

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی عددی اثر وصله‌های کامپوزیتی بر ضرایب شدت تنش لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی کامل

سید مهدی نبوی^{۱*}، امین پورعبدل میانجی^۲، مجید جمال‌امیدی^۳

۱- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران

۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران

چکیده

هدف از این مقاله مقاوم سازی لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی کامل (داخلی و خارجی) تحت فشار داخلی با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی به دلیل خواص بارزشان می‌باشد. در فرآیند تحقیق به منظور اعتبار بخشی مدل‌های پیشنهادی، ابتدا لوله استوانه‌ای حاوی ترک محیطی تحت کشش یکنواخت، مدل‌سازی و نتایج ضرایب شدت تنش با مقاله موجود مقایسه شده است. سپس به منظور اثبات صحت روند مدل‌سازی وصله کامپوزیتی و چسب، ورق آسیب دیده حاوی ترک مرکزی مدل‌سازی و نتایج ضرایب شدت تنش با مقاله موجود مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. محاسبه ضرایب شدت تنش در نوک ترک با بهره‌گیری از انتگرال I حاصل شده است. پس از اثبات روند شبیه‌سازی در دو مرحله به بررسی عملکرد لوله‌های استوانه‌ای با ترک محیطی داخلی و خارجی کامل با ترک‌هایی با عمق نسبی ۰/۴ تا ۰/۸ با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی تحت فشار داخلی، قبل و پس از ترمیم پرداخته شده است. در پروسه ترمیم از کامپوزیت‌های بوراپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی استفاده است. نتایج تحقیق نشان داد استفاده از وصله‌های کامپوزیتی به میزان قابل توجهی ضرایب شدت تنش را کاهش داده و این کاهش در لوله حاوی ترک محیطی خارجی کامل بیشتر از لوله حاوی ترک محیطی داخلی کامل می‌باشد. در فرآیند تحقیق تأثیر جنس و ضخامت وصله، زاویه قرارگیری الیاف و جنس چسب بر ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ترک محیطی کامل (داخلی-خارجی)، ضریب شدت تنش، وصله کامپوزیتی، ترمیم، روش اجزا محدود، لوله‌ای استوانه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	10.22065/jsce.2018.112332.1415	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری
	https://10.22065/jsce.2018.112332.1415	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۲/۲۴
		دریافت		۱۳۹۶/۱۰/۱۸	
		سید مهدی نبوی		*نویسنده مسئول:	
		nabavi@mut.ac.ir		پست الکترونیکی:	

Numerical study of the effect of the composite patches on the stress intensity factors for a circumferential fully crack in pipes

S. M. Nabavi^{1*}, A. Pourabdol², M. Jamal-Omidi³

1- Assistant professor, Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Graduated Student, Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3- Associate professor, Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this paper is to reinforce the pressurized pipe containing a fully circumferential crack (internal and external) using composite patches due to their remarkable properties. In the research procedure, in order to validate the proposed models, firstly, a cylindrical pipe with a circumferential crack subjected to the uniform tension was modeled and the results of stress intensity factors were compared with an existing paper. Then, in order to examine the modeling process of composite patch and adhesive, a damaged plate with a central crack was considered and the results of stress intensity factors were investigated and evaluated. Stress intensity factor at the crack tip was calculated using the J-integral. In this regard, using the 3D finite element method, the stress intensity factors in the crack before and after the pipe repair were evaluated with boron/epoxy, carbon/epoxy and glass/epoxy composite patches. The crack geometries correspond to different relative depths from 0.4 to 0.8. The results showed that the use of composite patches significantly decreased the stress intensity factors, and this reduction in the external circumferential cracks is more than the internal ones. Also, in the research process, the effect of the patch thickness, the angle of the fiber and the adhesive material on the stress intensity factors has been investigated.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 December 2017

Revise Date: 14 May 2018

Accept Date: 03 July 2018

Keywords:

Fully circumferential crack
(internal and external)

Stress intensity factor

Composite patch

Repair

The Finite element

Cylindrical pipe

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.112332.1415

*Corresponding author: Seyed Mehdi Nabavi

Email address: nabavi@mut.ac.ir

۱- مقدمه

لوله‌ها و مخازن تحت فشار، سازه‌هایی هستند که در طول عمر خود بر اثر اعمال بارهای مکانیکی و عوامل محیطی همچون خوردگی، به ویژه در محل اتصالات جوشکاری شده، دچار آسیب‌های موضعی می‌شوند. این آسیب‌ها به مرور به شکل ترک تبدیل می‌گردند و بر کارایی و ایمنی تأثیر مستقیم می‌گذارند. برای ادامه‌ی بهره‌برداری از آنها، می‌توان با ترمیم ناحیه‌ی خرابی، دوباره از آنها استفاده نمود. ترمیم لوله‌ها و مخازن آسیب دیده با استفاده از روش‌های مختلفی مانند وصله‌های فلزی (پرچ کردن یا جوش دادن وصله‌های فلزی روی ناحیه‌ی آسیب دیده) و استفاده از وصله‌های کامپوزیتی (به کمک چسب) انجام می‌شود. مهمترین مزایای استفاده از وصله‌های کامپوزیتی می‌توان به وزن پایین، مقاومت در برابر خوردگی و امکان نصب در حین کار در مدار و خروج از سرویس را نام برد. هر روش ملاحظات خود را در انجام فرآیند ترمیم داراست. در نوع فلزی، خوردگی گالوانیکی و تنش پس ماند ناشی از جوشکاری روی انتخاب جنس و ضخامت وصله تأثیرگذار می‌باشد در حالیکه در نوع کامپوزیتی دما، رطوبت، عمر چسب و آلاینده‌های محیطی روی انتخاب چسب و مواد اثرگذار است.

پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص ترمیم خطوط لوله و مخازن تحت فشار با استفاده از وصله‌ی کامپوزیتی در دو دسته‌ی کلی جای می‌گیرند. در دسته‌ی اول نوع خرابی به صورت ترک تمام عمقی که سبب نشتی شده است بررسی می‌گردند و در دسته‌ی دوم آسیب به صورت موضعی و بدون نشتی لحاظ شده است که در ادامه از این منظر تحقیقات دسته‌بندی می‌گردند.

ترمیم لوله‌های حاوی ترک تمام عمقی با وصله‌ی کامپوزیتی

غفاری و حسینی تودشکی [۱] با استفاده از نرم‌افزار انسیس به بررسی خستگی لوله‌ی ترک‌دار در زوایای مختلف (مود ترکیبی) پرداخته و نتایج رشد ترک را در دماهای مختلف بدست آورده‌اند. بنزیان و همکارانش [۲] با استفاده از همین نرم‌افزار ترک عرضی محیطی تقویت شده با وصله‌ی کربن/اپوکسی را مورد ارزیابی قرار داده و تأثیر مشخصات وصله و زاویه راستای ترک را بررسی کرده‌اند. بنزیان و همکارانش [۳] در تحقیق دیگری ترک طولی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مشابه مقاله‌ی قبلی تحلیل نمودند. دوئل و همکارانش [۴] لوله‌ی در معرض خوردگی را با وصله‌ی کامپوزیتی تقویت و مورد تست تجربی قرار دادند و نتایج آنرا با روش اجزا محدود مقایسه نمودند. چان و همکارانش [۵] به بررسی تعمیر لوله فولادی با وصله‌ی کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی پرداختند. ابتدا تحلیل عددی با روش اجزا محدود برای سه حالت لوله‌ی سالم، لوله‌ی معیوب و لوله‌ی تعمیر شده انجام شده، سپس نتایج تحقیقاتشان را با داده‌های حاصل از تحلیل تجربی تحت بار خمشی مقایسه نمودند. شکریه و همکارانش [۶] به بررسی تعمیر لوله‌های انتقال گاز با استفاده از مواد کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی پرداختند. لوله‌های خورده شده با استفاده از نرم افزار انسیس تحلیل تنش شده و در نهایت برای تأیید نتایج، به صورت تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است. وو و همکارانش [۷] لوله‌ی فولادی دارای ترک محیطی را با استفاده روش رشد مجازی ترک در نرم‌افزار انسیس بررسی نمودند. تقویت با استفاده از کامپوزیت‌های بور/اپوکسی و کربن/اپوکسی انجام شده است. لام و همکارانش [۸] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ترک محیطی تحت کشش را تحلیل نمودند. آنها برای مدل‌سازی لوله از المان آجری و برای مدل‌سازی چسب و کامپوزیت از المان پوسته‌ای استفاده نمودند. زرین‌زاده و همکارانش [۹ و ۱۰] با استفاده از روش XFEM به بررسی خستگی ترک‌های محیطی و مورب پرداختند. نتایج پس از اضافه کردن وصله‌ای از جنس شیشه/اپوکسی با آزمایشات تجربی صحت‌سنجی شده است. آنها همچنین اثر جدایش لایه‌ای وصله‌ی کامپوزیتی را لحاظ نمودند.

ترمیم لوله‌های حاوی ترک موضعی با وصله‌ی کامپوزیتی

لیاپین و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش اجزا محدود لوله‌ی فولادی X42 حاوی ترک خارجی محیطی و طولی را با استفاده از نرم‌افزار انسیس تحلیل نمودند. در این پژوهش برای پر کردن ناحیه خرابی از رزین اپوکسی استفاده شده است. لوکاس و همکارانش [۱۲] تقویت و تعمیر لوله فولادی با ترک خارجی طولی و محیطی با استفاده از نرم افزار آی-دیاس تحلیل نمودند. برای تقویت لوله از کامپوزیت کربن/اپوکسی استفاده شده است. اسماعیل و همکارانش [۱۳] لوله‌ای که در معرض آسیب خوردگی قرار داشته را به عنوان نمونه انتخاب

نموده و با استفاده از استاندارد ASME ابعاد وصله را در نظر گرفته‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل و با نتایج تجربی حاصل از تست مقایسه کرده‌اند. چن و پن [۱۴] رفتار یک مخزن CNG حاوی ترک نیم‌بیضی طولی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس در حالت تعمیر با وصله‌ی کامپوزیتی سرتاسری پرداختند. فکور و همکارانش [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی اثر پوشش کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی بر روی مخزن با ترک نیم‌بیضی طولی پرداختند. در فرآیند مدل‌سازی برای کامپوزیت از المان پوسته‌ای استفاده شده است.

با وجود تمام تحقیقاتی که روی تعمیر لوله‌ها و مخازن فلزی ترک‌دار با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی انجام شده، تاکنون پژوهشی روی ترمیم یا تعمیر مخازن با ترک محیطی کامل انجام نشده است. در این مقاله به مقاوم سازی و تعمیر لوله‌های فلزی تحت فشار داخلی حاوی ترک محیطی کامل (داخلی و خارجی) پرداخته شده است. برای محاسبه ضرایب شدت تنش از انتگرال جی^۱ و جهت مقاوم‌سازی، از وصله‌های کامپوزیتی استفاده شده است. برای این منظور ابتدا لوله‌ی حاوی ترک محیطی با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی شده و نتایج ضرایب شدت تنش با داده‌های موجود مقایسه شده است که از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. سپس جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی کامپوزیت و چسب، در حالت خاص ورق حاوی ترک ترمیم شده با وصله‌ی کامپوزیتی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل عددی با مقاله‌ی موجود مقایسه شده است که از دقت خوبی برخوردار است. در ادامه با استفاده از روند مدل‌سازی مشابه برای ترک و کامپوزیت، لوله‌های حاوی ترک برای حالت‌های با و بدون وصله‌ی ترمیمی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و مقادیر ضرایب شدت تنش تعیین شده است. سپس، با توجه به معیار تعیین ضریب شدت تنش، تأثیر پارامترهای جنس و ضخامت وصله، تأثیر چیدمان الیاف بر مقاوم‌سازی لوله‌ی ترمیم شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش‌های تعیین ضرایب شدت تنش

جهت محاسبه‌ی مقادیر ضرایب شدت تنش (K_I) به طور کلی سه روش برون‌یابی جابجایی^۲، روش مشتق سفتی^۳ و انتگرال^۱ وجود دارد. استفاده از روش برون‌یابی جابجایی نسبت به دو روش دیگر که بر مبنای انرژی هستند به مراتب ساده‌تر اما با دقت پایین‌تری می‌باشد. از آنجائیکه روش مشتق سفتی بر اساس رشد مجازی ترک در نوک ترک استوار است، به دقت المان‌بندی در جبهه‌ی ترک حساس می‌باشد. در این میان روش انتگرال^۱ این معایب را نداشته و قابل استفاده در ترک‌های دو بعدی و سه بعدی می‌باشد. روش برون‌یابی جابجایی جهت تعیین ضرایب شدت تنش، به صورت مستقیم از نتایج جابجایی حاصل از حل روش اجزا محدود به صورت زیر حاصل می‌شود:

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

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 اجزا محدود است. در روش مشتق سفتی، تغییر انرژی جسم ترک‌دار بازای رشد مجازی ترک مبنای تعیین ضرایب شدت تنش به صورت زیر می‌باشد:

$$K_I^* = -\frac{H}{V} \{u\}^T \{\partial[K]/\partial l\} \{u\} \quad (2)$$

1- J-integral

2- Displacement extrapolation

3- Stiffness derivative technique

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

ماهیت انتگرال I در مکانیک شکست الاستیک خطی، نرخ رهائش انرژی است که به صورت اختلاف مقدار انرژی پتانسیل یک جسم ترک دار در دو طول ترک مختلف به صورت زیر تعریف می شود:

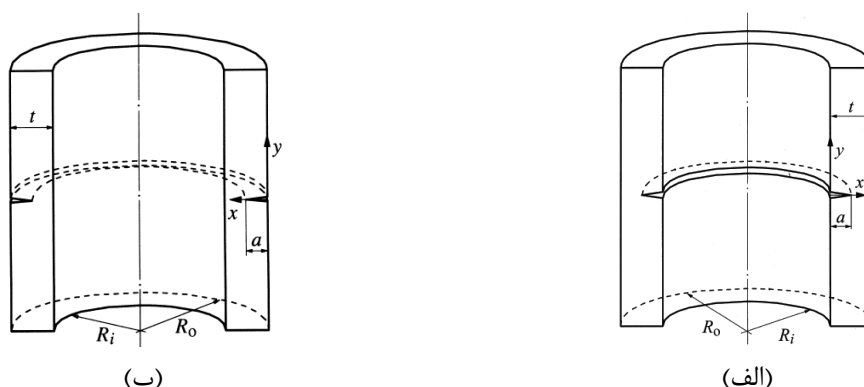
$$I = \oint_{\Gamma} \left[w n_1 - t_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) \right] ds \quad (3)$$

که در آن Γ مسیر بسته دلخواه، که باید از سطح پایین ترک شروع و به سطح بالای آن ختم می گردد. همچنین w چگالی انرژی کرنشی، n_1 مؤلفه ی بردار یکه ی عمود بر مسیر بسته در راستای محور x_1 ، t_i و u_i به ترتیب بردارهای نیروی سطحی و جابجایی می باشند. عملاً مقادیر داخل این انتگرال از حل روش اجزا محدود محاسبه می شود و سپس با انتگرالگیری عددی مقدار I محاسبه می شود. حسن استفاده از این روش عدم محدودیت آن در تحلیل های الاستیک و پلاستیک می باشد. ضرایب شدت تنش با تعیین I به صورت زیر بدست می آید:

$$K_I = \sqrt{HI} \quad (4)$$

۳- مدل هندسی و مواد

در این تحقیق به بررسی رفتار مخازن آسیب دیده با ترک محیطی داخلی و خارجی کامل با ترک هایی با عمق نسبی (a/t) ۰/۴ تا ۰/۸، قبل و بعد از ترمیم پرداخته شده است. ترک نوع داخلی روی سطح داخلی استوانه ایجاد شده و جهت رشد آن به سمت شعاع بیرونی مقطع دایروی در استوانه است. نوع خارجی روی سطح خارجی استوانه ایجاد شده و بخشی از ضخامت آن را در بر گرفته و جهت رشد این نوع ترک به سمت شعاع داخلی مقطع دایروی در استوانه است. در فرآیند تحقیق به منظور اعتبارسنجی مدل های مورد بررسی، ابتدا، لوله استوانه ای با ترک محیطی داخلی کامل به ازای طول ترک های مختلف تحت بارگذاری کششی محوری شبیه سازی و تجزیه و تحلیل شده است. در این حالت لوله ترک دار به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس شبیه سازی شده و مقادیر ضرایب شدت تنش بی بعد شده در نوک ترک به ازای a/t های مختلف محاسبه و با نتایج موجود مقایسه و ارزیابی شده است. سپس به ترمیم مخازن ترک دار با ترک محیطی داخلی و خارجی کامل با استفاده از مواد کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری فشاری پرداخته شده است. پیکربندی هندسی لوله ترک خورده در شکل (۱) آورده شده است. لوله استوانه ای دارای شعاع داخلی $R_i = 150$ mm، طول $L_c = 1000$ mm و ضخامت دیواره لوله $t = 10$ mm می باشد. در فرآیند ترمیم از کامپوزیت های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی استفاده شده است. خواص مکانیکی لوله ی ترک دار، وصله های کامپوزیتی و چسب در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱: لوله ترک دار با نوع ترک الف) محیطی داخلی و ب) خارجی کامل [۱۷].

جدول ۱: خواص مکانیکی مواد بررسی در تحقیق حاضر [۱۶]

مواد	E_1 GPa	$E_T E_C$ و GPa	G_{12}, G_{13} و GPa	G_{23} GPa	ν_{12}, ν_{13} و ν_{23}
آلومینیوم	۷۲	-	-	-	۰/۳۲
چسب	۰/۹۷	-	-	-	۰/۳۳
بور/پوکسی	۲۰۸	۲۵/۴	۷/۲۴	۴/۹۴	۰/۱۷
کربن/پوکسی	۱۷۲/۴	۱۰/۳۴	۴/۸۲	۳/۱	۰/۳۴
شیشه/پوکسی	۴۱	۱۲	۵/۵۰	۳/۵	۰/۲۸

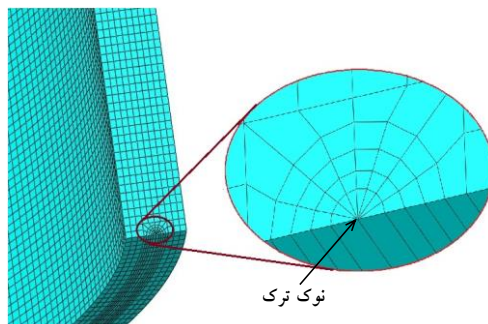
۴- مدل سازی و صحت سنجی شبیه سازی عددی

به منظور اطمینان از روند و دقت مدل سازی اجزا محدود، ابتدا به شبیه سازی لوله ی حاوی ترک محیطی داخلی کامل تحت کشش یکنواخت پرداخته شده و نتایج حاصل با داده های موجود ارزیابی و بررسی شده است. پس از اطمینان از صحت شبیه سازی عددی ترک، به بررسی روند ترمیم ورق ترک دار با استفاده از وصله ی کامپوزیتی تحت کشش یکنواخت پرداخته شده است. در این قسمت صحت شبیه سازی وصله کامپوزیتی و چسب بر اساس داده های موجود ارزیابی شده است. سپس بر اساس صحت سنجی های انجام شده، به ترمیم لوله های استوانه ای با ترک محیطی کامل (داخلی و خارجی) به کمک وصله های کامپوزیتی پرداخته شده است.

۴-۱- لوله ترک دار بدون وصله ی ترمیم کننده

در این بخش جهت اعتباربخشی مدل های پیشنهادی، ابتدا لوله استوانه ای با ترک محیطی داخلی کامل تحت کشش یکنواخت $(\sigma = 10 \text{ MPa})$ به کمک نرم افزار اجزا محدود آباکوس ورژن ۲۰۱۶ مدل سازی و آنالیز شده است. برای مش بندی لوله از المان $C3D20R$ که یک المان آجری مرتبه ی بالا و دارای ۲۰ گره است، استفاده شده است. برای مدل سازی رینگ اطراف نوک ترک از المان هرمی $C3D15$ برای اعمال تکنیکی نوک ترک استفاده شده است. المان بندی نمونه و پلاش مش در ناحیه نوک ترک در شکل (۲) نمایش داده شده است. برای محاسبه ی ضرایب شدت تنش از انتگرال I استفاده شده و پس از بررسی همگرایی انتگرال I روند حل ادامه پیدا کرده است. نتایج ضرایب شدت تنش بی بعد شده ی لوله در مقایسه با نتایج ارائه شده توسط فارفولومی یف و همکارانش [۱۷] در جدول (۲) آورده شده است.

برای بی بعد کردن ضرایب شدت تنش (K_N) مقدار آن در هر عمق نسبی (a/t) بر $\sigma\sqrt{\pi a}$ تقسیم شده است. همانطور که ملاحظه می شود، نتایج حاضر در مقایسه با داده های موجود توافق بسیار خوبی را نشان داده است. به طوریکه بیشترین اختلاف در حدود ۰/۲٪ می باشد.



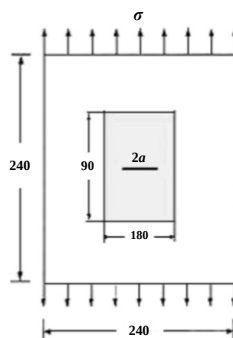
شکل ۲: نمایش المان بندی لوله ترک دار با ترک محیطی داخلی کامل

جدول ۲: مقایسه نتایج ضرایب شدت تنش بی بعد شده برای ترک محیطی داخلی کامل تحت کشش یکنواخت

a/t					K_N
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	
۲/۹۷۷	۲/۵۷۵	۲/۲۲۸	۱/۹۱۴	۱/۶۵۷	پژوهش حاضر
۲/۹۷۹	۲/۵۷۰	۲/۲۲۴	۱/۹۱۵	۱/۶۵۵	مرجع [۱۷]
-۰/۰۷	۰/۱۹	۰/۱۸	-۰/۰۵	۰/۱۲	درصد اختلاف (%)

۲-۴- ترمیم ورق ترک دار با وصله کامپوزیتی

پس از اطمینان از دقت مدل سازی اجزا محدود ترک در لوله، جهت اطمینان از صحت مدل سازی وصله کامپوزیتی و چسب به بررسی رفتار ورقی به ابعاد $240 \times 240 \times 3$ mm³ حاوی ترک مرکزی پس از ترمیم تحت کشش یکنواخت ۷۰ MPa منطبق بر داده های موجود در مقاله ی آیت اللهی و هاشمی [۱۸] پرداخته شده است (شکل (۳)). در فرآیند ترمیم از وصله های کامپوزیتی بور/اپوکسی و کربن/اپوکسی با ابعاد 180×90 mm² و چیدمان [۰]_۸ با ضخامت کل ۱ mm استفاده شده است. برای اتصال وصله به ورق از چسبی با ابعاد مشابه وصله کامپوزیتی و ضخامت ۰/۲ mm بهره گرفته شده است. مشخصات مکانیکی ورق، چسب و وصله های کامپوزیتی در جدول (۱) آورده شده است. روش المان بندی در ورق نیز همانند المان بندی در استوانه می باشد. در این مسأله نیز هندسه به دو بخش تقسیم می شود تا در بلوک ترک شبکه بندی ریزتری ایجاد شود. المان های جبهه ترک از نوع گوه ای تکین بوده و برای مدل سازی چسب و وصله کامپوزیتی از المان پوسته ای استفاده شده است.



شکل ۳: ابعاد ورق ترک دار (mm) مسأله [۱۸]

نتایج ضریب شدت تنش ورق تقویت شده در مقایسه با مرجع [۱۸] برای وصله‌های کامپوزیتی بور/اپوکسی و کربن/اپوکسی در جدول (۳) آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود دقت K بدست آمده بسیار مناسب بوده و میانگین خطا برای وصله بور/اپوکسی برابر ۴/۰۵ درصد و برای وصله کربن/اپوکسی برابر ۳/۷۲ درصد می‌باشد.

جدول ۳: مقایسه نتایج بدست آمده برای طول‌های مختلف ترک با وصله تقویتی

a mm	a/w	وصله بور/اپوکسی		وصله کربن/اپوکسی	
		تحقیق حاضر	آیت‌اللهی و هاشمی [۱۸]	در این تحقیق	آیت‌اللهی و هاشمی [۱۸]
۱۲	۰/۱	۱۲/۸۳	۱۲/۵۳	۱۲/۷۱	۱۲/۲۸
۲۴	۰/۲	۱۷/۳۵	۱۷/۰۶	۱۷/۹۵	۱۷/۸۰
۴۸	۰/۴	۱۹/۲۷	۲۰/۳۳	۲۰/۲۲	۲۱/۴۱
۷۲	۰/۶	۲۳/۹۸	۲۲/۴۹	۲۵/۵۵	۲۴/۴۰

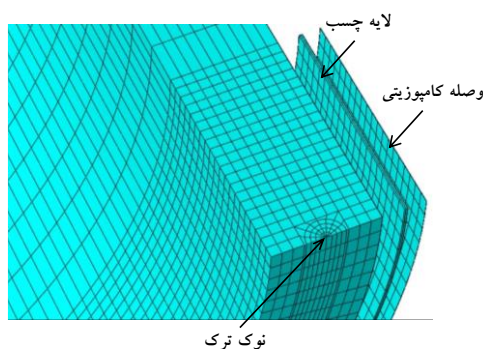
۵- مدل سازی عددی ترمیم لوله‌های استوانه‌ای ترک‌دار با وصله‌ی کامپوزیتی

براساس نتایج بدست آمده از دو بخش اخیر و اطمینان از صحت مدل سازی اجزا محدود ترک و وصله، در ادامه با استفاده از روند مدل سازی مشابه به بررسی عملکرد لوله استوانه‌ای حاوی ترک محیطی کامل (داخلی و خارجی) قبل و پس از ترمیم تحت شرایط فشار داخلی پرداخته شده است. همچنین تأثیر جنس و ضخامت وصله، زاویه قرارگیری الیاف و جنس چسب بر مقاومت سازی لوله‌ی ترمیم شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- ترمیم لوله با ترک محیطی داخلی کامل

در این بخش تأثیر وصله بر عملکرد لوله ترک‌دار (ترک محیطی داخلی کامل) با استفاده از مواد کامپوزیتی تحت فشار داخلی ($10\sigma = \text{MPa}$) مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ترمیم، وصله‌گذاری به صورت سرتاسری (wrap) انجام شده است. برای شبیه‌سازی ترمیم کننده از المان پوسته (shell) استفاده شده و ضخامت هر لایه برابر ۰/۵ mm در نظر گرفته شده است. برای جهت‌دهی بردار عمود بر صفحه‌ی کامپوزیتی یک دستگاه مختصات استوانه‌ای مجازی در مرکز لوله ترسیم شده و با کمک آن جهت‌دهی صورت گرفته است. محور شعاعی این دستگاه عمود بر صفحه‌ی ترمیم‌کننده‌ی کامپوزیتی است. همچنین برای مدل سازی لایه چسب از المان آجری استفاده شده و مش‌بندی به صورت sweep انجام شده است. نمایش مش‌بندی لوله ترک‌دار پس از ترمیم در شکل (۴) آورده شده است. لازم به ذکر است مش‌بندی لوله‌ی ترک‌دار منطبق بر بخش ۱،۴ و مش‌بندی وصله و چسب منطبق بر بخش ۲،۴ می‌باشد.

برای ترمیم و تقویت از کامپوزیت‌های بور/اپوکسی، کربن/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 و طول مناسب وصله پس از بارگذاری و بررسی میزان تأثیرگذاری آن بر ضریب شدت تنش در نوک ترک انتخاب شده است. طول وصله ابتدا ۱۰۰ mm در نظر گرفته شده و پس از بارگذاری و بررسی نتایج ضرایب شدت تنش در ترک‌های با عمق نسبی ۰/۴ تا ۰/۸، مقدار مناسب ۲۰۰ mm لحاظ شده است. نتایج تأثیر گذاری طول وصله بر میزان ضرایب شدت تنش بی‌بعد شده لوله ترک‌دار قبل و بعد از ترمیم سرتاسری با وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی با جهت‌گیری الیاف در راستای محیط استوانه به ضخامت ۳ mm در جدول (۴) آورده شده است.

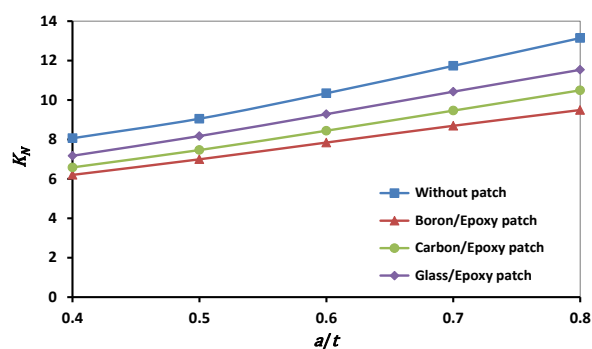


شکل ۴: نمایش مش بندی اجزا لوله ترک دار ترمیم شده.

جدول ۴: نتایج ضرایب شدت تنش بی بعد شده در طول ترک های مختلف (ترک محیطی داخلی کامل) قبل و پس از ترمیم با وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی در راستای محیطی

a/t					K_N
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	
۱۳/۱۴	۱۱/۷۳	۱۰/۳۶	۹/۰۵	۸/۰۶	قبل از ترمیم
۱۱/۴۷	۱۰/۹۲	۸/۸۷	۸/۲۵	۷/۴۹	ترمیم با طول وصله ۱۰۰ mm
۹/۴۹	۸/۶۹	۷/۸۴	۶/۹۹	۶/۲	ترمیم با طول وصله ۲۰۰ mm
۹/۱۵	۸/۴۰	۷/۶۰	۶/۷۸	۶/۰۴	ترمیم با طول وصله ۳۰۰ mm

نمودار تغییرات ضرایب شدت تنش بی بعد شده، K_N ، به صورت تابعی از طول ترک در شرایط قبل و بعد از ترمیم با استفاده از وصله های کامپوزیتی مختلف در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود، وصله های کامپوزیتی اثر قابل توجهی بر مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک داشته و سبب کاهش آن می شود. این اثر کاهنده برای ترک با طول های مختلف، متفاوت است. میزان تأثیرگذاری ترمیم بر ضرایب شدت تنش در لوله ها با ترک داخلی عمیق تر ($a/t = ۰/۸$) با استفاده از وصله های کامپوزیتی بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه اپوکسی به ترتیب برابر $۳۸/۵\%$ ، $۲۵/۳\%$ و $۱۴/۰\%$ مشاهده شده است. همچنین مشاهده می شود که ماده کامپوزیتی بور/اپوکسی به سبب داشتن مدول الاستیسیته بالاتر نسبت به دو ماده دیگر، کاهش بیشتری را در مقدار ضریب شدت تنش ایجاد می کند.

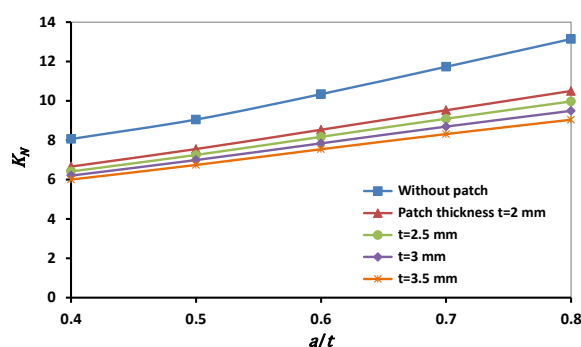


شکل ۵: تغییرات ضریب شدت تنش بی بعد شده در لوله با ترک محیطی داخلی کامل قبل و بعد از ترمیم.

در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای ضامت وصله، جهت‌گیری الیاف و جنس 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.

تأثیر ضخامت وصله بر ضریب شدت تنش

اثر افزایش ضخامت وصله‌ی سرتاسری بور/اپوکسی بر استحکام لوله ترمیمی در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت وصله، ضریب شدت تنش کاهش یافته و تغییرات ضریب شدت تنش با افزایش ضخامت وصله تقریباً به صورت خطی می‌باشد. لازم به ذکر است در ترمیم لوله‌های آسیب دیده، ضخامت وصله نباید از یک سوم ضخامت جداره‌ی لوله بیشتر باشد. زیرا با افزایش بیش از حد ضخامت امکان رخ دادن پدیده جدایش وصله از بدنه افزایش می‌یابد.

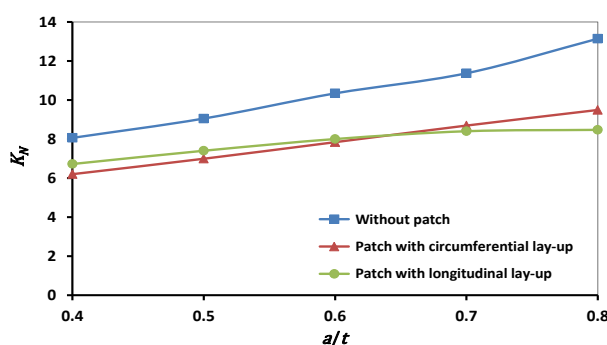


شکل ۶: اثر ضخامت وصله بور/اپوکسی بر ضرایب شدت تنش بی بعد شده در ترک محیطی داخلی کامل.

تأثیر زاویه قرار گیری وصله بر ضریب شدت تنش

زاویه‌ی قرارگیری الیاف از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در فرآیند ترمیم و تعمیر سازه‌های آسیب دیده می‌باشد. در لوله‌های آسیب دیده حاوی ترک محیطی داخلی کامل جهت باز شدن دهانه‌ی ترک در راستای طولی استوانه می‌باشد. اگر جهت الیاف در راستای طولی استوانه قرار گیرد، از باز شدن دهانه‌ی ترک جلوگیری می‌کند. از طرفی اگر الیاف در راستای محیطی قرار گیرد، مانند یک کمر بند برای استوانه‌ی آسیب دیده عمل کرده و در نتیجه موجب کاهش میزان تنش طولی استوانه خواهد شد. عامل مودساز برای ترک‌های محیطی در استوانه‌ها، تنش طولی است. در نتیجه کاهش تنش طولی موجب کاهش ضریب شدت تنش می‌شود. نتایج تأثیر زوایای قرار گیری الیاف در راستای طولی و محیطی بر ضریب شدت تنش در ترمیم ترک محیطی داخلی کامل در شکل (۷) آورده شده است.

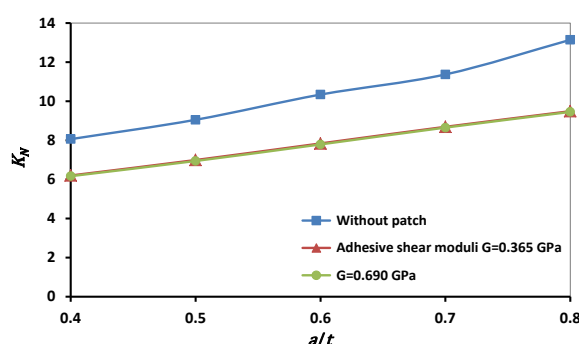
با توجه به شکل، کاهش قابل توجهی در ضرایب شدت تنش لوله ترمیم شده برای هر دو حالت قرارگیری الیاف (راستای طولی و محیطی) مشاهده می‌شود. برای ترک‌های با عمق نسبی کمتر از ۰/۶۵، چیدمان الیاف در راستای محیطی تأثیر بیشتری را در میزان کاهش شدت تنش نسبت به راستای طولی نشان داده و این اثرگذاری با افزایش عمق نسبی ترک کاهش یافته است. در نتیجه در ترمیم لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی داخلی کامل با افزایش عمق ترک، قرارگیری الیاف در راستای طولی بازدهی بیشتری را به همراه خواهد داشت.



شکل ۷: اثر زاویه قرارگیری الیاف ترمیمی کامپوزیت بور/اپوکسی بر ضرایب شدت تنش بی بعد شده در ترک محیطی داخلی کامل.

تأثیر جنس چسب بر ضرایب شدت تنش

در فرآیند ترمیم، بارهای اعمالی بر سازه آسیب دیده از طریق لایه‌های چسب به وصله کامپوزیتی انتقال می‌یابد. لذا خواص چسب (مدول برشی) نقش مهمی در بازآوری استحکام شکست سازه‌های ترک‌دار ایفا می‌کند. در این قسمت به بررسی تأثیر جنس چسب بر رفتار استوانه ترک‌دار ترمیمی حاوی ترک با طول‌های مختلف پرداخته شده است. مدول برشی چسب‌های مورد بررسی در فرآیند ترمیم به ترتیب برابر با ۰/۳۶۵ GPa [۱۶] و ۰/۶۹۰ GPa [۱] می‌باشند. نتایج ضرایب شدت تنش استوانه‌های ترمیم شده با استفاده از این دو نوع چسب در شکل (۸) آورده شده است.



شکل ۸: اثر جنس چسب بر ضرایب شدت تنش استوانه ترک‌دار ترمیم شده حاوی ترک محیطی داخلی کامل.

همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نوع چسب تأثیر یکسانی در فرآیند ترمیم سازه ترک‌دار دارند. مدول برشی چسب نوع دوم تقریباً دو برابر چسب نوع اول است، در حالی که نتایج به طور میانگین افزایشی معادل ۲/۳۳٪ در کاهش شدت تنش نوک ترک (به ازای $0/4 < a/t < 0/8$) در مقایسه با چسب نوع اول نشان داده است. به عبارت دیگر در فرآیند ترمیم استوانه‌های حاوی ترک داخلی، تغییر جنس چسب تأثیر چندانی بر ضرایب شدت تنش نداشته است.

۵-۲- ترمیم لوله با ترک محیطی خارجی کامل

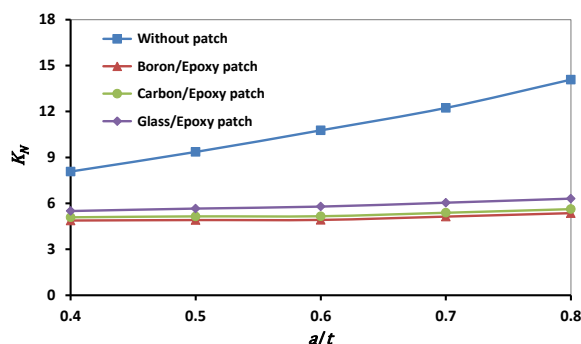
در این بخش به بررسی عملکرد وصله کامپوزیتی بر مقاوم‌سازی لوله ترک‌دار حاوی ترک محیطی خارجی کامل با ترک‌هایی با عمق نسبی ۰/۴ تا ۰/۸، پرداخته شده است. ابعاد هندسی استوانه، ابعاد و ضخامت وصله ترمیمی و کلیه مراحل شبیه‌سازی شامل المان‌بندی و بارگذاری منطبق بر بخش قبل می‌باشد. در جدول (۵)، اثر طول وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی با جهت‌گیری الیاف در راستای طولی (محور استوانه) با ضخامت ۳ mm بر میزان ضرایب شدت تنش بی‌بعد شده لوله ترک‌دار قبل و بعد از ترمیم سرتاسری آورده شده

است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، طول ۲۰۰ mm برای وصله انتخاب و مبنای بررسی عملکرد رفتار لوله ترمیمی قرار گرفته است.

در شکل (۹) تغییرات ضرایب شدت تنش بی بعد شده، K_N ، به صورت تابعی از طول ترک با استفاده از وصله های کامپوزیتی مختلف در شرایط قبل و بعد از ترمیم آورده شده است. نتایج کاهش ۱/۶ تا ۲/۵ برابری را بر روی ضریب شدت تنش (K_I) لوله های ترک دار خارجی برای وصله های کامپوزیتی بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه اپوکسی نسبت به حالت بدون ترمیم نشان داده است. بطوریکه این میزان کاهش با بهره گیری از وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی نسبت به دو ماده دیگر بیشتر می باشد. از آنجائیکه وصله کامپوزیتی در فرآیند ترمیم لوله های حاوی ترک محیطی خارجی بطور مستقیم با دهانه و سطح ترک در ارتباط است، لذا در مقایسه با ترک محیطی داخلی تأثیرپذیری قابل توجهی بر کاهش ضریب شدت تنش خواهد داشت. این موضوع با مقایسه نتایج در شکل های (۵) و (۹) قابل مشاهده می باشد.

جدول ۵: نتایج ضرایب شدت تنش بی بعد شده در طول ترک های مختلف (ترک محیطی خارجی کامل) قبل و پس از ترمیم با وصله کامپوزیتی بور/اپوکسی در راستای طولی

a/t					K_N
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	
۱۴/۰۸	۱۲/۲۳	۱۰/۷۷	۹/۳۶	۸/۰۸	قبل از ترمیم
۵/۱۷	۵/۱۰	۵/۰۳	۴/۹۶	۴/۸۷	ترمیم با طول وصله ۱۰۰ mm
۴/۹۴	۴/۹۳	۴/۹۲	۴/۹۱	۴/۸۸	ترمیم با طول وصله ۲۰۰ mm
۴/۹۲	۴/۹۰	۴/۹۰	۴/۸۹	۴/۸۸	ترمیم با طول وصله ۳۰۰ mm



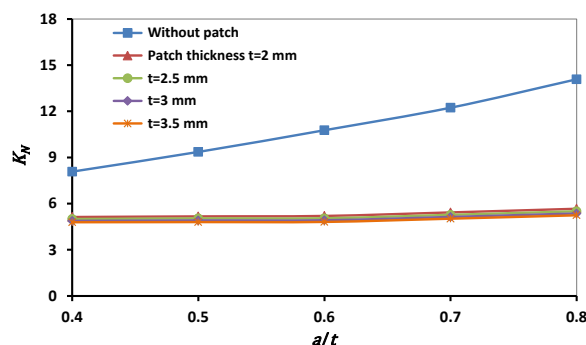
شکل ۹: تغییرات ضریب شدت تنش بی بعد شده لوله با ترک محیطی خارجی کامل قبل و بعد از ترمیم.

در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای ضخامت وصله، جهت گیری الیاف و جنس چسب بر رفتار لوله های آسیب دیده به کمک وصله بور/اپوکسی پرداخته شده است.

تأثیر ضخامت وصله بر ضریب شدت تنش

اثر افزایش ضخامت وصله ی سرتاسری بور/اپوکسی بر استحکام لوله ترمیمی در شکل (۱۰) آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل حاکی از آن است افزایش ضخامت وصله های کامپوزیتی در ترمیم استوانه های حاوی ترک محیطی خارجی برخلاف ترمیم استوانه های حاوی ترک محیطی داخلی تأثیر کمی بر تغییر ضریب شدت تنش به همراه دارد.

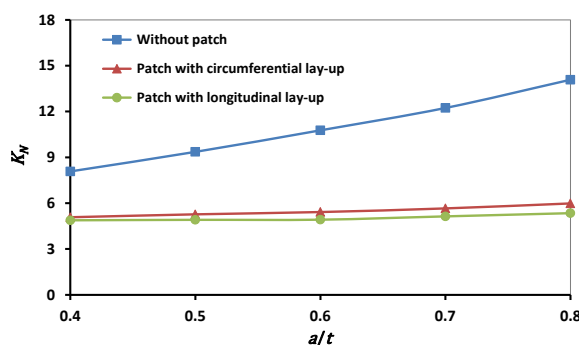
در ترمیم ترک محیطی داخلی به دلیل عدم اتصال مستقیم وصله کامپوزیتی به دهانه و سطح ترک، با افزایش ضخامت وصله مقدار تنش طولی کاهش یافته که منتهی آن کاهش ضریب شدت تنش را به همراه خواهد داشت. در ترمیم ترک محیطی خارجی، وصله کامپوزیتی به دهانه ترک چسبیده شده و دو طرف آن را به هم متصل می‌کند. این امر با متصل کردن لایه اول رخ داده و لایه‌های دوم به بعد بیشتر وظیفه کاهش تنش طولی را برعهده دارند. با توجه به اینکه در این نوع ترمیم تأثیر عامل اول (بسته شدن دهانه ترک) نسبت به عامل دوم یعنی کاهش تنش طولی، بیشتر است، لذا افزایش ضخامت تأثیر چندانی بر افزایش بازدهی ترمیم نخواهد داشت. لازم به ذکر است در صورت کاهش بیش از اندازه ضخامت وصله ترمیمی، احتمال واماندگی وصله افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰: اثر ضخامت وصله بور/اپوکسی بر ضرایب شدت تنش بی‌بعد شده در ترک محیطی خارجی کامل.

تأثیر زاویه وصله بر ضریب شدت تنش

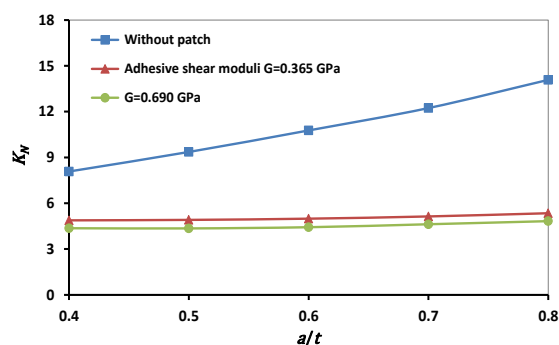
در شکل (۱۱)، نتایج تأثیر زوایای قرار گیری الیاف در راستای طولی و محیطی بر ضریب شدت تنش در ترمیم ترک محیطی داخلی کامل آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در ترمیم آسیب خارجی به دلیل اتصال مستقیم وصله کامپوزیتی به سطح ترک، قرار گیری الیاف در راستای محور استوانه سبب کاهش بیشتری در ضرایب شدت تنش در مقایسه با چیدمان الیاف در راستای محیطی شده است. لذا در ترمیم لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی خارجی، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با جهت گیری الیاف در راستای محور استوانه (طولی) بازدهی بیشتری به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۱: اثر زاویه قرار گیری الیاف ترمیمی کامپوزیت بور/اپوکسی بر ضرایب شدت تنش بی‌بعد شده در ترک محیطی خارجی کامل.

تأثیر جنس چسب بر ضریب شدت تنش

در این قسمت به بررسی تأثیر مدول برشی چسب بر استحکام سازه ترمیمی با استفاده از دو نوع چسب ذکر شده در بخش قبل پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی بر ضرایب شدت تنش لوله‌های استوانه‌ای حاوی ترک محیطی خارجی در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۲: اثر جنس چسب بر ضرایب شدت تنش استوانه ترک دار ترمیم شده حاوی ترک محیطی خارجی کامل.

همان طور که مشاهده می شود، بر خلاف ترک داخلی در این حالت با تغییر جنس چسب، تغییر ضریب شدت تنش قابل توجه بوده و به طور میانگین افزایشی معادل ۲۵٪ را در کاهش شدت تنش نوک ترک در مقایسه با چسب نوع اول نشان داده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش مقاومت لوله های استوانه ای حاوی ترک محیطی کامل داخلی و خارجی، قبل و پس از ترمیم با استفاده از وصله های کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری فشار داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند تحقیق از روش اجزا محدود سه بعدی و روش انتگرال I برای بررسی تأثیر جنس وصله، ضخامت وصله، زاویه قرارگیری الیاف و جنس چسب بر روی ضریب شدت تنش در طول ترک های مختلف به کار گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد:

۱- میزان K_N در لوله های ترک دار ترمیم شده متفاوت از لوله های ترک دار بدون ترمیم می باشد. با ترمیم می توان رشد ترک و به تبع آن نشتی لوله را مهار نمود و طول عمر استفاده و سرویس دهی را افزایش داد.

۲- ترمیم باعث کاهش قابل ملاحظه K_N در بهره گیری از وصله های مختلف شده است. در ترمیم لوله ها با ترک محیطی داخلی کامل ($0/8 < a/t < 0/4$)، بطور میانگین کاهشی به میزان ۳۳٪، ۲۳٪ و ۱۲٪ در ضرایب شدت تنش با استفاده از وصله های بور/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی مشاهده شده است. در همین راستا نتایج حاصل از ترمیم لوله های حاوی ترک محیطی خارجی کامل به ازای طول ترک های متناظر، کاهش ۱/۶ تا ۲/۵ برابری را بر روی ضریب شدت تنش با استفاده از وصله های مختلف نشان داده است. نتایج حاکی از آن است بهره گیری از وصله های کامپوزیتی در فرآیند ترمیم لوله های استوانه ای حاوی ترک خارجی تأثیرپذیری قابل توجهی بر استحکام سازه دارد.

۳- ماده کامپوزیتی بور/اپوکسی به سبب داشتن مدول الاستیسیته بالاتر نسبت به دو ماده دیگر تأثیر عمده تری در فرآیند ترمیم سازه های آسیب دیده دارند.

۴- در بین متغیرهای تحقیق در ترمیم ترک محیطی داخلی، متغیر ضخامت وصله کامپوزیتی تأثیر بیشتری را نسبت به زاویه قرارگیری الیاف نشان داده است. حال آنکه افزایش ضخامت در ترمیم ترک محیطی داخلی تأثیر چندانی بر افزایش بازدهی سازه ترک دار نشان نداده است. از اینرو می توان حداقل ماده ی مصرفی ترمیم کننده را استفاده نمود و در هزینه با همان بهره صرفه جویی نمود.

۵- نتایج تأثیرگذاری مدول برشی چسب در فرآیند ترمیم لوله های ترک دار حاوی ترک داخلی، افزایش ناچیزی را در کاهش شدت تنش نوک ترک نشان داده است (به طور میانگین معادل ۲/۳۳٪). حال آنکه در فرآیند ترمیم ترک خارجی، قابل توجه بوده و به طور میانگین افزایشی معادل ۲۵٪ در کاهش شدت تنش نوک ترک مشاهده شده است. به عبارت دیگر ملاحظات انتخاب چسب در ترک خارجی نسبت به داخلی اهمیت بیشتری دارد.

مراجع

- [1] 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, pp. 1-9.
- [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*, Vol. 875-877, pp. 1101-1105.
- [3] Benziane, M.M. Abdul-Wahab, S.A. Zahloul, H. Babaziane, B. Haddj-Meliani, M. and Pluvineau, 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: Engineering*, Vol. 77, pp. 431-439.
- [4] Duell, J.M. Wilson, J.M. and Kessler, M.R. (2008). Analysis of a Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 782-788.
- [5] Chan, P.H. Tshai, K.Y. Johnson, M. and Li, S. (2015). The Flexural Properties of Composite Repaired Pipeline: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 312-321.
- [6] Shokrieh, M.M. Taheri Behrooz, F. and Moslemian, R. (2005). Reinforcement of Corroded Gas Pipes using Composite Materials. In: *13th annual (international) conference on Mechanical Engineering*. Isfahan: Isfahan university of technology (in Persian).
- [7] 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, pp. 317-323.
- [8] Lam, C.C. Cheng, J.J. and Yam, C.H. (2011). Finite Element Study of Cracked Steel Circular Tube Repaired by FRP Patching. In: *The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction - EASEC12*, Vol. 14, pp. 1106-1113.
- [9] 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, pp. 140-148.
- [10] 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, pp. 24-32.
- [11] Lyapin, A.A. Chebakov, M.I. Dumitrescu, A. and Zecheru, G. (2015). Finite-Element Modeling of a Damaged Pipeline Repaired Using the Wrap of a Composite Material. *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 51, pp. 333-340.
- [12] 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.
- [13] Shouman, A. and Taheri, F. (2011). Compressive Strain Limits of Composite Repaired Pipelines under Combined Loading States. *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1538-1548.
- [14] Chen, J. and Pan, H. (2013). 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.
- [15] Fakoor, M. Ghorieshi, S.M.N. and Mehri-khansari, N. (2016). Investigation of Composite Coating Effectiveness on Stress Intensity Factors of Cracked Composite Pressure Vessels. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 3119-3126.
- [16] 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. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 50, pp. 525-539.
- [17] Varfolomeyev, I.V. Petersilge, M. and Busch, M. (1998). Stress Intensity Factors for Internal Circumferential Cracks in Thin- and Thick-Walled Cylinders. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, pp. 491-500.
- [18] Ayatollahi, M.R. and Hashemi, R. (2007). Computation of stress intensity factors (KI, KII) and T-stress for cracks reinforced by composite patching. *Composite Structures*, Vol. 78, pp. 602-609.