بررسی مقاوم‌سازی لوله ترکدار با استفاده از وصله کامپوزیتی

مجیدرضا آیت‌اللهی، هادی آزاد، روح‌الله هاشمی
آزمایشگاه خستگی و شکست، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم‌و صنعت ایران
m_ayat@iust.ac.ir، hadiazad@yahoo.com، r_hashemi@mech.sharif.edu
تلفن: ۷۳۹۱۲۹۲۲-۰۲۱ فاکس: ۷۷۲۴۰۴۸۸-۰۲۱

چکیده

در این مقاله مقاوم‌سازی یک لوله که در آن یک ترک نیم‌بیضی وجود دارد، تحلیل می‌شود. لوله تحت فشار داخلی ناشی از سیال قرار دارد و جهت مقاوم‌سازی، یک وصله کامپوزیتی تقویت کننده روی آن چسبانده شده است. به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار Ansys10 ، لوله مورد نظر برای حالتهای با و بدون وصلهٔ ترمیمی مدل‌سازی و حل شده است. تحلیل‌ها برای بررسی اثرات ابعاد ترک و فشار داخل لوله انجام شده و مقدار ضریب شدت تنش (K_I) محاسبه شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد، استفاده از وصله کامپوزیتی به میزان زیادی ضریب شدت تنش را کاهش می‌دهد. در صورت استفاده از وصله کامپوزیتی برای ترمیم ترک‌های با طول و عمق بیشتر، مقدار کاهش بیشتری در ضریب شدت تنش مشاهده می‌شود. در این شرایط احتمال شکست لوله یا سرعت رشد احتمالی ترک در لوله کاهش بیشتری خواهد یافت. نتایج همچنین نشان می‌دهدکه اثر فشار داخلی روی مقدار ضریب شدت تنش در حالت مقاوم شده نیز مانند حالت مقاوم نشده به صورت خطی است.

کلمات کلیدی: *مقاوم‌سازی، لوله، ترک نیم‌بیضی، وصله کامپوزیتی، المان محدود*

۱- مقدمه

نگهداری از خطوط انتقال نفت و گاز و حتی آب به عنوان قسمتی از شریان‌های حیاتی از اهمیت خاصی برخوردار است. گستردگی ایران و وجود سوختهای هیدروکربوری فراوان و همچنین زلزله‌خیز بودن ایران اهمیت این موضوع را افزایش داده و باعث لزوم مقاوم‌سازی خطوط انتقال شده است، زیرا هرگونه

آسیب به لوله‌های انتقال چه در داخل مناطق مسکونی و چه در خارج از آنها می‌تواند خسارات و تبعات سنگینی همچون آتش‌سوزی و عدم وجود آب آشامیدنی بهداشتی را به همراه داشته باشد.

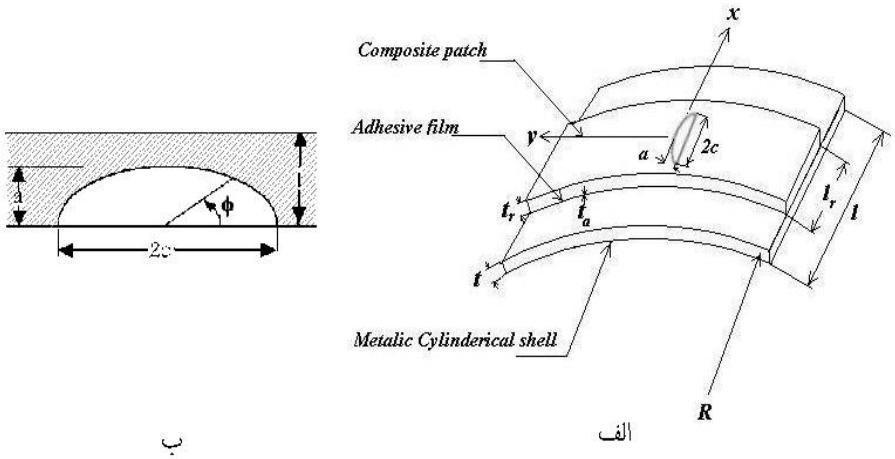
مقاوم‌سازی لوله‌ها از دو نظر قابل‌اجرا است، یکی تقویت لوله سالم در برابر فشارها و ضربه‌های ناگهانی و خوردگی و دیگری ترمیم لوله‌هایی که به تدریج در آنها ترک‌هایی ایجاد شده‌اند. یکی از بهترین و آسانترین روش‌های مقاوم‌سازی لوله‌ها استفاده از وصله‌های کامپوزیتی است که این روش برای هر دو منظور ذکر شده قابل استفاده است. در این مقاله به بررسی اثر چسباندن وصله کامپوزیتی به منظور ترمیم لوله‌ترکدار پرداخته شده است. عواملی چون خوردگی موضعی تدریجی، تأثیرات خستگی در محل‌های تمرکز تنش یا برخورد اشیاء تیز با لوله و امثال آن می‌تواند باعث ایجاد ترک روی لوله شود. به علت تمرکز تنش شدید در اطراف این‌گونه ترک‌ها، لوله‌های ترکدار نسبت به رشد ناگهانی ترک و شکست ترد بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. بنابراین اتخاذ تصمیم مناسب و به موقع جهت تعویض یا ترمیم لوله‌های ترکدار از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

پیشرفت علم مکانیک شکست در دهه‌های اخیر و توجه به بهره‌برداری بهتر از قطعات باعث شده است که محققین و مهندسین راه‌هایی برای کنترل رشد ترک پیشنهاد کنند. یکی از این روش‌ها استفاده از وصله‌های تقویت‌کننده کامپوزیتی است. مزایای ویژه این روش مانند راحتی نصب و عدم ایجاد نقاط تمرکز تنش جدید در قطعه و قابلیت اطمینان بالای قطعات ترمیم شده باعث شده که روش ترمیم با کمک چسباندن وصله کامپوزیتی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. این روش اولین بار توسط بیکر و همکارانش [۱] در دهه ۱۹۷۰ برای ترمیم قطعات آسیب دیده هواپیما و هلیکوپتر استفاده شد. میچل و همکاران [۲] نیز اولین تحلیل المان محدود در این زمینه را انجام دادند. کارهای دیگری هم در این زمینه انجام شده است که می‌توان به کارهای آیت اللهی و هاشمی [۳] و جونز و کالینان [۴] اشاره کرد. وصله کامپوزیتی برای ترمیم مخازن و لوله‌های انتقال گاز و نفت که بحث خوردگی و نشتی نیز در آنها مهم است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سو و همکارن [۵] و شاهانی و خیرخواه [۶]، کارهایی در این زمینه روی جداره‌های استوانه‌ای انجام داده‌اند. در هر دو مورد فقط شرایط رفتار ترک روی جداره مخزن تقویت شده، تحلیل شده است.

یکی از پارامترهای شکست، ضریب شدت تنش یا K_I است که با توجه به مقادیر آن می‌توان شرایط رشد ترک را پیش‌بینی کرد. در واقع ضریب شدت تنش بیانگر سطح تنش موجود در اطراف نوک ترک می‌باشد. مقدار ضریب شدت تنش پایینتر، سرعت رشد پایینتر و یا عدم رشد ترک را به همراه دارد. در این مقاله یک لوله ترکدار انتقال نفت و گاز تحت فشار داخلی ناشی از سیال، مورد مطالعه قرار گرفته است. یک ترک نیم‌بیضی روی سطح داخلی لوله و در جهت محور طولی آن در نظر گرفته شده و برای ترمیم ترک، لایه‌های کامپوزیتی روی قسمت ترکدار چسبانده شده است. با استفاده از مدل‌سازی المان محدود، اثر تغییرات ابعاد ترک و فشار داخل لوله روی مقدار K_I مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- لوله ترکدار

ترک‌ها را می‌توان به دو گروه عمده ترکهای راه‌به‌در و ترک‌های غیر راه‌به‌در تقسیم کرد. ترک راه‌به‌در، ترکی است که در کل ضخامت قطعه امتداد یافته و بیشتر در جداره‌های نازک اتفاق می‌افتد. اما اگر ترک فقط در قسمتی از ضخامت امتداد یافته باشد به ترک غیر راه‌به‌در معروف است که می‌تواند در داخل ضخامت به صورت ترک بیضوی و یا روی سطوح به صورت ترک نیم‌بیضی وجود داشته باشد. ترک‌های غیر راه‌به‌در بیشتر در جداره‌های ضخیم اتفاق می‌افتند در حالیکه ترک‌های راه‌به‌در در جداره‌های نازک و یا در اثر رشد ترک‌های غیرراه‌به‌در شکل می‌گیرند. در لوله‌ها معمولاً دو نوع ترک راه‌به‌در و نیم‌بیضی مشاهده می‌شود. در این تحقیق ترک نیم‌بیضی داخلی روی یک لوله فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱-الف)، قسمتی از یک لوله تقویت شده را نشان می‌دهد که یک ترک نیم‌بیضی در جهت محور طولی روی سطح داخلی آن قرار گرفته دارد. در شکل (۱-ب)، شمایی از یک ترک نیم‌بیضی مشاهده می‌شود. ابعاد ترک‌های نیم‌بیضی توسط دو پارامتر عمق ترک (a) و طول ترک (2c) نشان داده می‌شودکه این دو پارامتر با توجه به ضخامت قطعه (t) بی بعد شده و به صورت عمق نسبی ترک (a/t) و ضریب شدت تنش (a/c) بیان می‌شوند. تقویت توسط کامپوزیتی از جنس گرافیت-اپوکسی انجام شده است که با یک لایه چسب از جنس رزین اپوکسی روی لوله چسبانده شده است.



شکل ۱. *الف) هندسه لوله ترکدار تقویت شده، ب) شمایی از یک ترک نیم‌بیضی*

به منظور بررسی اثر وصله کامپوزیتی روی رفتار لوله ترکدار، یک لوله فولادی ۱۶ اینچی با قطر خارجی ۴۰۶/۴ mm، قطر داخلی ۳۸۷/۴ mm در نظر گرفته شده است. لوله با یک وصله کامپوزیتی به ضخامت ۷ mm و طول ۱۵۰ mm و به کمک یک لایه چسب به ضخامت ۰/۶ mm تقویت شده است. الیاف در

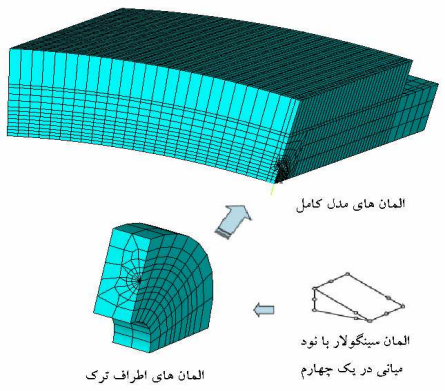
جهت محیطی و دورتادور لوله چسبانده شده‌اند. لوله تحت فشار داخلی (P_{in} =۳/۴۴۷۵ MPa (=۵۰۰ Psi قرار دارد. با توجه به موضعی بودن اثر ترک، به جهت کاهش ابعاد مدل و حجم محاسبات فقط یک-دوازدهم محیط لوله و به اندازه ۲۰۰ mm از طول لوله در نظر گرفته شده و به علت وجود تقارن در راستای ترک محوری و عمود بر آن، یک-چهارم از ترک و هندسه مربوطه مدل شده است و شرایط مرزی لازم روی سطوح برش خورده اعمال شده است. خواص مکانیکی لوله، وصله مقاوم کننده کامپوزیتی و لایه چسب در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. *خواص مکانیکی ورق ترکدار، چسب و وصله کامپوزیتی. E و G برحسب GPa*

Material	E_1	E_2, E_3	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}	G_{12}, G_{13}	G_{23}
Steel	*200*		*0.3*			
Film adhesive	*25.6*		*0.33*			
Graphite-Epoxy	*172.4*	*10.34*	*0.3*	*0.18*	*4.82*	*3.10*

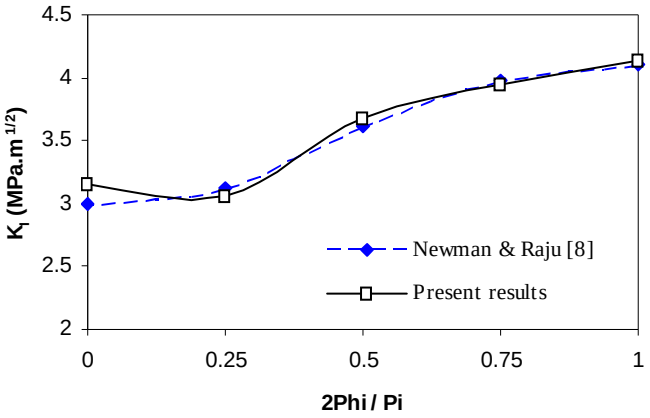
۳- مدل‌سازی المان محدود

روش المان محدود سه بعدی و نرم‌افزار Ansys 10 برای مدل‌سازی لوله و وصله کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است. برای لوله فلزی و لایه چسب از المانهای ۲۰ گرهی ایزوتروپیک و برای وصله کامپوزیتی از المانهای ۲۰ گرهی لایه‌ای استفاده شده است. شکل (۲) نحوه مدل‌سازی المان محدود لوله ترکدار را نشان می‌دهد. به منظور ایجاد شرایط سینگولار تنش در اطراف نوک ترک، المان‌های سینگولار با گره میانی در یک-چهارم در اطراف نوک ترک به کار رفته است [۷]. وصله کامپوزیتی، لایه چسب و لوله به ترتیب با یک، یک و شش لایه مدل شده‌اند. تحلیل‌ها به صورت الاستیک خطی انجام شده و ضریب شدت تنش (K_I) محاسبه شده است.



شکل ۲. *نحوه مدل‌سازی المان محدود لوله دارای ترک نیم‌بیضی*

برای بررسی صحت تحلیل‌های المان محدود، نتایج حاصل از نرم‌افزار برای حالت تقویت نشده با مقادیر تئوری موجود مقایسه شده‌اند. شکل (۳) تغییرات K_I بدست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری و نتایج حاصل از معادله نیومن-راجو [۸] را برای یک ترک نیم‌بیضی با a/t=۰/۴ و a/c=۰/۶، نشان می‌دهد. در این نمودار φ زاویه بین مکان محاسبه ضریب شدت تنش و سطح خارجی ترک روی جبهه ترک است (شکل ۱-ب). چنانچه در شکل (۳) دیده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. با توجه به عدم وجود نتایج معتبر برای حالت لوله تقویت شده، نتایج حاصل برای حالتی از صفحه ترکدار با نتایج بدست آمده توسط آیت اللهی و هاشمی [۳] مقایسه شده که در این مورد هم همخوانی خوبی وجود دارد.



شکل ۳. *نحوه تغییرات ضریب شدت تنش روی جبهه ترک*

۴- نتایج

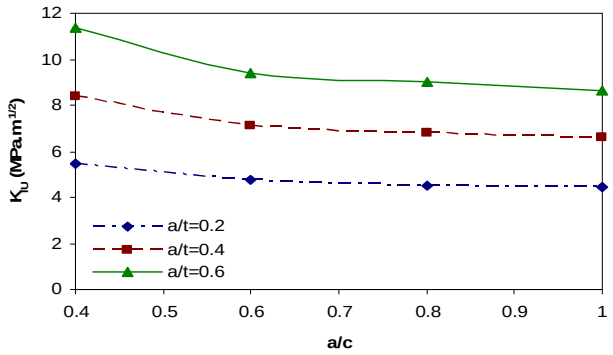
۴-۱- بررسی ابعاد ترک

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار ضریب شدت تنش و رفتار قطعه ترکدار، ابعاد ترک است. بنابراین تحلیل‌هایی در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده روی لوله دارای ترک نیم‌بیضی محوری روی سطح داخلی آن انجام شده است. در شکل‌های (۴ و ۵)، نمودار تغییر K_I برای ترک نیم‌بیضی در حالت‌های تقویت‌نشده و تقویت‌شده نسبت به مقدار عمق نسبی ترک (a/t) و ضریب منظری ترک (a/c) رسم شده است. چنانچه در این شکل‌ها دیده می‌شود، افزایش عمق ترک (افزایش a/t) و افزایش طول ترک (کاهش a/c) باعث افزایش مقدار ضریب شدت تنش در هر دو حالت با و بدون وصله می‌شود. با مقایسه نمودارهای (۴ و ۵) دیده می‌شود که استفاده از وصله کامپوزیتی مقدار K_I را به مقدار زیادی کاهش

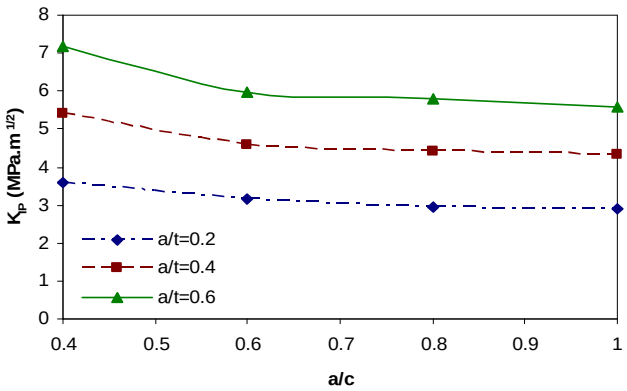
می‌دهد. این مطلب در شکل (۶) که تغییرات پارامتر درصد کاهش را نسبت به مقادیر مختلف a/t و a/c نشان می‌دهد، به خوبی مشاهده می‌شود. پارامتر درصد کاهش (RP [1]) به صورت زیر تعریف می‌شود

$$RP_I = (1-\frac{K_{Ip}}{K_{Iu}})\times 100 \qquad (۱)$$

در این معادله، اندیس‌های p و u به ترتیب نشان دهنده حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده می‌باشند. چسباندن وصله کامپوزیتی در حدود ٪۳۵ مقدار ضریب شدت تنش را برای حالت در نظر گرفته شده کاهش می‌دهد. در حالت در نظر گرفته شده در این مقاله، با توجه به وجود ترک روی لبه داخلی لوله، وصله کامپوزیتی با اعمال فشار روی سطح خارجی لوله باعث کاهش تنش‌های درون لوله و در نتیجه کاهش مقدار ضریب شدت تنش می‌شود، در حالیکه در حالت صفحه ترکدار و هنگامیکه ترک روی سطح خارجی لوله امتداد دارد، وصله کامپوزیتی با جلوگیری از باز شدن لبه‌های ترک مقدار ضریب شدت تنش را کاهش می‌دهد. با توجه به مستقل بودن نقش طول ترک و تنش اطراف آن در مقدار K_I، چسباندن وصله، کاهش بیشتر K_I را برای ترک‌های با عمق و طول بیشتر موجب می‌شود.

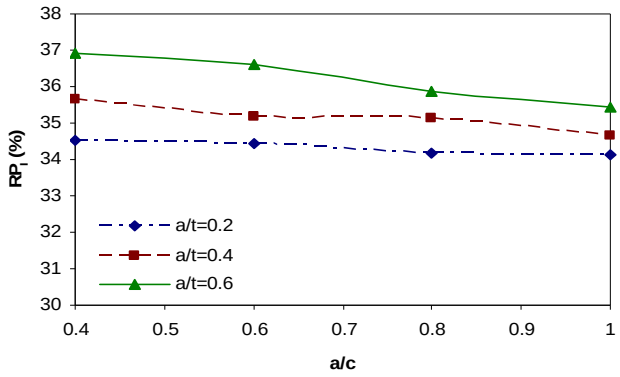


شکل ۴. *تغییرات K_I نسبت به مقادیر مختلف a/t و a/c در حالت تقویت نشده*



شکل ۵. *تغییرات K_I نسبت به مقادیر مختلف a/t و a/c در حالت تقویت شده*

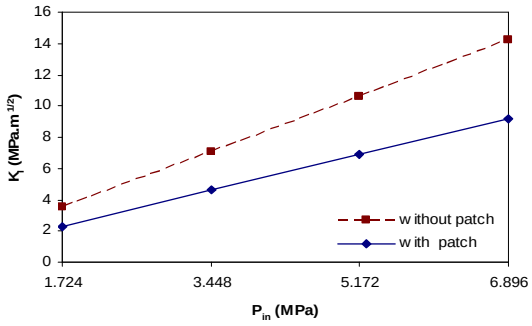
[1]- Reduction Percent



شکل۶. *تغییرات RP_I نسبت به مقادیر مختلف a/t و a/c*

۲-۴- بررسی اثر فشار

در لوله‌های ترکدار، مقدار فشار اثر بسیاری روی مقدار ضریب شدت تنش دارد. به منظور بررسی اثر فشار روی رفتار ترک، حالتی از لوله ترکدار مورد نظر با یک ترک نیم‌بیضی محوری با ابعاد a/t=۰/۴ و a/c=۰/۶ روی سطح داخلی لوله در نظر گرفته شده و تغییرات K_I برای مقادیر مختلف فشار داخلی در نمودار (۷) رسم شده است.



شکل ۷. *تغییرات ضریب شدت تنش نسبت به تغییرات فشار داخلی لوله*

نتایج نشان می‌دهد که فشار داخلی برای حالت تقویت شده مشابه حالت تقویت نشده به صورت خطی روی مقدار K_I اثر می‌گذارد. استحکام قطعه ترکدار در مقابل رشد ترک توسط پارامتر چقرمگی شکست (K_{IC}) مشخص می‌شود. چقرمگی شکست مقدار بحرانی برای ضریب شدت تنش است که برای مواد مختلف در جداول موجود است و چنانچه K_I از این مقدار فراتر رود، ترک شروع به رشد می‌کند، بنابراین با در دست داشتن مقدار K_I برای حالت خاصی از لوله ترکدار با فشار داخلی معین و آگاهی از مقدار K_{IC} می‌توان بیشترین مقدار فشار قابل تحمل توسط لوله ترمیم شده مورد نظر را محاسبه کرد. برای نمونه با درنظر گرفتن مقدار K_{IC} = ۵۴ $MPa.m^{1/2}$ برای فولاد و با توجه به نمودار(۷)،

بیشترین مقدار فشار قابل تحمل برای هندسه مورد نظر $P_{in,\max}$ = ۴۰/۴۸ MPa بدست می‌آید که بسیار بیشتر از بیشترین فشار موجود در لوله‌های انتقال گاز (P_{in} = ۶/۸۹۶ MPa) است. بنابراین از این روش می‌توان با اطمینان بالایی برای ترمیم مقاوم‌سازی لوله‌های ترکدار استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله حالتی از لوله دارای یک ترک نیم‌بیضی محوری در نظر گرفته شد و تأثیر تقویت لوله با وصله کامپوزیتی روی مقدار ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها با استفاده از روش المان محدود انجام گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

- استفاده از وصله کامپوزیتی مقدار ضریب شدت تنش را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. چنانچه برای هندسه مورد نظر، در حدود ۳۵ درصد کاهش در مقدار K_I مشاهده می‌شود.
- ابعاد ترک اثر قابل توجهی در مقدار ضریب شدت تنش و کارایی وصله در بهبود شرایط لوله ترکدار دارد. استفاده از وصله‌های کامپوزیتی برای ترمیم لوله دارای ترک با طول یا عمق بیشتر، کاهش بیشتری را در مقدار ضریب شدت تنش باعث می‌شود.
- مقدار فشار داخل لوله برای حالت‌های تقویت شده مانند حالت تقویت نشده، اثر مستقیم و خطی روی مقدار ضریب شدت تنش دارد.
- با توجه به اینکه ابعاد انتخاب شده بر اساس لوله‌های پرکاربرد در انتقال نفت و گاز است می‌توان از روش چسباندن وصله کامپوزیتی با قابلیت اطمینان بالای در مقاوم‌سازی لوله‌های ترکدار استفاده کرد.

۶-مراجع

1- Baker A.A.، Callinan RJ. and Jones R.، 1984، Repair of mirage III aircraft using BERP crack patching technology، Theor. Appl. Fract. Mech.، 2،1-16.

2- Mitchel R.A. and Woolley RJ.، 1975، Finite element analysis of practical cracks، AIAA J.، 62،267-89.

3- Ayatollahi M.R. and Hashemi R.، 2007، Computation of stress intensity factors (K_I ،K_{II}) and T-stress for cracks reinforced by composite patching، Compos. Struct.، 78،602-9.

4- Jones R. and Callinan RJ.، 1979، Finite element analysis of patched cracks، J. Struct. Mech.، 7،107-30

5- Su B. and Bhuyan G.S., 1998, Effect of composite wrapping on the fracture behavior of the steel-lined hoop-wrapped cylinders, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 75,1047-53.

6- Shahani A.R. and Kheirikhah M.M., 2006, Stress intensity factor calculation of steel-lined hoop-wrapped cylinders with internal semi-elliptical circumferential crack, Engg. Fract. Mech., In press.

۷- جاهد مطلق ح.ر.، نوبان م.ر. و اشراقی م.ا.، ۱۳۸۲، اجزاء محدود ANSYS، تهران، دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات و چاپ.

8- Raju I.S. and Newman J.C., 1982, Stress-Intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels, J. Press. Vessel Tech., 104,293-98.