

## تأثیر وصله کامپوزیتی در ترمیم و افزایش استحکام خط لوله گاز دارای ترک تحت فشار

## داخلی تناوبی

امیر جويا نكو نام<sup>۱</sup>، شهرام شهروئی<sup>۲،۳\*</sup><sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران<sup>۲</sup> هسته پژوهشی محاسبات پیشرفته، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران**The effect of composite patch in repairing and increasing the strength of cracked gas pipeline under cyclic internal pressure**Amir Jooya Neko nam<sup>1</sup>, Shahram Shahrooi<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran<sup>2</sup>Advanced computing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran<sup>3</sup>Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran**Abstract**

Due to the presence of initial cracks in gas pipelines and to prevent the increase in replacement and repair costs, the use of composite patches in cracks areas has become popular in recent decades. In this research, the role and performance of composite patch to prevent with fatigue crack growth in steel pipes used in gas pipelines under cyclic internal pressure is investigated. For this purpose, the method of intelligent growth of a semi-elliptical surface crack has been used for simulation using Ansys software. The findings of the research indicate the predominance of the peripheral sliding separation mode over the normal separation mode, which leads to the separation of the patch from the pipe. The internal crack of the pipe has more critical conditions in terms of stress and stress intensity factor than the external crack. The crack growth in the pipe depends on the type of loading and if the angle of the composite fibers is in the direction of the crack growth, the best reinforcement is provided. Also, with the increase of the internal pressure, the load cycles for crack growth are greatly reduced, and the use of glue between the pipe and the patch leads to a better transfer of strains from the pipe to the outer layers of the composite.

**Keywords:** Gas pipeline, fatigue crack growth, viscous zone method, composite patch

Received: 18/10/2022

Accepted: 19/12/2022

**چکیده**

به دلیل وجود ترک های ایجاد شده یا اولیه در خطوط لوله گاز و جلوگیری از افزایش هزینه تعویض و تعمیر، در دهه های اخیر استفاده از وصله های کامپوزیتی در نواحی دارای ترک رواج یافته است. در این تحقیق، به بررسی نقش و نحوه عملکرد وصله کامپوزیتی جهت مقابله با رشد ترک خستگی در لوله های فولادی مورد استفاده در خطوط لوله گاز تحت فشار داخلی نوسانی، پرداخته می شود. به این منظور از روش رشد هوشمند یک ترک نیم بیضوی سطحی برای شبیه سازی از نرم افزار انسیس استفاده شده است. یافته های تحقیق از غلبه مود جدایش لغزشی محیطی بر مود جدایش نرمال که منجر به جدا شدن وصله از لوله می شود، حکایت دارد. بر اساس نتایج، با توجه به جهت گیری ترک نوع لایه چینی مناسب قابل تعیین است. ترک درونی لوله شرایط بحرانی تری از نظر تنش و ضریب شدت تنش نسبت به ترک خارجی دارد. رشد ترک در لوله وابسته به نوع بارگذاری است و اگر زاویه الیاف کامپوزیت در جهت رشد ترک باشد بهترین حالت تقویت کنندگی فراهم می شود. همچنین با افزایش فشار داخلی چرخه های بارگذاری برای رشد ترک به شدت کاهش می یابد و بکارگیری چسب در میان لوله و وصله به انتقال بهتر کرنش ها از لوله به لایه های بیرونی کامپوزیت می انجامد.

**واژه های کلیدی:** خط لوله گاز، رشد ترک خستگی، روش ناحیه

چسبناک، وصله کامپوزیتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

\* نویسنده مسئول: شهرام شهروئی

نشانی: اهواز، گروه مهندسی مکانیک، هسته پژوهشی محاسبات پیشرفته، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: shahramshahrooi@iauhvaz.ac.ir

## ۱. مقدمه

خطوط لوله همچنان مهم‌ترین روش انتقال نفت، گاز و بطور کلی فرآورده‌های نفتی هستند. با توجه به استفاده از این سازه‌ها در شرایط اقلیمی متنوع و تحت بارگذاری‌های مختلف هر ساله هزینه‌ی زیادی صرف تعمیر و نگهداری آنان می‌گردد. در حالی که استفاده از جوشکاری و وصله‌های فلزی ممکن است خطرات زیادی به همراه داشته باشد و نیز در همه‌ی شرایط قابل بکارگیری نیستند استفاده از سیستم‌های تعمیر کامپوزیتی نه تنها به راحتی قابل اعمال است بلکه خطرات جوشکاری را نیز به همراه ندارد. با این وجود، تحقیق بر روی وصله‌های کامپوزیتی تنها در دهه‌های اخیر صورت پذیرفته است و هنوز چالش‌های قابل توجهی از منظر کارایی آنان برای تعمیر انواع مختلف عیب، بارگذاری‌های مختلف و کارکرد بلندمدت آنها باقیست. چاپتی<sup>۱</sup> و همکاران [۱] به بررسی وضعیت تنش<sup>۲</sup> در خط لوله‌ی گاز مدفون دارای نشتی تعمیر شده با وصله‌ی فلزی جوش داده شده به لوله جهت مقابله با بارهای مکانیکی و حرارتی پرداختند. فریر<sup>۳</sup> و همکاران [۲] چندین قطعه لوله API X60 در حالتی که یک عیب در سطح خارجی ماشین‌کاری و با چهار نوع مختلف وصله کامپوزیتی تعمیر شده بود را تحت تست هیدرواستاتیک بررسی و پیشنهاد کردند که تا پیش از تسلیم شدن دیواره لوله فولادی، تنها لوله است که فشار داخلی را تحمل می‌کند، اما پس از گذر از نقطه‌ی تسلیم وصله‌ی کامپوزیتی بخشی از بارگذاری را بر عهده می‌گیرد. لوکاس<sup>۴</sup> و همکاران [۳] لوله‌ی فولادی تعمیر شده با لایه‌های کامپوزیتی پلی اوراتان<sup>۵</sup> را از روش آزمایشگاهی بررسی و اشاره کردند که وصله‌ی کامپوزیتی می‌تواند برای بازه‌ی گسترده‌ای از قطر و طول لوله، بارگذاری شبه استاتیک و چرخه‌ای و نیز جهت استفاده در آزمایشگاه و نیز بصورت

میدانی قابل بکار گرفته شود. کاستا ماتوس<sup>۶</sup> و همکاران [۴] به بررسی نحوه‌ی بکارگیری وصله‌ی کامپوزیتی جهت تعمیر لوله‌ی فلزی دچار عیب راه به در پرداختند. جایاسورییا<sup>۷</sup> [۵] با استفاده از الیاف بازالت<sup>۸</sup> که نوع نسبتاً جدیدی محسوب می‌شوند به تعمیر لوله‌ی دچار خوردگی پرداخت و نتیجه گرفت که بار خمشی قابل تحمل لوله‌ی تقویت شده می‌تواند بهبود یابد. زرین زاده و همکاران [۶] به بررسی آزمایشگاهی لوله‌ی آلومینیومی دارای ترک محیطی سطحی تحت بار کششی تعمیر شده با کامپوزیت پلیمری شیشه/ اپوکسی<sup>۹</sup> پرداختند و جهت ایجاد ترک در لوله از روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده کردند. توتانجی<sup>۱۰</sup> و دمپسی<sup>۱۱</sup> [۷] با در نظر گرفتن تأثیر خاک فرمولی برای محاسبه‌ی تنش موجود در لوله مدفون دچار خوردگی تعمیر شده با وصله‌ی کامپوزیتی ارائه و بیان نمودند که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف آرامید<sup>۱۲</sup> یا شیشه بهتر می‌توانند مقاومت لوله را بازایی نمایند. دوئل<sup>۱۳</sup> و همکاران [۸] جهت بررسی تأثیر انواع طول عیب در جهت محیطی اقدام به مدلسازی اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس نمودند و ابراز داشتند که طول خوردگی در جهت محیطی لوله تأثیر قابل توجهی در تغییر فشار داخلی قابل تحمل لوله‌ی فلزی تعمیر شده ندارد. شومان و طاهری [۹] به اثربخشی سیستم‌های تعمیر کامپوزیتی تقویت شده با الیاف جهت تعمیر خوردگی‌های خارجی خطوط لوله تحت ترکیبی از فشار داخلی و خمشی پرداختند. بنزیان<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی لوله‌ی فلزی دچار ترک محیطی تعمیر شده با الیاف کربن و چسب اپوکسی تحت فشار داخلی پرداختند. ووی<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی لوله‌ی دچار عیب محیطی راه به در تعمیر شده با وصله کامپوزیتی تحت نیروی محوری پرداختند و اشاره کردند به خاطر خاصیت سفت‌کنندگی انرژی کرنشی لوله‌ی تعمیر شده

<sup>9</sup> Epoxy

<sup>10</sup> Toutanji

<sup>11</sup> Dempsey

<sup>12</sup> Aramid

<sup>13</sup> Duell

<sup>14</sup> Benziane

<sup>15</sup> Woo

<sup>1</sup> Chapetti

<sup>2</sup> Stress

<sup>3</sup> Freire

<sup>4</sup> Lukács

<sup>5</sup> Polyurethane

<sup>6</sup> Costa-Mattos

<sup>7</sup> Jayasuriya

<sup>8</sup> Basalt

در روش سنتی بررسی تخریب ماده تحت بارگذاری چرخه-ای از نمودار مقاومت ماده نسبت به تعداد چرخه‌ی بار اعمالی استفاده می‌شود. در این روش، به منظور تعیین مقاومت ماده نمونه‌ای از قطعه تحت باری با اندازه‌ی ثابت اما جهت معکوس شونده قرار داده می‌شود تا جایی که قطعه بشکند. در عمل اکثر تخریب‌های ناشی از خستگی در تنش-هایی کم‌تر از تنش تسلیم رخ می‌دهند. بنابراین در چنین شرایطی روش مکانیک شکست الاستیک خطی صدق می‌کند و قابلیت بکارگیری از جهت پیش‌بینی رشد تدریجی ترک خستگی وجود دارد. در حقیقت، آزمایشات خستگی متعدد انجام شده بر مواد مختلف حاکی از این است که ضریب شدت تنش بسیار مفیدتر از دامنه‌ی تنش جهت توصیف گسترش ترک است. نکته‌ی کلیدی در چنین آزمایشاتی این است که نرخ رشد ترک، که به عنوان رشد پله‌ای ترک بر واحد چرخه‌ی بارگذاری قابل اندازه‌گیری است، به بازه‌ی ضریب شدت تنش نوک ترک وابسته است:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (1)$$

که رایج‌ترین فرمول ارائه شده قانون پاریس اصلاح شده است:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

در معادله‌ی (۱) ضرایب C و m از آزمایش بدست می‌آیند. در روش عددی جهت محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش از تغییر شکل‌های نوک ترک استفاده می‌شود. مطابق این روش، نخست نیروهای گرهی نوک ترک در گره J حساب می‌شوند و در گام بعدی با توجه به رشد ترک به اندازه‌ی  $\Delta a$  تغییر شکل‌ها در گره  $J^*$  که تا قبل از رشد ترک با گره J مطابقت داشته است، بدست می‌آیند. برای یک المان هشت گرهی نشان داده شده در شکل ۲ می‌توان نوشت:

$$G_I = \frac{1}{2\Delta A} F_y^i (u_y^j - u_y^{j*}) \quad (3)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2\Delta A} F_x^i (u_x^j - u_x^{j*}) \quad (4)$$

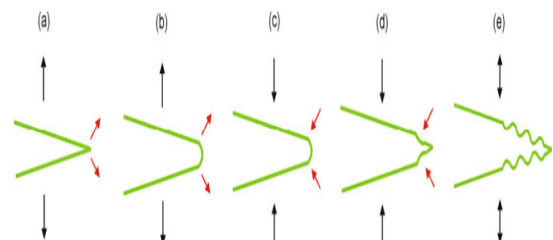
$$G_{III} = \frac{1}{2\Delta A} F_z^i (u_z^j - u_z^{j*}) \quad (5)$$

در روابط بالا  $\Delta A = b \times \Delta a$  که ضخامت المان در جهت z و

کمتر از حالت بدون تعمیر است که این خاصیت با افزایش زاویه‌ی ترک بیشتر می‌شود. همچنین برون‌آپوکسی تقویت بهتری نسبت به گرافیت‌آپوکسی فراهم می‌آورد. امیدی و همکاران [۱۲] به بررسی ترک محیطی راه به در موجود در لوله‌ی فولادی با بکارگیری نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> پرداختند ترمیم تحت فشار داخلی با استفاده از چهار وصله کامپوزیتی بور/آپوکسی، کربن/آپوکسی، کولار/آپوکسی و شیشه/آپوکسی به صورت موضعی صورت پذیرفت. در حالی که مقالات انجام شده در زمینه بررسی مقاومت وصله‌ی کامپوزیتی در برابر رشد ترک ناشی از پدیده‌ی خستگی، رشد ترک را با افزایش دادن غیر اتوماتیک اندازه ترک در جهتی دلخواه به پیش برده‌اند، در این مقاله از رشد هوشمندانه ترک در نرم-افزار انسیس و رکبنج<sup>۲</sup> بهره برده می‌شود. از سوی دیگر، با اتخاذ تماس میان لوله و وصله از روش جداسازی تماس به جای تماس آرمانی می‌توان استحکام میان اجزای تعمیر را بررسی نمود.

## ۲. تعاریف و معادلات

خستگی یک پدیده‌ی تدریجی وابسته به زمان است که امکان رخ دادن آن بدون هیچ هشدار و وجود دارد و باور این است که حدود ۹۵ درصد تمام تخریب‌های مکانیکی می‌تواند به خستگی مرتبط باشد. سه مرحله مربوط به تخریب خستگی وجود دارد که شامل جوانه‌زنی ترک، رشد تدریجی ترک، و تخریب نهایی هستند. نحوه‌ی رشد ترک که به خاطر کند شدن و تیز شدن مداوم جبهه‌ی ترک رخ دهد در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- نحوه رشد ترک خستگی

<sup>2</sup> Ansys Workbench

<sup>1</sup> Abaqus

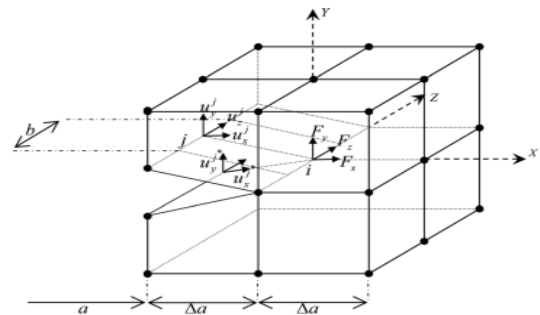
- افزایش طول ترک به اندازه‌ی معین و محاسبه‌ی چرخه‌های بارگذاری ( $\Delta N$ ) از رابطه‌ی اصلاح شده‌ی پاریس (رابطه (۲))
- محاسبه‌ی نرخ رشد ترک با داشتن  $\Delta N$  و  $K_I$  تا  $K_{III}$  و تولید جبهه‌ی جدید ترک جدید
- ساخت هندسه‌ی جدید با شکل جدید جبهه‌ی ترک
- ویرایش کردن مدل اجزای محدود بر اساس طول جدید ترک و هندسه‌ی نوک ترک

از سوی دیگر، مدل‌سازی تماس میان لوله و وصله بایستی مورد توجه قرار گیرد. شکست یا لایه لایه شدن در امتداد سطح مشترک بین فازها نقش عمده‌ای در محدود کردن چقرمگی و شکل‌پذیری ساختار مواد کامپوزیتی ایفا می‌کند. در حالیکه در مکانیک شکست کلاسیک از تکنیک رهاسازی گره برای مدل‌سازی لایه لایه شدن استفاده می‌گردد، روش دیگر بکارگیری تکنیک‌هایی است که مستقیماً فرایند شکست را با اتخاذ روابط نرم‌کننده بین تنش‌ها و جدایش لایه‌ها معرفی می‌کنند، و این به نوبه خود معرف انرژی شکست بحرانی یا همان انرژی لازم برای جدا کردن سطوح رابط است. این تکنیک مدل مواد منطقه چسبنده نامیده می‌شود. سطوح رابط مواد را می‌توان با مجموعه خاصی از عناصر رابط یا عناصر تماس نشان داد، و یک مدل CZM می‌تواند برای توصیف رفتار سازنده رابط استفاده شود. در شکل ۳ مدل خطی دو قسمتی جهت توصیف تنش مورد نیاز جهت جدایش سطوح تماس برای هر دو مود قائم و لغزش آورده شده است. در این تصاویر،  $\delta_n^*$  و  $\delta_t^*$  به ترتیب بیانگر بیشینه تغییر شکل قائم و لغزشی دو سطح تماس پیش از شروع جدایش و  $\delta_n^c$  و  $\delta_t^c$  به ترتیب بیانگر تغییر شکل قائم و لغزشی هنگام کامل شدن جدایش بین دو سطح هستند. همچنین،  $T_n^{max}$  و  $T_t^{max}$  نیز بیانگر تنش بیشینه قائم و برشی جهت شروع جدایش سطوح هستند.

### ۳. نتایج و بحث

خواص لوله، چسب و وصله‌ی کامپوزیتی مورد استفاده در جدول (۱) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است لوله و

$G_{II}, G_I$  و  $G_{III}$  انرژی آزاد کرنشی به ترتیب در مود اول تا سوم است.



شکل ۲- ترک در المان هشت‌گره‌ی

با توجه به روابط (۳) تا (۵) می‌توان ضرایب شدت تنش را بصورت زیر حساب نمود:

$$K_I = \sqrt{E'G_I} \quad (۶)$$

$$K_{II} = \sqrt{E'G_{II}} \quad (۷)$$

$$K_{III} = \sqrt{E'G_{III}} \quad (۸)$$

در روابط (۶) الی (۸) در حالت تنش صفحه‌ای  $E'=E$  و در حالت کرنش صفحه‌ای می‌توان نوشت  $E'=E/(1-\nu^2)$ . برای مسائل سه بعدی در حالت موده‌های ترکیبی ضریب شدت تنش معادل بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$K_{eq} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2 + 4(\alpha_2 K_{III})^2} \quad (۹)$$

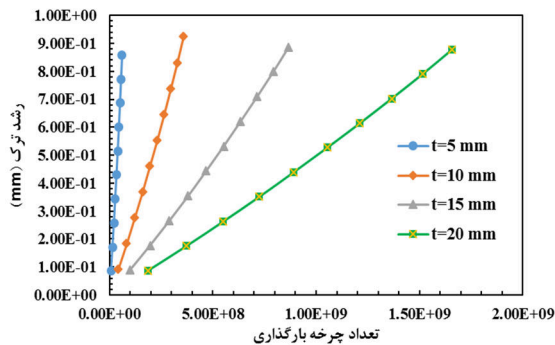
در رابطه (۹)  $\alpha_1 = K_{Ic}/K_{IIIc}$  و  $\alpha_2 = K_{Ic}/K_{IIc}$  که  $K_{IIc}$ ،  $K_{Ic}$  و  $K_{IIIc}$  به ترتیب چقرمگی شکست در موده‌های اول تا سوم است. با داشتن رابطه (۹) می‌توان از معادله پاریس مطابق رابطه (۳) نرخ رشد ترک را حساب کرد.

گام‌های اصلی که جهت شبیه‌سازی رشد ترک استفاده می‌شود عبارتند از:

- مدل‌سازی هندسه و شبکه اجزای محدود
- تعیین بارگذاری، قیود، و خواص مواد
- اعمال روش الاستیک خطی
- محاسبه‌ی نیروها و جابجایی‌های گره‌ی نوک ترک در سه جهت اصلی
- محاسبه‌ی  $G_I$  تا  $G_{III}$  و  $K_I$  تا  $K_{III}$  در نوک ترک از روابط (۳) الی (۸)
- محاسبه‌ی  $K_{eq}$  با استفاده از رابطه (۹)

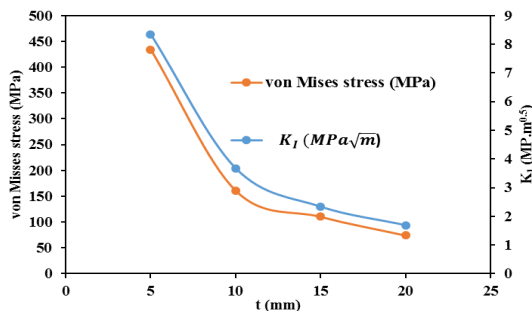
جدول ۱- ویژگی های لوله، چسب و وصله

لوله فلزی API X65		چسب		وصله کامپوزیتی	
$E$ (GPa)	۲۱۰	$E$ (GPa)	۱/۰۵	$E_x$ (GPa)	۱۵/۲
				$E_y$ (GPa)	۵۵
				$E_z$ (GPa)	۱۵/۲
				$\nu_{xy}$	۰/۰۷
$\nu$	۰/۳	$\nu$	۰/۴۵	$\nu_{yz}$	۰/۲۵۴
				$\nu_{xz}$	۰/۴۲۸
				$G_x$ (GPa)	۴/۷
				$G_y$ (GPa)	۴/۷
				$G_z$ (GPa)	۳/۲۸



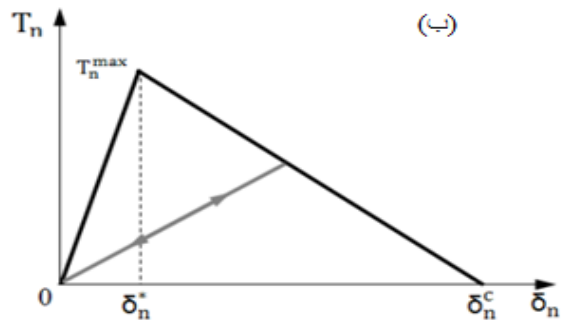
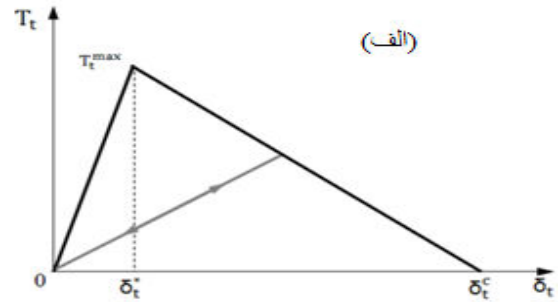
شکل ۴- تأثیر ضخامت لوله‌ی بدون تعمیر بر رشد ترک سطحی خارجی

این نکته از طریق مقایسه تنش و ضریب شدت تنش مود اول نیز قابل بررسی است که در شکل ۵ نمایش داده شده است. هر دو پارامتر با افزایش ضخامت لوله کاهش قابل توجهی تجربه می‌نمایند. همچنین، شایان ذکر است که با توجه به این بارگذاری از نوع فشار داخلی است بحرانی‌ترین نوع ترک در لوله ترک از نوع ترک محوری خواهد بود (شکل ۶).



شکل ۵- تأثیر ضخامت لوله‌ی بدون تعمیر بر تنش فون میسر و ضریب شدت تنش نوک ترک

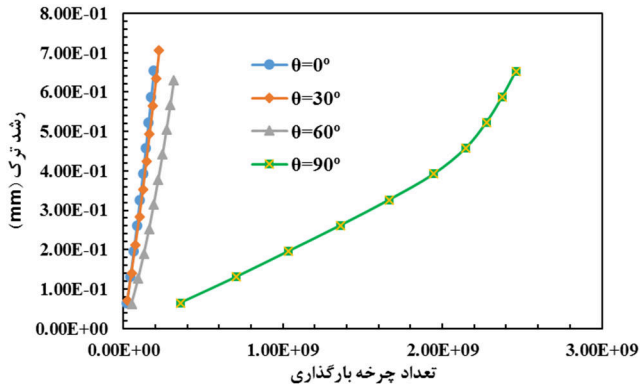
چسب رفتار الاستیک ایزوتروپیک و وصله کامپوزیتی، که از نوع الیاف تقویت شده با شیشه است، رفتار الاستیک ارتوتروپیک دارد. همچنین تماس میان لوله و وصله از گزینه جدایش تماس بر اساس روش ناحیه چسبناک مدل‌سازی شده به گونه‌ای که در ابتدا تماس لوله و وصله کامل فرض می‌شود و با توجه به بارهای وارد شده به لوله امکان جدا شدن خودکار وصله از لوله امکان‌پذیر است.



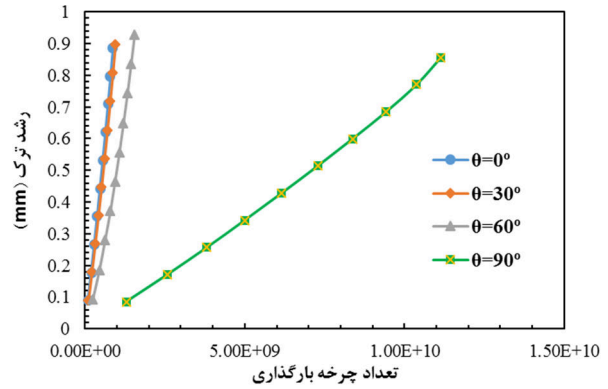
شکل ۳- مدل خطی دو قسمتی جهت توصیف تنش مورد نیاز جهت جدایش سطح تماس در (الف) مود جدایش قائم (ب) مود جدایش لغزشی

### ۳.۱. ترک سطحی در جداره خارجی

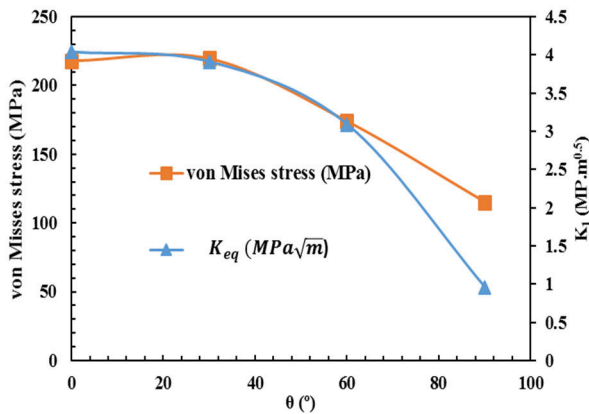
رشد ترک با توجه به نوع بارگذاری اتفاق می‌افتد. در این تحقیق فرض شده لوله تحت فشار داخلی معمول برای یک لوله گاز به مقدار ۶ مگاپاسکال و بارگذاری از مقدار ۱۰ درصد تا بار نهایی نوسان نماید که منجر به پدیده‌ی خستگی می‌گردد. با در نظر گرفتن ترک سطحی نیم بیضوی در سطح خارجی لوله می‌توان بررسی کرد که تأثیر ضخامت لوله بر رشد ترک چگونه است. مطابق شکل ۴ با افزایش ضخامت لوله از ۵ به ۲۰ میلیمتر تعداد چرخه بارگذاری مورد نیاز برای رشد ترک یکسان به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است که به معنای مقاومت بیشتر لوله در مقابل رشد ترک است.



شکل ۸- تأثیر جهت گیری ترک در لوله ی بدون تعمیر بر رشد ترک سطحی داخلی

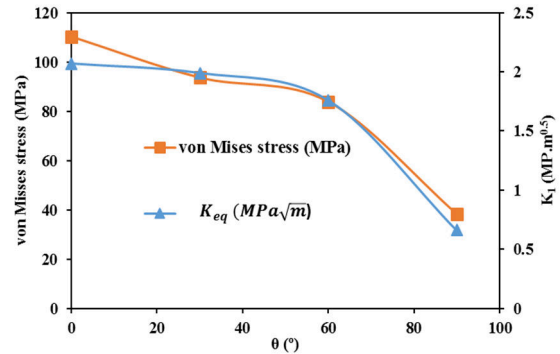


شکل ۶- تأثیر جهت گیری ترک در لوله بدون تعمیر بر رشد ترک سطحی خارجی



شکل ۹- تأثیر جهت گیری ترک داخلی در لوله ی بدون تعمیر بر تنش و ضریب شدت تنش نوک ترک

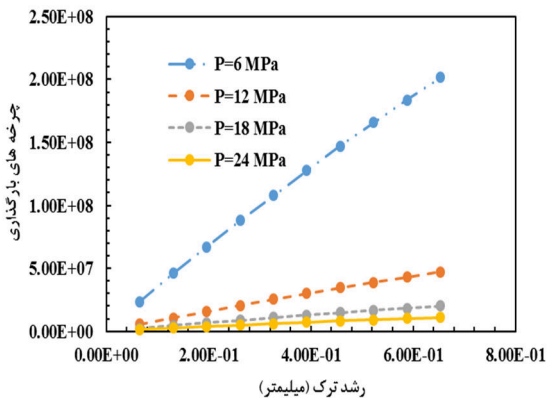
از سوی دیگر، شکل ۷ گواهی بر این مدعاست که با افزایش زاویه ی ترک، به گونه ای که ترک از حالت محوری به محیطی تغییر کند، مقادیر تنش و ضریب شدت تنش نوک ترک به طرز چشمگیری کاهش می یابند.



شکل ۷- تأثیر جهت گیری ترک در لوله ی بدون تعمیر بر تنش و ضریب شدت تنش نوک ترک

### ۳.۳. تأثیر فشار داخلی بر رشد ترک

در شکل ۱۰ مشاهده می شود که فشار داخلی تأثیر قابل ملاحظه ای بر نحوه رشد ترک در لوله دارد؛ بطوریکه با افزایش فشار از ۶ تا ۲۴ مگاپاسکال میزان چرخه های لازم برای رشد ۰/۶۵ میلیمتری ترک داخلی دایروی با شعاع ۲ میلیمتر از  $۱۰^۸ \times ۲/۰۲$  به  $۱۰^۷ \times ۱/۱$  یعنی حدود ۱۸ برابر کاهش می یابد.

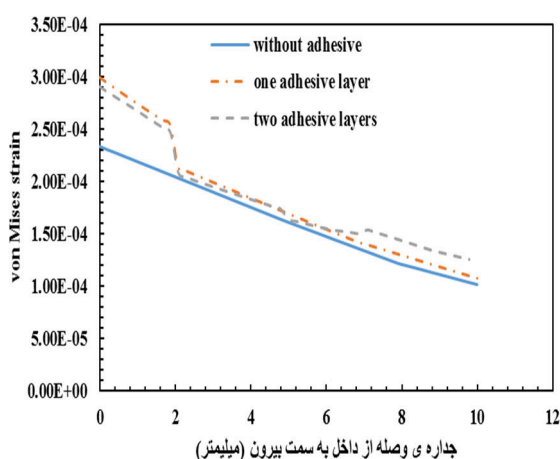


شکل ۱۰- تأثیر فشار داخلی بر رشد ترک

### ۳.۲. ترک سطحی در جداره داخلی

ترکی با ابعاد مطابق بخش قبلی در سطح داخلی لوله ی بدون تعمیر لحاظ گردیده و رشد ترک خستگی در آن بررسی می گردد. مطابق شکل های ۸ و ۹ روند تغییر پارامترهای نشان داده شده شبیه ترک خارجی است با این تفاوت که در این شرایط رشد ترک به چرخه های بارگذاری کمتری نیاز دارد که ناشی از وجود تنش و ضریب شدت تنش معادل بیشتر در این حالت نسبت به ترک خارجی است. این بدان معناست که ترک داخلی شرایط بحرانی تری نسبت به ترک خارجی دارد و باید نسبت به تعمیر آن سریعتر اقدام گردد تا در نتیجه ی بارگذاری خستگی لوله در نتیجه ی رشد ترک دچار تخریب نگردد.

چسب است. مشاهده می‌گردد که در حالت بدون چسب کرنش کمتری در وصله ایجاد می‌شود، و بنابراین انتقال کرنش‌ها از لوله به وصله به گونه‌ی مناسبی صورت نگرفته است. این بدان معناست که حضور چسب جهت انتقال کرنش‌ها از لوله به وصله ضروری است. همچنین، در حالتی که توزیع کرنش در حالت یک و دو لایه چسب در لایه‌های درونی تقریباً مشابه است، وصله با دو لایه چسب کرنش‌های بیشتری در قسمت بیرونی تحمل می‌نماید. یک دلیل می‌تواند این باشد که حضور دو لایه چسب شرایط مناسبی جهت انتقال کرنش‌ها به لایه‌های بیرونی کامپوزیت فراهم نموده است.



شکل ۱۲- مقایسه توزیع کرنش در وصله بدون چسب، وصله با یک لایه و وصله با دو لایه چسب

### ۳.۵. تعمیر لوله با توجه به زاویه ترک

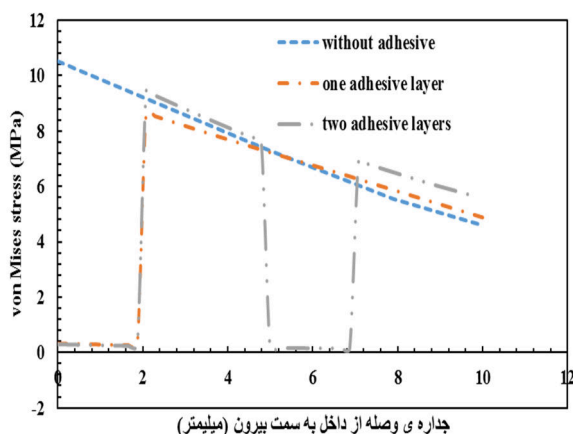
در شکل ۱۳ تأثیر وصله استفاده شده جهت تعمیر ترک سطحی داخلی دایروی با شعاع ۲ میلی‌متر نشان داده شده است. با مقایسه‌ی این شکل با شکل ۷ می‌توان دریافت که وصله‌ی مورد استفاده توانسته است رشد ترک با زاویه‌های ۰ تا ۶۰ درجه را کمتر نماید اما شرایط لوله دارای ترک با زاویه‌ی ۹۰ درجه را نتوانسته بهبود ببخشد. همچنین مقایسه‌ی شکل ۹ و شکل ۱۴ حاکی از کاهش تنش و ضریب شدت تنش با بکارگیری تعمیر کامپوزیتی است.

### ۳.۶. تأثیر نسبت بارگذاری چرخه‌ای بر رشد ترک

در این بخش به بررسی تأثیر این نسبت بر تنش، ضریب شدت تنش، و رشد ترک پرداخته می‌شود. مطابق شکل ۱۵

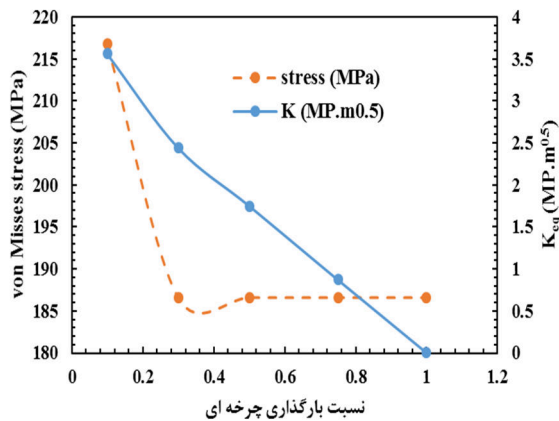
### ۳.۴. تأثیر چسب بر توزیع تنش و کرنش در وصله کامپوزیتی

به منظور بررسی تأثیر حضور چسب بر توزیع تنش فون میسز در وصله‌ی کامپوزیتی شکل ۱۱ ارائه گردیده است. به طور کلی، توزیع تنش از درون به بیرون وصله کامپوزیتی به صورت نزولی است؛ یعنی لایه‌های درونی کامپوزیت بار بیشتری تحمل می‌کنند. در حالتی که چسب وجود ندارد توزیع تنش بصورت پیوسته است چرا که الیاف وصله‌ی کامپوزیتی توانایی تحمل تنش را دارند. قابل مشاهده است که حضور چسب سبب شده لایه‌های بیرونی وصله کامپوزیتی تنش بیشتری نسبت به لایه‌های درونی تحمل نمایند. این بدان معناست که در صورت استفاده از لایه‌های چسب بیشتر بایستی الیاف بیرونی مقاومت و تقویت‌کنندگی بیشتری داشته باشند. نکته‌ی قابل ذکر دیگر این است که در حالت استفاده از دو لایه چسب نسبت به حالت یک لایه چسب، لایه‌ی بیرونی الیاف کامپوزیت تنش بیشتری تحمل می‌کند. در واقع، با بکارگیری لایه‌های چسب بیشتر، انتقال بارها از لایه‌های درونی به بیرونی بهتر صورت می‌گیرد. اما نباید از نظر دور داشت که لایه‌های بیشتر چسب به معنای یکپارچگی کمتر سیستم کامپوزیتی و افزایش احتمال جدایش لایه‌های آن از همدیگر است.

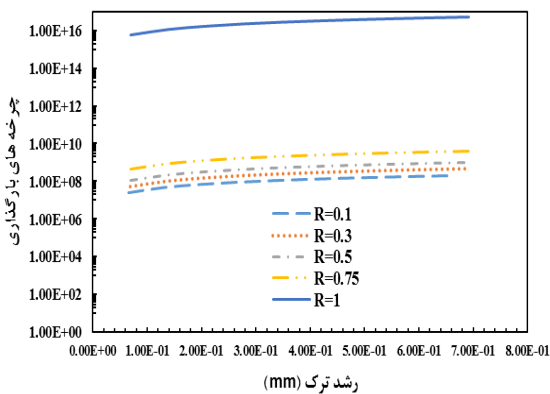


شکل ۱۱- مقایسه توزیع تنش در وصله بدون چسب، وصله با یک لایه و وصله با دو لایه چسب

از سوی دیگر، شکل ۱۲ نشان‌دهنده توزیع کرنش در جداره وصله در حالت بدون چسب، با یک لایه چسب، و دو لایه



شکل ۱۵- تأثیر نسبت بارگذاری چرخه ای بر تنش و ضریب شدت تنش نوک ترک در لوله ی تعمیر شده



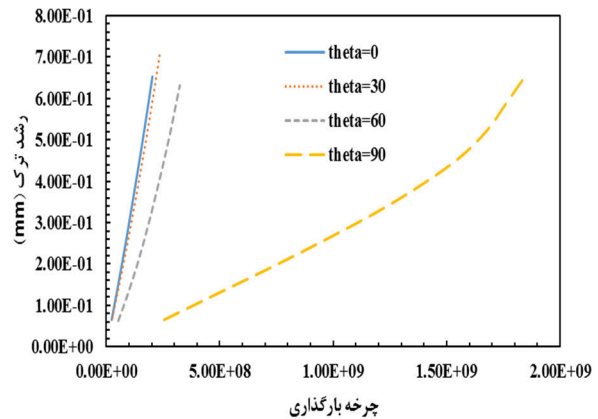
شکل ۱۶- تأثیر نسبت بارگذاری چرخه ای بر رشد ترک در لوله ی تعمیر شده (نمودار قائم از نوع لگاریتمی)

### ۳.۷. تأثیر لایه چینی کامپوزیت بر میزان تقویت کنندگی

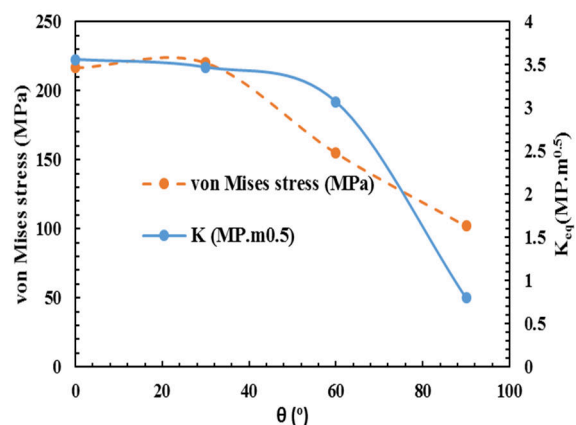
#### سیستم تعمیر

در این قسمت به بررسی تأثیر جهت گیری الیاف بر جلوگیری از رشد ترک در لوله پرداخته می شود. بدین منظور، ۶ نوع لایه چینی متداول مورد استفاده قرار گرفته است که جهت گیری الیاف نسبت به محور لوله سنجیده شده است. در شکل ۱۷ تأثیر لایه چینی کامپوزیت بر رشد ترک سطحی داخلی نشان داده شده است که نمایانگر این نکته است که لایه چینی [۰]۶ بهترین عملکرد جهت کاهش رشد ترک و لایه چینی [۹۰]۶ عملکرد نسبتاً ضعیفتری داشته است. به طور مشابه، شکل ۱۸ نشان می دهد که تعمیر کامپوزیتی با لایه چینی [۰]۶ منجر به ایجاد کمترین ضریب شدت تنش ترک و لایه چینی [۹۰]۶ بیشترین مقدار ضریب شدت تنش را باعث می شود.

با افزایش نسبت بارگذاری چرخه ای از ۰/۱ به ۱ مقدار تنش فون میسز ابتدا کاهش و سپس ثابت بقی می ماند اما ضریب شدت تنش یک روند کاهشی قابل توجه تجربه می نماید که بر اساس رابطه ی معکوس میان چرخه های بارگذاری و ضریب شدت تنش بر طبق رابطه پاریس قابل توجیه است. علاوه بر این، شکل ۱۶ بیانگر این حقیقت است که با افزایش نسبت بارگذاری چرخه ای، چرخه های بارگذاری جهت رشد ترک در لوله بیشتر می گردد. در حالیکه این افزایش با افزایش نسبت های بارگذاری از ۰/۱ به ۰/۷۵ نسبتاً بالا نیست، با افزایش نسبت بارگذاری به یک، چرخه های بارگذاری مورد نیاز جهت رشد ترک رشد بسیار زیادی دارد و در مرتبه ی ۱۰<sup>۱۶</sup> قرار می گیرد که عملاً به معنای عدم رشد ترک است.

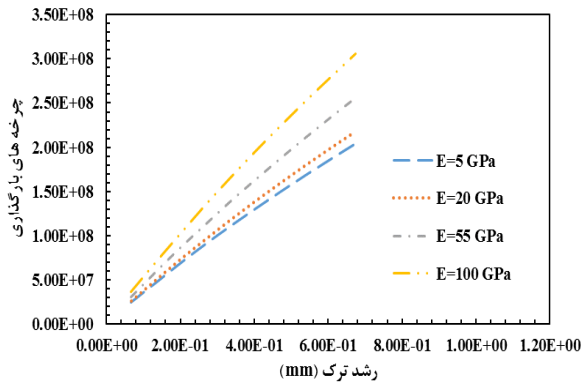


شکل ۱۳- تأثیر جهت گیری ترک در لوله تعمیر شده بر رشد ترک سطحی داخلی

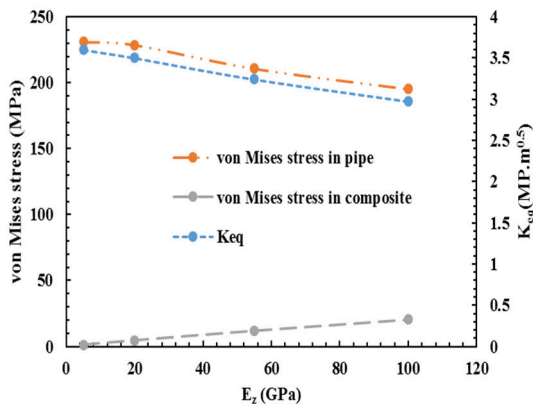


شکل ۱۴- تأثیر جهت گیری ترک داخلی در لوله ی تعمیر شده بر تنش و ضریب شدت تنش نوک ترک





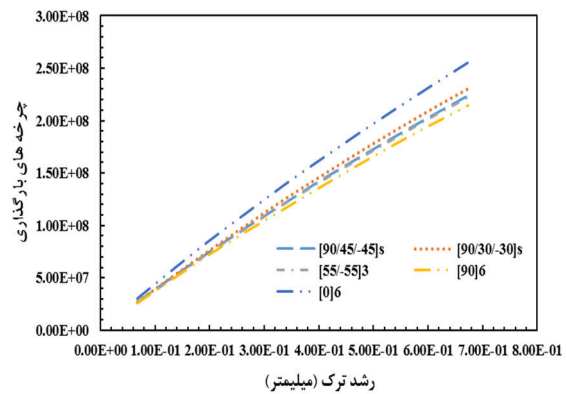
شکل ۱۹- تأثیر مدول الاستیسته کامپوزیت بر رشد ترک سطحی داخلی



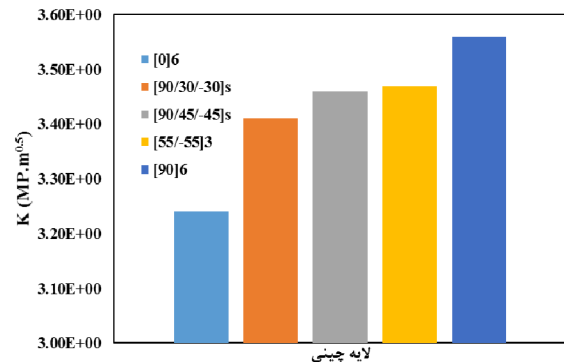
شکل ۲۰- تنش فون میسز و شدت تنش در مقابل مدول الاستیسته محوری کامپوزیت

#### ۴. نتیجه گیری و جمع بندی

وصله کامپوزیتی قادر به مقابله با رشد ترک در لوله فلزی است. استفاده از روش ناحیه چسبناک جهت مدلسازی تماس لوله و وصله حاکی از اهمیت بیشتر مود جدایش وصله از لوله در مود لغزشی نسبت به مود جدایش قائم حکایت دارد. وابسته به خواص وصله کامپوزیتی میزان تقویت کنندگی آن متفاوت است. با توجه به نوع ترک نوع لایه چینی مناسب قابل تعیین است. در نتیجه، برای ترک سطحی داخلی لوله که در جهت محوری آن قرار دارد در صورتیکه زاویه تمام لایه‌های کامپوزیت در جهت رشد ترک که همان جهت محوری لوله است باشد بهترین شرایط جهت تقویت ناحیه ترک دار فراهم می‌گردد. رشد ترک در لوله وابسته به نوع بارگذاری است. در لوله‌ی گاز تحت فشار داخلی رشد ترک در جهت محوری است و این پدیده مستقل از جهت‌گیری اولیه ترک است. ترک درونی لوله



شکل ۱۷- تأثیر لایه چینی کامپوزیت بر رشد ترک سطحی داخلی



شکل ۱۸- تأثیر لایه چینی تعمیر کامپوزیتی بر شدت تنش ترک سطحی داخلی در لوله

#### ۳.۸ تأثیر مدول الاستیسته محوری کامپوزیت بر رشد ترک

رشد ترک در چرخه‌های بارگذاری مختلف در شکل ۱۹ مورد بررسی قرار گرفته که حاکی از تأثیر مثبت افزایش مدول الاستیسته‌ی محوری بر کاهش رشد ترک در چرخه-های بارگذاری یکسان است. دلیل چنین نتیجه‌ای این است که هر چه مدول یانگ ماده‌ی کامپوزیتی بیشتر باشد سهم بیشتری از تنش را می‌تواند تحمل کند و بنابراین خاصیت تقویت کنندگی آن افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۲۰ بیانگر این نکته است که با افزایش مدول الاستیسته محوری کامپوزیت تنش فون میسز موجود در وصله افزایش و در لوله کاهش می‌یابد که به معنای افزایش خاصیت تقویت کنندگی کامپوزیت است. بطور مشابه، ضریب شدت تنش معادل ترک هم با افزایش سفتی وصله افزایش می‌یابد. البته نباید از نظر دور داشت که سفتی بیشتر وصله کامپوزیتی به معنای صلبیت بیشتر آن و حساسیت بیشتر آن نسبت به شکست ترد است.

Research Trans Tech Publications Ltd, (2014)1101-1105.

- [11] K.S. Woo, J.S. Ahn, S.H Yang. "Cylindrical discrete-layer model for analysis of circumferential cracked pipes with externally bonded composite materials." *Composite Structures* **143** (2016) 317-323.
- [12] M .Jamal-Omidi, S.M. Nabavi and A. H. Parsania Parsania. "The Repair of Circumferential Through-Wall Cracked Pipe by Using Local Composite Patch." *Journal of Marine Engineering*, **30** (2020) 41-51.

شرایط بحرانی تری از نظر تنش و ضریب شدت تنش نسبت به ترک خارجی فراهم آورده است. با توجه به خوردگی درونی لوله که به ترک می‌انجامد توجه بیشتر به این مسئله ضروری است تا از رشد ترک و تخریب فوری لوله جلوگیری شود. با افزایش فشار داخلی چرخه‌های بارگذاری جهت رشد ترک به شدت کاهش می‌یابند. استفاده از چسب میان لوله و وصله به انتقال بهتر کرنش‌ها از لوله به لایه‌های بیرونی کامپوزیت می‌انجامد.

### سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت از پایان نامه های دانشجویی شرکت گاز استان خوزستان انجام گردیده است. بدینوسیله نویسندگان از آن شرکت تشکر و قدردانی می نمایند.

### مرجع‌ها

- [1] M.D. Chapetti, J.L. Otegui, C. Manfredi, and C. F. Martins. "Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **5** (2001) 379-387.
- [2] J.L.F. Freire, R.D. Vieira, J.L.C. Diniz, L.C. Meniconi . "Part 7: Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline." *Experimental Techniques* **31** (2007) 59-66.
- [3] J. Lukács, G. Nagy, I. Török, J .Égert, B. Pere "Experimental and numerical investigations of external reinforced damaged pipelines." *Procedia Engineering* **1** (2010) 1191-1200.
- [4] H.S. da Costa-Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio, V. Perrut, An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins, *Materials & Design*, **9** (2009) 3581-3591.
- [5] S. Jayasuriya. "Experimental Study on Rehabilitation of Corroded Pipes." *PhD diss.*, University of Windsor (Canada), (2017).
- [6] H. Zarrinzadeh, M.Z. Kabir, A. Deylami. "Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminium pipe repaired by composite patch." *Engineering Structures* ,**133** (2017) 24-32.
- [7] H. Toutanji, S. Dempsey. "Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials." *Thin-Walled Structures* ,**2** (2001): 153-165.
- [8] J.M. Duell, J.M. Wilson, M.R. Kessler. "Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **11** (2008) 782-788.
- [9] A. Shouman, F. Taheri. "An investigation into the behaviour of composite repaired pipelines under combined internal pressure and bending." In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **30** ( 2009) 111-118.
- [10] M. Meriem-Benziane, S.A. Abdul-Wahab, N. Merah, and B. Babaziane. "Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with adhesive band in pipeline API X65." In *Advanced Materials*