعاقب آن ضریب شدت تنش در نوک ترک به ازای طول‌های مختلف ترک برای چیدمان ۹۰ درجه نسبت به دو چیدمان دیگر نشان داده است.

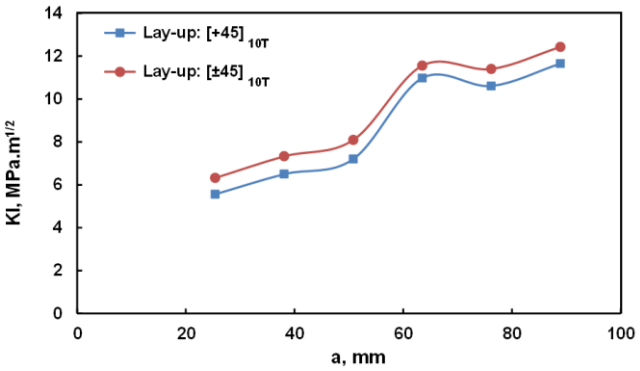


شکل ۱۰ – اثر کامپوزیت بور/اپوکسی با چیدمان ۰ و ۹۰ درجه بر ضریب شدت تنش در استوانه ترمیم شده

در ادامه به بررسی تاثیر لایه گذاری ۴۵+ و ۴۵± درجه بر افزایش قابلیت باربری استوانه ترک‌دار پس از ترمیم پرداخته شده است. نتایج حاصل در شکل ۱۱ آورده شده است. همانطور که ملاحظه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

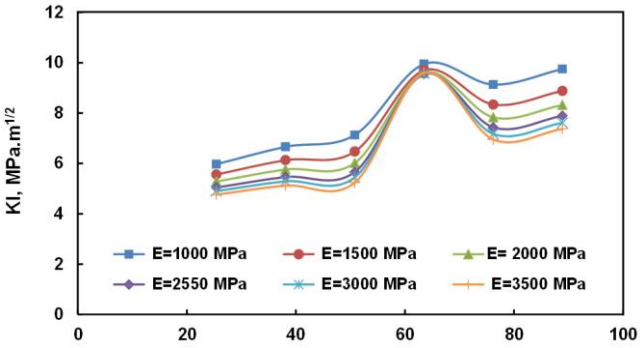
می‌شود چیدمان ۴۵+ درجه نقش بهتری را در کاهش ضریب شدت تنش نسبت به چیدمان ۴۵± درجه ایفا می‌کند.



شکل ۱۱ – اثر کامپوزیت بور/اپوکسی با چیدمان ۴۵ و ۴۵± بر ضریب شدت تنش در استوانه ترمیم شده

۴-۲-۲- تاثیر خواص چسب

در فرآیند ترمیم، تنش‌های ماکزیمم به چسب و به تبع آن به وصله کامپوزیتی به منظور کاهش تنش در نوک ترک انتقال می‌یابد، لذا خواص چسب تاثیر زیادی بر استحکام محل اتصال دارد. هر اندازه ماده‌ی چسب دارای خواص برشی بالاتری باشد، محل اتصال از استحکام بیشتری برخودار خواهد بود. بنابراین در فرآیند ترمیم ترک‌ها یا نقایص باید دقت خاصی در انتخاب چسب صورت پذیرد. تغییرات ضرایب شدت تنش به ازای طول ترک‌های مختلف برای مقادیر مختلف مدول برشی چسب در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲ – ضرایب شدت تنش در طول نوک ترک به ازای مدول یانگ مختلف چسب

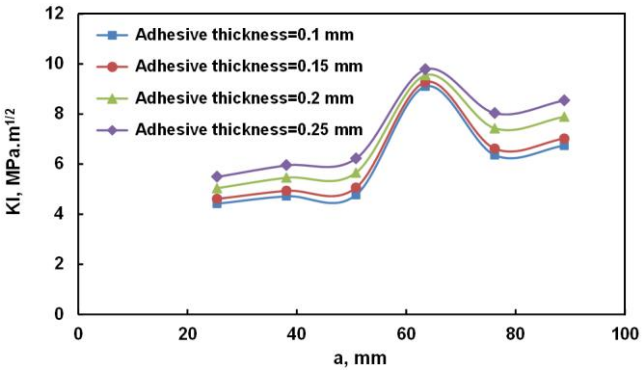
نتایج نشان می‌دهد با افزایش مدول یانگ چسب میزان ضرایب شدت تنش کاهش می‌یابد. چسب‌های سفت‌تر، کارایی بهتری دارند. هرچند، افزایش مدول برشی چسب کاهش استحکام چسبندگی را به همراه خواهد داشت که می‌تواند منجر به تخریب چسبندگی شود. تنش چسب مرتبط با مدول یانگ چسب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \frac{E_a(U_1 - U_2)}{2(1+\nu)e_a} \qquad (۱۰)$$

که درآن U_1 و U_2 جابه‌جایی در ناحیه چسبناک، ν ضریب پواسون و e_a ضخامت چسب است. با افزایش مدول یانگ، انتقال تنش بین لوله ترمیم شده و وصله کامپوزیتی افزایش می‌یابد. در اینحالت کاهش تنش در اطراف ترک و در نتیجه کاهش ضریب شدت تنش در اطراف نوک ترک را به همراه خواهد داشت.

۴-۲-۳- تاثیر ضخامت چسب

ضخامت لایه چسب از دیگر پارامترهایی است که اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب شدت تنش نوک ترک دارد. در این قسمت به بررسی اثر این پارامتر در طراحی فرآیند ترمیم سازه آسیب دیده پرداخته شده است. در شکل ۱۳ نتایج حاصل از تغییر ضخامت چسب بر ضریب شدت تنش استوانه ترک‌دار پس از ترمیم به کمک وصله بور/اپوکسی آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضخامت لایه چسب ضریب شدت تنش افزایش یافته و با کاهش ضخامت چسب، این ضریب کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل انتقال بیشتر بار به وصله کامپوزیتی می‌باشد. لازم به ذکر است اتصال چسبی خوب جهت ترمیم با ضخامت کم، عموماً بین ضخامت ۰/۱۲۴ *mm* تا ۰/۲۴۹ *mm* به وجود می‌آید. در باند ضخیم چسب تمایل به ایجاد خلل و فرج وجود داشته و سبب ایجاد اتصال ضعیف می‌شود. در مقابل باند نازک چسب بسیار سخت و ترد می‌باشد. همچنین با کاهش ضخامت لایه چسب، احتمال جدایش آن بیشتر می‌شود [۲۴].



شکل ۱۳ – اثر ضخامت چسب بر ضریب شدت تنش مود اول به صورت تابعی از طول ترک

۵ – نتیجه گیری

در مقاله حاضر عملکرد لوله استوانه‌ای حاوی ترک راه به در محیطی تحت فشار داخلی، قبل و پس از ترمیم با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به منظور اطمینان از صحت روند مدل‌سازی، استوانه‌ی حاوی ترک تحت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

نیروی کششی یکنواخت به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش انتگرال J، حوزه‌های تنش و متعاقب آن ضرایب شدت تنش روی جبهه ترک به ازای طول ترک‌های مختلف تعیین شده است. نتایج حاصل، توافق بسیار خوبی را در مقایسه با نتایج تئوری نشان داده است. سپس با تغییر بارگذاری به حالت فشاری، عملکرد استوانه ترک‌دار قبل و پس از ترمیم به کمک وصله‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ذیل حاصل شده است:

- ضرایب شدت تنش قبل و پس از ترمیم بر روی استوانه‌ای حاوی ترک راه به در محیطی به ازای طول‌های ترک ۲۵/۴، ۳۸/۱، ۵۰/۰۸، ۶۳/۵، ۷۶/۲، ۸۸/۹ میلی متر استخراج و ملاحظه شد استفاده از وصله کامپوزیتی تاثیر بسزایی در کاهش مقدار ضرایب تنش دارد.
- ضرایب شدت تنش در ناحیه آسیب، با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. حال آنکه پس از ترمیم، کاهش بیشتری در مقدار ضرایب شدت تنش با افزایش طول ترک مشاهده شده است.
- مواد کامپوزیتی بور/اپوکسی و کربن/اپوکسی به سبب داشتن مدول الاستیسیته بالاتر نسبت به دو ماده دیگر، تاثیر عمده‌تری در فرآیند ترمیم سازه‌های آسیب دیده دارند.
- ترمیم در راس بیرونی ترک تاثیر بیشتری را در کاهش شدت تنش به دلیل تماس مستقیم وصله نسبت به راس داخلی آن دارد.
- افزایش ضخامت وصله و کاهش ضخامت چسب سبب افزایش استحکام سازه آسیب دیده می‌شود. لازم به ذکر است افزایش بیش از حد ضخامت وصله یا کاهش بیش از حد ضخامت لایه چسب، کارایی نامطلوب و احتمال جدایش نابهنگام را به همراه خواهد داشت.
- چیدمان وصله کامپوزیتی نقش عمده‌ای در ترمیم سازه آسیب دیده دارد. هر چه زاویه قرارگیری الیاف نسبت به جهت بار وارده بیشتر باشد، اثر کمتری بر افزایش عمر و کاهش ضریب شدت تنش استوانه‌ی ترک‌دار خواهد داشت. این امر به سبب کاهش سفتی موثر وصله کامپوزیتی در جهت عمود بر راستای ترک می‌باشد.
- استحکام و مدول مناسب ماده ترمیمی و چسب سبب دست‌یابی به ضخامت مناسب وصله و چسب در فرآیند ترمیم می‌شود.

کلید واژگان

1- Through-wall crack
2- Part through crack
3- Displacement extrapolation
4- Stiffness derivative technique

۶ - مراجع

1- Lam, C.C., Cheng, J.J. and Yam, C.H., (2011), *Finite element study of cracked steel circular tube repaired by FRP patching*, Procedia Engineering, Vol. 14, p. 1106-1113.

2- Meriem-Benziane, M., Abdul-Wahab, S.A., Merah, N. and Babaziane, B., (2014), *Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with adhesive band in pipeline API X65*, Advanced Materials Research, Vols. 875-877, p. 1101-1105.

3- Woo, K.S., Ahn, J.S. and Yang, S.H., (2016), *Cylindrical discrete-layer model for analysis of circumferential cracked pipes with externally bonded composite materials*, Composite Structures, Vol. 143, p. 317-323.

4- Zarrinzadeh, H., Kabir, M.Z. and Deylami, A., (2017), *Crack growth and debonding analysis of an aluminum pipe repaired by composite patch under fatigue loading*, Thin-Walled Structures, Vol. 112, p. 140-148.

5- Zarrinzadeh, H., Kabir, M.Z. and Deylami, A., (2017), *Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminium pipe repaired by composite patch*, Engineering Structures, Vol. 133, p. 24-32.

6- Benyahia, F., Albedah, A. and Bachir Bouiadjr, B., (2014), *Stress intensity factor for repaired circumferential cracks in pipe with Bonded composite wrap*, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 136, p. 041201-1-5.

7- Ayatollahi, M.R., Azad, H. and Hashemi, R., (2007), *Investigation of the behavior of cracked tubes reinforced with composite patch*, 1st Iranian Pipe and Pipeline Conference, Tehran. (In Persian)

8- Belhadri, D.E., Belhamiani, M., Bouzitouna, W.N. and Oudad W., (2019), *Stress intensity factors analyses for external semi-elliptical crack for repaired gas-pipeline by composite overwrap under pressure*, Frattura ed Integrità Strutturale, Vol. 49, p. 599-613.

9- Medjdoub, S.M., Bouadjra, B.B. and Abdelkader M. (2018), *Optimization of the geometrical parameters of bonded composite wrap for repairing cracked pipelines*, Frattura ed Integrità Strutturale, Vol. 46, p. 102-112

10- Valadi, Z., Bayesteh, H. and Mohammadi, S., (2018), *XFEM fracture analysis of cracked pipeline with and without FRP composite repairs*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, In press.

11- Nabavi, S.M., Jamal-Omidi, M. and Sharifi H., (2018), *Numerical Study of Effective Factors Caused by Composite Patch on Increasing the Performance of Semi-Elliptical Cracked Cylinder*, Journal of Mechanical Engineering Tabriz University, Accepted paper. (In Persian)

12- Wang, L., Song, S., Deng, H. and Zhong, K. (2018), *Finite-Element Analysis of Crack Arrest Properties of Fiber Reinforced Composites Application in Semi-Elliptical Cracked Pipelines*, Applied Composite Materials, Vol. 25, p. 321-334.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]

13- Esmaeel, R.A., Khan, M.A. and Taheri, F., (2012), *Assessment of the environmental effects on the performance of FRP repaired steel pipes subjected to internal pressure*, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 134, p. 041702-1-7.
14- Shouman, A. and Taheri, F., (2011), *Compressive strain limits of composite repaired pipelines under combined loading states*, Composite Structures, Vol. 93, p. 1538-1548.
15- Ghaffari, M.A. and Hosseini-Toudeshky, H., (2013), *Fatigue crack propagation analysis of repaired pipes with composite patch under cyclic pressure*, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 135, p. 031402-1-9.
16- Lyapin, A.A., Chebakov, M.I., Dumitrescu, A. and Zecheru, G., (2015), *Finite-element modeling of a damaged pipeline repaired using the wrapped of a composite material*, Mechanics of Composite Materials, Vol. 51, p. 333-340.
17- Lukács, J., Nagy, G., Török, I., Égert, J. and Pere, B., (2010), *Experimental and numerical investigations of external reinforced damaged pipelines*, Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 1191-1200.
18- Malekan, M. and Cimini Jr, C.A., (2018), *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, p. 980-1004.
19- Meriem-Benziane, M., Abdul-Wahab, S.A., Zahloul, H., Babaziane, B., Hadj-Meliani, M. and Pluvinage, G., (2015), *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, p. 431-439.
20- Doostvandi, B. and Zeinedini, A., (2019), *Repair of inclined notches in the pressurized steel pipes using laminated composites*, Material Design & Processing Communications, In press.
21- Nabavi, S.M., Pourabdol, A. and Jamal-Omidi, M., (2018), *Numerical study of the effect of the composite patches on the stress intensity factors for a circumferential fully crack in pipes*, Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), Accepted paper. (In Persian)
22- Jamal-Omidi, M., Falah, M. and Taherifar, D., (2014), *3-D fracture analysis of cracked aluminum plates repaired with single and double composite patches using XFEM*, Vol. 50, p.525-539.
23- Takahashi, Y., (2002), *Evaluation of leak-before-break assessment methodology for pipes with a circumferential through-wall crack. Part I: stress intensity factor and limit load solutions*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 79, p. 385-392.
24. Okafor A.C., Singh N., Enemuoh U.E. and Rao, S.V., (2005), *Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels*, Composite Structures, Vol. 71, p. 258-270.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.1.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.41]