Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.2/ 29-38

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.3.7

Numerical Study on Rehabilitation of the Pressurized Pipes Containing Longitudinal External Crack Using CFRP under Service Load

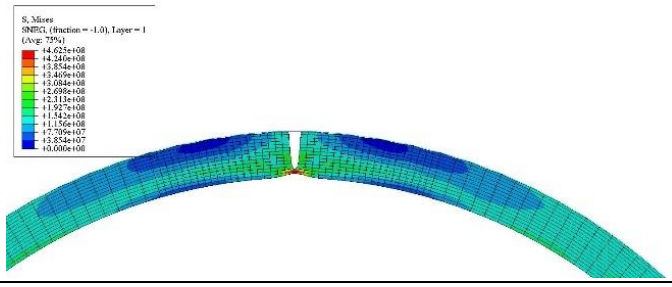
Hamid Bayesteh

Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Rehabilitation of cracked pressurized pipe
- Rehabilitation of pressurized pipes under service load
- Investigation of plastic deformation on bearing load of CFRP

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 30 December 2023
Received in revised form: 10 January 2024
Accepted: 25 February 2024
Available online: 9 March 2024
*Correspondence: h_bayesteh@sbu.ac.ir
How to cite this article:
H. Bayesteh. Numerical Study on Rehabilitation of the Pressurized Pipes Containing Longitudinal External Crack using CFRP under Service Load. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(2):29-38.

Keywords:
Pressurized pipes
Pressurized cylinders
Crack
Rehabilitation
CFRP

ABSTRACT

In recent years, there has been a substantial growth in the utilization of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) composite materials for repairing and reinforcing pipes. This method offers notable advantages, including rapid installation, the feasibility of implementation under service conditions, and cost-effectiveness. The repair and reinforcement of pressurized pipes, particularly in cases where taking the pipe out of service is not feasible, present challenges. Traditional options such as replacing damaged sections or welding on pipes in service become impractical. CFRP emerges as a valuable solution in such scenarios. Nevertheless, the distinct properties of steel and composite materials pose significant challenges to their efficacy. This research employs numerical modeling to investigate the repair and strengthening of pipes with longitudinal cracks under different internal pressures and service conditions. The findings indicate that the presence of initial pressure before applying CFRP diminishes the pipe's capacity. This reduction is attributed to the limited contribution of CFRP to load-bearing at low pressures, owing to the disparate modulus of elasticity between CFRP and steel. However, the rate of capacity reduction decreases with higher initial pressures, highlighting the complexities involved in effectively utilizing CFRP for repairing pressure pipes.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۲/ صفحه ۲۹-۳۸

نشریه علمی مکانیک هوافضا

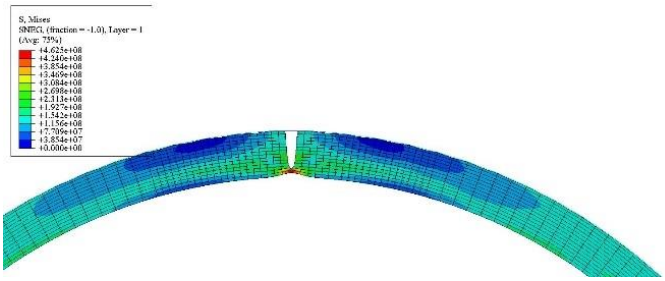
DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.3.7

بررسی عددی تقویت لوله‌های تحت فشار دارای ترک خارجی در راستای طولی با استفاده از CFRP در شرایط بهره‌برداری

حمید بایسته

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- تقویت مخازن تحت فشار ترک‌خورده با CFRP
- تقویت لوله‌ها تحت شرایط سرویس
- بررسی اثر پلاستیسیته نوک ترک بر تعمیر و تقویت مخازن تحت فشار

چکیده

تعمیر و تقویت لوله‌ها و مخازن تحت فشار با استفاده از مواد کامپوزیتی CFRP در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است که ازجمله مزایای آن‌ها می‌توان به‌سرعت نصب، امکان تعمیر در شرایط سرویس و همچنین هزینه پایین اشاره نمود. در بسیاری از موارد ازجمله تعمیر و تقویت لوله‌های تحت فشار امکان خارج کردن لوله از شرایط سرویس وجود ندارد که استفاده از برخی گزینه‌های تقویت نظیر جایگزینی قسمت آسیب‌دیده یا انجام جوشکاری بر روی لوله‌ی تحت سرویس را ناممکن می‌سازد. به همین دلیل استفاده از CFRP جهت تعمیر لوله‌های تحت فشار می‌تواند بسیار مفید باشد. بااین‌وجود اختلاف خواص مصالح فولادی و کامپوزیتی اثرپذیری آن‌ها را با چالش‌های جدی مواجه می‌نماید. در این تحقیق به بررسی تعمیر و تقویت لوله‌های دارای ترک طولی با تأکید بر حفظ فشار داخلی بهره‌برداری حین تعمیرات پرداخته‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود فشار اولیه بهره‌برداری قبل از بستن CFRP ظرفیت لوله را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. این کاهش ظرفیت به دلیل مشارکت کم CFRP در باربری در فشارهای پایین به دلیل اختلاف مدول الاستیسیته CFRP و فولاد است. بااین‌وجود نرخ کاهش ظرفیت در فشارهای اولیه بالا کاهش می‌یابد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول:

h_bayesteh@sbu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

لوله‌های تحت فشار

مخازن تحت فشار

ترک

تقویت لوله‌ها

CFRP

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) توزیع‌شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

گسیختگی ناگهانی در تجهیزات صنعتی و سازه‌ها، علاوه بر عواقب جانی ناخوشایند، خسارات اقتصادی چشمگیری نیز به دنبال دارد. تحقیقات اخیر نشان داده است که خسارات ناشی از شکست سازه‌ها در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۸ به بیش از ۱۱۹ میلیارد دلار رسیده است که حدود ۴۰ درصد تولید ناخالص ملی را تشکیل می‌دهد [۱].

خطوط لوله مرتبط با استخراج و توزیع انرژی از جمله شریان‌های بسیار حیاتی کشور هستند که آسیب به آن‌ها می‌تواند علاوه بر خسارت اقتصادی، اثرات جبران‌ناپذیر سیاسی و اجتماعی نیز داشته باشد. دلیل این امر اهمیت بسیار بالای منابع انرژی در اقتصاد از طریق صادرات و واردات حامل‌های انرژی می‌باشد. در این میان انتقال فرآورده‌های نفتی و گازی از طریق خطوط لوله نقش بسیار چشمگیری در میان انواع روش‌های انتقال نظیر کشتی دارد. طول لوله‌های گازرسانی در سراسر دنیا بیش از ۱ میلیون کیلومتر برآورد می‌شود و در حال حاضر بیشترین صادرات روسیه به اروپا از طریق خطوط لوله دریایی می‌باشد.

با توجه به اهمیت خطوط لوله در انتقال انواع سیالات، شبکه‌های خط لوله مختلفی در سراسر دنیا ساخته شده و تحت بهره‌برداری قرار دارند، اما متاسفانه بسیاری از این خطوط لوله دچار فرسودگی یا اسیب شده‌اند. به عنوان مثال میزان عبور اب در یک شبکه آبرسانی بدون عیب حدود ۷۰ درصد است و این بدان معنا است که حدود ۳۰ درصد آن به صورت نشت و ... به هدر می‌رود. البته این میزان در کشورهای کمتر توسعه یافته بسیار بالاتر است. موارد مورد اشاره در فوق به غیر از اهمیت سیاسی و اجتماعی شبکه خطوط لوله در مسائل کلان سیاسی، اجتماعی و منطقه‌ای است. مجموعه عوامل فوق تایید کننده اهمیت نقش پایش سلامت انواع خطوط لوله و تعمیر و تقویت آن‌ها جهت بهره‌برداری مداوم است.

معمولا شکست و خرابی لوله ناشی از بروز یک نقص نظیر ترک و گسترش آن است. خرابی نهایی و ناپایداری ترک هنگامی رخ می‌دهد که ترک به وضعیت بحرانی از نظر طول ترک یا شدت تنش می‌رسد. به صورت عمومی سه مرحله بروز ترک، گسترش ترک و خرابی نهایی در خطوط لوله قابل تفکیک است [۲]. عوامل مختلفی در ایجاد ترک نقش دارند که از جمله این موارد می‌توان به نقش خوردگی، خراش، شیارهای عمیق، ضربه و نقص‌های حین ساخت اشاره نمود. از سایر موارد نیز می‌توان به برخورد اشیای خارجی نظیر لنگر کشتی یا نقص‌های ایجاد شده در ساختار فلز حین عملیات جوشکاری اشاره نمود [۳]. از سوی دیگر بارهای مختلف ترمو-مکانیکی که در خط لوله ایجاد تنش می‌کنند به رشد و بحرانی شدن ترک کمک می‌کنند. از جمله این عوامل مکانیکی می‌توان به انواع نیروی های خمشی، محور و برشی، فشار داخلی خط لوله، دمای حاصل از عبور محصولات داغ و خستگی ناشی از جریان اشاره نمود. عوامل ترکیبی شیمیایی-مکانیکی نظیر پدیده ترک تنش خوردگی که به حضور همزمان تنش مکانیکی و خوردگی شیمیایی وابسته است نیز می‌تواند از عوامل مهم رشد ترک باشد. در بسیاری از موارد که فشار داخلی از حد مجازی کمتر باشد رشد ترک تنش خوردگی رخ نخواهد داد یا پیشرفت آن بسیار کند است [۴].

در میان عوامل مکانیکی ذکر شده، فشار داخلی در رشد و ناپایداری ترک‌های محوری بسیار موثر است [۳]. دلیل این امر ایجاد تنش بالا در راستای شعاعی لوله و عمود بر محور ترک است که می‌تواند منجر به رشد ترک مود اول شود. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی لوله‌های دارای ترک طولی تحت فشار داخلی پرداخته شده است. از جمله روش‌های سنتی تعمیر و تقویت ترک‌های طولی عبارت است از جایگزینی بخش آسیب دیده با لوله جدید، استفاده از کلمپ‌های فولادی جهت اتصال با پیچ در محل و همچنین استفاده از غلاف‌های فولادی با اتصال جوشی. روش‌های مورد اشاره بعضا بسیار هزینه‌بر و یا در برخی موارد غیر ممکن است. به همین دلیل، اخیرا، استفاده از مواد کامپوزیتی بر اساس کربن CFRP به عنوان گزینه اول تعمیر سازه‌ها برای جبران کمبود مقاومت ناشی از نقص تبدیل شده است. از جمله مزایای این روش تقویت در مقایسه با روش‌ها متداول سنتی می‌توان به سبکی، سهولت نصب، عدم نیاز به خارج کردن لوله از شرایط سرویس و صرفه اقتصادی اشاره نمود. تحقیقات بسیار در زمینه تعمیر و تقویت لوله‌ها با استفاده از CFRP انجام شده است. به عنوان مثال در

مرجع [۵] به بررسی آزمایشگاهی رفتار CFRP در تعمیر و تقویت لوله‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است. همچنین در مرجع [۶] یک روش ساده به منظور تخمین فشار ترکیدگی لوله و ضخامت مورد نیاز CFRP در شرایط لوله خورده شده ارائه شده است. در مرجع [۷] به بررسی عددی ظرفیت لوله‌های تقویت شده با در نظر گرفتن هندسی لایه‌های کامپوزیتی و همچنین چسبندگی ناقص لوله و مواد کامپوزیتی پرداخته شده است. علاوه بر موارد فوق، کامپوزیت‌های CFRP به عنوان ابزار تعمیر و تقویت لوله‌ها، رایزرهای دریایی، پل‌ها و همچنین لوله‌های پایه سکوهای دریایی مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. به عنوان مثال [۹] آزمایش‌های در مقیاس کامل به منظور بررسی بهره‌وری تعمیر لوله‌ها با استفاده از کامپیوزیت در لوله‌ها و رایزرهای دریایی انجام دادند. همچنین لسانی و سایرین [۱۰] به بررسی تعمیر و تقویت اتصالات لوله‌ها با استفاده از CFRP پرداختند.

استفاده از CFRP به عنوان روش تعمیر و تقویت لوله‌های ترک خورده نیز به صورت خاص مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۱۱] به بررسی عددی اثر ضخامت کامپوزیت بر لوله‌های دارای ترک داخلی و در مرجع [۱۲ و ۱۳] به بررسی سایز ترک محیطی بر روی ضریب شدت تنش در لوله‌های تقویت شده با FRP پرداخته شده است. همچنین در مرجع [۱۴] به بررسی تقویت لوله‌های با ترک طولی در لوله‌های از جنس API X65 پرداخته شده است.

با وجود تحقیقات گسترده‌ای که در خصوص تعمیر و تقویت لوله‌های ترک خورده با CFRP انجام شده است، اما تحقیقات موثری به بررسی این لوله‌ها در شرایط بهره‌برداری نپرداخته است. این در حالی است که اولا اختلاف رفتار مصالح کامپوزیت و فولاد و دوما، رفتار پیچیده الاستوپلاستیک نواحی نوک ترک موجب می‌شود انتظار تعمیر و تقویت لوله‌ها در شرایط سرویس با آن‌چه که در شرایط خوردگی رخ می‌دهد کاملا متفاوت باشد. به همین دلیل در این تحقیق با تاکید بر مزیت مهم تقویت به روش CFRP تحت شرایط سرویس، به بررسی اثر پذیری تقویت لوله‌ها تحت فشار اولیه داخلی پرداخته می‌شود.

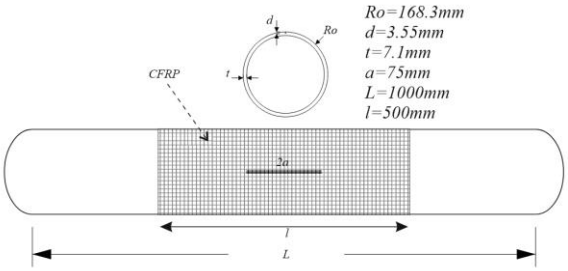
در ادامه و در بخش دوم به فرضیات شبیه‌سازی و خواص مصالح مورد تحلیل اشاره خواهد شد. نتایج صحت سنجی و شبیه‌سازی در بخش سوم این مقاله ارائه خواهد شد. در بخش چهارم به بررسی و نتیجه‌گیری شبیه‌سازی‌ها پرداخته خواهد شد. در نهایت و در بخش پنجم نتیجه تحقیق ارائه خواهد شد.

۲- روش تحلیل، فرضیات مواد و شبیه‌سازی

در این بخش به بیان فرضیات هندسی، مواد و شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

۲-۱- فرضیات هندسه

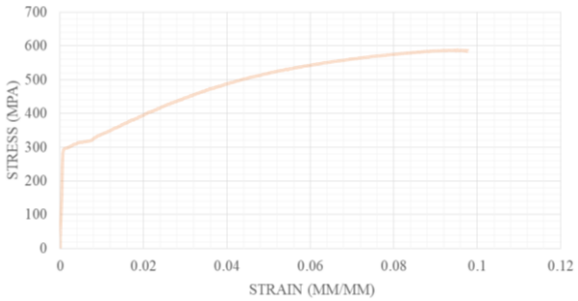
به‌منظور بررسی تعمیر و تقویت لوله‌ها در شرایط سروی از شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس استفاده‌شده است. هندسه مدل مورداستفاده در شکل **۱** نمایش داده‌شده است. طبق این شکل لوله با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر از نوع sch40 و با ضخامت ۷/۱ میلی‌متر موردبررسی قرارگرفته است. در وسط این لوله در راستای طولی و بر روی سطح خارجی آن ترکی به طول ۱۵۰ میلی‌متر و عمق ۳/۵۵ میلی‌متر ایجادشده است. عمق ترک ۵۰ درصد کل ضخامت را شامل می‌شود.



شکل (۱): هندسه لوله ترک‌خورده تقویت‌شده با CFRP.

۲-۲- فرضیات مواد

جنس لوله فولادی از نوع A106 و گرید B است. خواص مصالح فولادی که به‌صورت تنش-کرنش حقیقی می‌باشد و در شبیه‌سازی استفاده‌شده است مطابق شکل **۲** می‌باشد.



شکل (۲): نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد A106 مورداستفاده در شبیه‌سازی‌ها.

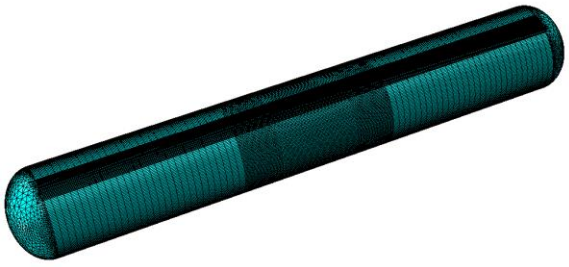
همان‌طور که در شکل **۱** نمایش داده‌شده است، به‌منظور تقویت لوله در ناحیه ترک‌خورده از CFRP به طول ۵۰۰ میلی‌متر استفاده‌شده است. برای این منظور از ۲۴ لایه CFRP هریک به ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر استفاده‌شده است که ضخامت کل CFRP برابر با ۳/۶ میلی‌متر است. خواص الیاف مورداستفاده در جدول **۱** نمایش داده‌شده است.

۲-۳- فرضیات شبیه‌سازی

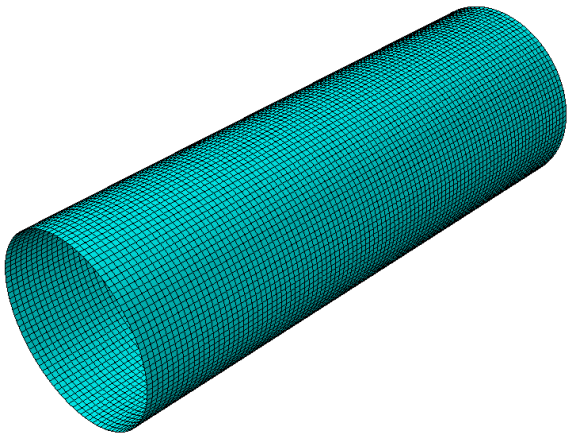
المان‌بندی لوله و CFRP به ترتیب در شکل **۴** و **۵** نمایش داده‌شده است. به‌منظور المان‌بندی قسمت مستقیم لوله از ۶۴۰۲۰۰ المان مکعبی ۸ گرهی و برای المان‌بندی کپ‌های دو انتها از ۶۹۹۰۷ المان هرمی چهار گرهی استفاده‌شده است. همچنین برای شبیه‌سازی CFRP از ۱۰۶۰۰ المان پوسته ۴ گرهی استفاده‌شده است. مجموعه لوله و CFRP در شکل **۵** داده‌شده است.

جدول (۱): خواص رزین و CFRP استفاده‌شده.

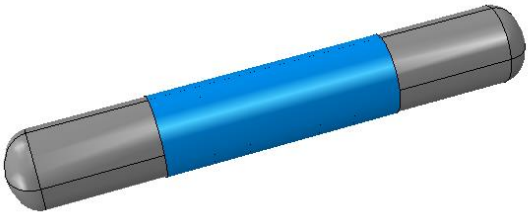
پارامتر	نماد	واحد	مقدار
مدول یانگ	E_x	GPa	۵/۵
	E_y	GPa	۲۳/۴
	E_z	GPa	۴۹
ضریب پواسون	υ_{xy}	-	۰/۴۳
	υ_{xz}	-	۰/۱۹۶
	υ_{yz}	-	۰/۴۳
مدول برشی	G_{xy}	GPa	۰/۶۹
	G_{xz}	GPa	۲۹/۶
	G_{yz}	GPa	۰/۶۹



شکل (۳): المان‌بندی لوله مورد ترک‌خورده.



شکل (۴): المان‌بندی CFRP.

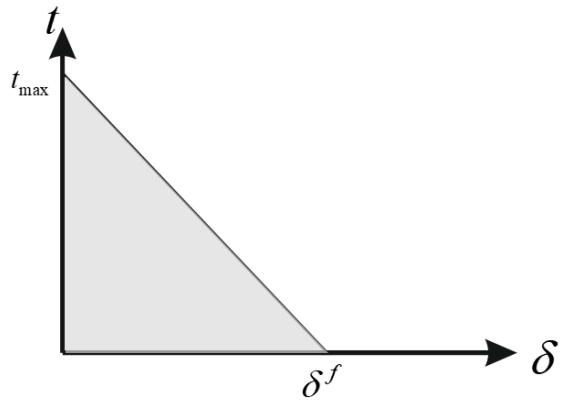


شکل (۵): اسمبلی لوله و CFRP.

به‌منظور شبیه‌سازی مصالح فولادی از پلاستیسیته سخت‌شوندگی استفاده‌شده است. نمودار تنش-کرنش حقیقی مورداستفاده در شکل **۲** داده‌شده است. به‌منظور شبیه‌سازی گسترش ترک از مدل ترک چسبنده استفاده‌شده است. با توجه به امکانات نرم‌افزار آباکوس از مدل نرم شوندگی خطی به‌صورت شکل **۶** استفاده‌شده است. ذکر این نکته ضروری است که نمودار شکل مذکور برای ترک‌های با ضخامت صفر مناسب است که در آن فرض می‌شود ترک بعد از وارد شدن ماده به ناحیه نرم‌شوندگی فعال می‌شود و قبل از آن ترک بسته است. بدیهی است که رفتار سخت‌شوندگی فولاد تا قبل از وارد شدن به ناحیه نرم

شوندگی (ایجاد ترک) توسط نواحی اطراف ترک در شبیه‌سازی دیده می‌شود.

به‌منظور شبیه‌سازی رشد خرابی در CFRP از مدل هشین استفاده‌شده است. بااین‌وجود همان‌طور که در ادامه توضیح داده خواهد شد خرابی مجموعه لوله و CFRP در همه موارد ابتدا در لوله صورت پذیرفت و به همین دلیل شبیه‌سازی به مدل خرابی CFRP حساس نیست.

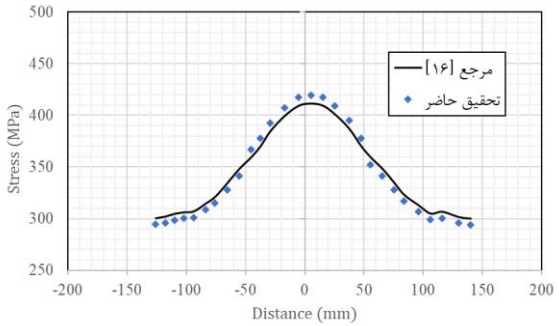


شکل (۶): نمودار نیرو-جداشدگی ترک چسبنده.

۳- صحت سنجی مدل عددی

به‌منظور صحت سنجی مدل مورداستفاده از نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه‌شده در مرجع [۱۶] استفاده‌شده است. لوله مورد آزمایش در این مقاله از نظر نوع مصالح و ابعاد مانند شکل **۱** می‌باشد، با این تفاوت که طول ترک مورد آزمایش برابر ۲۱۰ میلی‌متر بوده و همچنین عمق ترک برابر ۴/۶ میلی‌متر گزارش‌شده است. مطابق نتایج آزمایشگاهی گزارش‌شده در این مقاله فشار ترکیدگی لوله برابر ۲۶ مگا پاسکال به‌دست‌آمده است. شبیه‌سازی فشار ترکیدگی حاصل از شبیه‌سازی این تحقیق برابر ۲۷/۴ مگا پاسکال می‌باشد. خطای ناچیز ۵٪ به‌دست‌آمده بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بیانگر صحت فرضیات مورداشاره در شبیه‌سازی می‌باشد.

همچنین در این مقاله لوله تحت فشار بدون CFRP نیز مدل‌سازی شده است. فشار ترکیدگی لوله بدون CFRP با استفاده از روش اجزاء محدود در [۱۶] برابر ۱۵/۲ مگا پاسکال تخمین زده‌شده است. در تحقیق حاضر نیز فشار ترکیدگی لوله بدون CFRP برابر ۱۵/۵ مگا پاسکال به‌دست‌آمده است که اختلاف ناچیز ۲ درصد با نتایج مرجع دارد. مقدار تنش فون میسز در راستای طولی ترک و در سطح داخلی لوله در این تحقیق با مرجع [۱۶] در شکل **۷** شده است. در این شکل فاصله صفر بیانگر وسط ترک است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، انطباق خوبی بین نتایج حاضر و نتایج مرجع مشاهده می‌شود.



شکل (۷): مقایسه تنش فون میسز در راستای طولی ترک در سطح داخلی لوله با مرجع [۱۶].

۴- نتایج و بحث

هدف از این مقاله بررسی میزان اثربخشی تعمیر لوله‌ها با استفاده از CFRP در حین سرویس و بدون کاهش فشار داخلی لوله می‌باشد. معیار آنالیز داده‌ها در تمام شرایط بررسی فشار ترکیدگی لوله می‌باشد. فشار ترکیدگی به مقدار فشار داخلی لوله گفته می‌شود که در آن لوله ترکیده و سیال آن خارج‌شده و رشد دینامیکی ترک ایجاد می‌شود. برای شبیه‌سازی این شرایط فشار داخلی لوله به‌تدریج افزایش می‌یابد تا ترک رشد کرده و لوله در ناحیه ترک‌خورده کاملاً جدا می‌شود. در همه موارد از آنالیز صریح در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی تقویت لوله‌ها در وضعیت سرویس، شرایط زیر شبیه‌سازی‌شده است:

۱) فشار ترکیدگی لوله ترک‌خورده بدون تقویت
۲) فشار ترکیدگی لوله ترک‌خورده با تقویت CFRP در شرایط فشار اولیه صفر
۳) فشار ترکیدگی لوله ترک‌خورده با فشار اولیه 10 bar ~175 bar (1 MPa ~17.5 MPa)

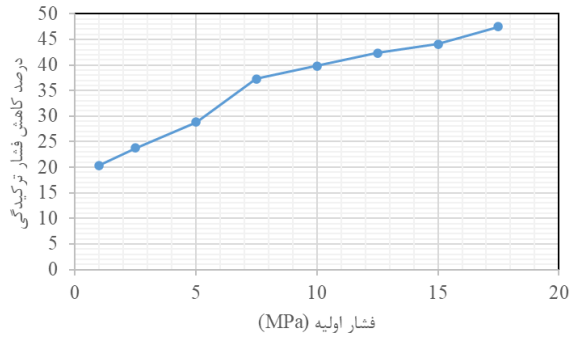
طبق آنالیزهای انجام‌شده، فشار ترکیدگی لوله بدون هرگونه تقویتی (حالت ۱) برابر با ۲۱/۶۷ مگا پاسکال به‌دست‌آمده است که این فشار معادل ۲۱۶/۷ بار در نظر گرفته می‌شود.

پس از تقویت لوله با CFRP در حالت ۲ (بدون فشار اولیه) که درواقع بیانگر ترمیم لوله خارج از شرایط سرویس است، فشار ترکیدگی لوله برابر با ۲۹/۵ مگا پاسکال (۲۹۵ بار) به دست آمد. به‌منظور بررسی اثرات شرایط وجود فشار اولیه بر بازدهی تعمیر و تقویت لوله به‌وسیله CFRP، فشار ترکیدگی لوله در فشارهای اولیه مختلف در جدول **۲** ارائه‌شده است.

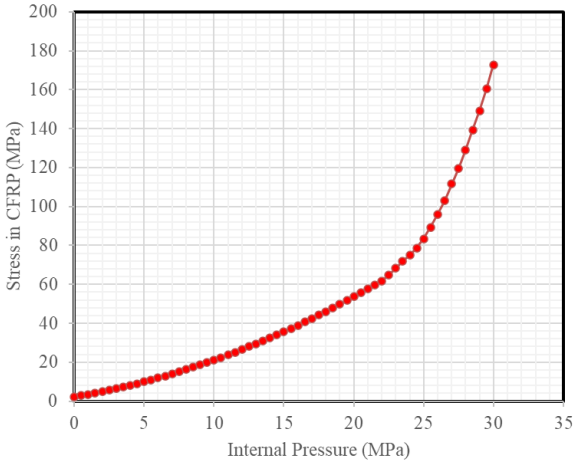
مطابق نتایج جدول **۲**، با افزایش فشار اولیه سرویس، ظرفیت لوله کاهش می‌یابد که این امر بدیهی است. دلیل آن نیز بیشتر بودن سطح تنش در فولاد با فشار اولیه‌های بالاتر و درنتیجه خرابی زودتر فولاد است؛ اما به‌منظور یافتن الگوی رفتار خرابی لوله تقویت شده در فشارهای اولیه مختلف، نمودار درصد کاهش ظرفیت لوله نسبت به حالت بدون فشار اولیه در مقادیر مختلف فشاراولیه در شکل **۸** نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود دو الگوی کاهش ظرفیت برای لوله تفکیک می‌شود. ابتدا از فشار ۱ مگا پاسکال تا فشار ۷/۵ مگا پاسکال با شیب تندتری ظرفیت لوله کاهش می‌یابد و بعد از آن با شیب ملایم‌تری ظرفیت کاهش می‌یابد. این تغییر در رفتار کاهش ظرفیت را می‌توان به نحوه انتقال بار از فولاد به CFRP دانست. برای روشن‌تر شدن موضوع، نمودار تنش در CFRP برای حالت فشار اولیه صفر در طول بارگذاری در شکل **۹** نمایش داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، وقتی فشار کمتر از حدود ۲۰ مگا پاسکال است، CFRP درصد کمی از بار را تحمل می‌کند؛ اما وقتی فشار داخلی از ۲۰ مگا پاسکال فراتر می‌رود، CFRP درصد بیشتری از بار را تحمل می‌کند. این فشار معادل شرایطی است که کرنش در جداره لوله غیرخطی می‌شود و با اعمال تغییرشکل‌های بزرگ‌تر در جداره لوله، CFRP می‌تواند بار بیشتری را تحمل نماید. این نمودار نشان می‌دهد که درصد باربری CFRP تا حد بسیار زیادی به کرنش پلاستیک جداره لوله بستگی دارد و با آغاز تغییرشکل‌های پلاستیک درصد بار بیشتری به CFRP منتقل می‌شود. به همین دلیل در شکل **۸** نیز در ابتدا و در فشارهای اولیه کمتر درصد بیشتری از تنش بلافاصله به جداره لوله منتقل می‌شود و به همین دلیل درصد بیشتری از ظرفیت کاسته می‌شود؛ اما در فشارهای اولیه بالاتر که وضعیت جداره لوله به شرایط غیرخطی نزدیک‌تر می‌شود درصد بیشتری از فشار داخلی بلافاصله به CFRP منتقل می‌شود و به همین دلیل نرخ کاهش ظرفیت لوله کمتر می‌شود.

جدول (۲): فشار ترکیدگی لوله تقویت شده با CFRP بر حسب فشارهای اولیه مختلف.

فشار اولیه (مگا پاسگال)	فشار پارگی (مگا پاسگال)
۰	۲۹/۵
۱	۲۳/۵
۲/۵	۲۲/۵
۵	۲۱
۷/۵	۱۸/۵
۱۰	۱۷/۷۵
۱۲/۵	۱۷
۱۵	۱۶/۵
۱۷/۵	۱۵

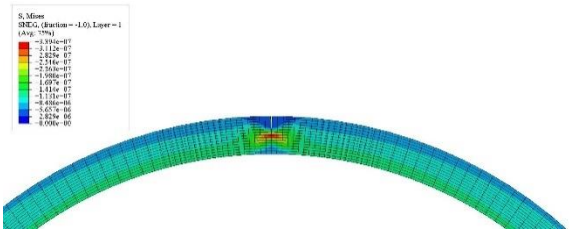


شکل (۸): درصد کاهش ظرفیت لوله در فشارهای اولیه مختلف نسبت به حالت خارج از سرویس (فشار اولیه صفر).

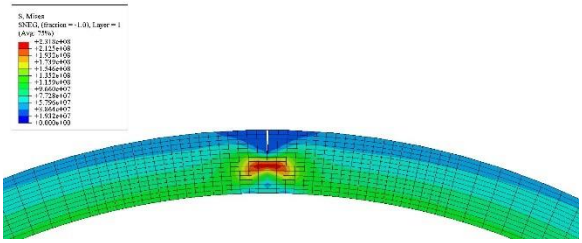


شکل (۹): تنش در CFRP در شرایط بدون فشار اولیه (تعمیر در شرایط خارج از سرویس).

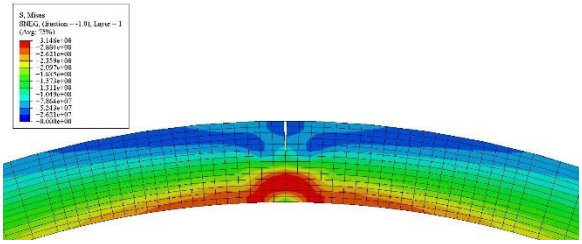
به‌منظور روشن شدن این موضوع، وضعیت تنش فون میسز در جداره لوله در شرایط اولیه که CFRP به دور لوله بسته می‌شود، در شکل **۱۰** نمایش داده‌شده است. در شکل **۱۱** کانتور تنش روی سطح خارجی CFRP و لوله به ترتیب در قسمت **۱۱ الف** و **۱۱ ب** در آستانه ترکیدگی لوله برای حالتی که فشار داخلی اولیه ۷۵ بار و همچنین وضعیت رشد ترک در آستانه ترکیدگی لوله در قسمت **۱۱ ج** نمایش داده‌شده است.



$\sigma_{VM}^{max} = 34$ MPa (الف)



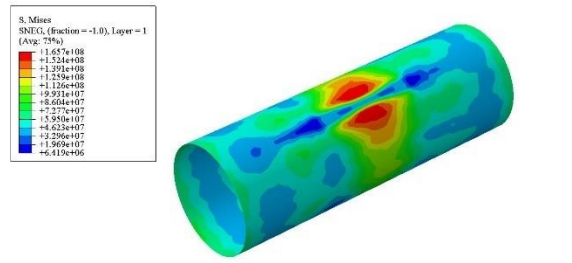
$\sigma_{VM}^{max} = 232$ MPa (ب)



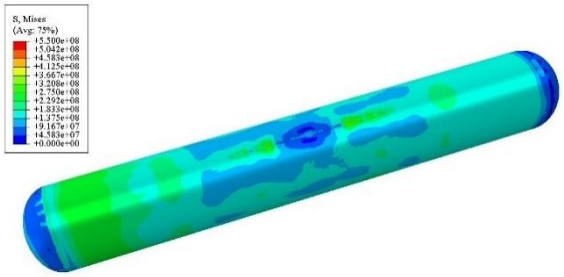
$\sigma_{VM}^{max} = 314$ MPa (ج)

شکل (۱۰): کانتور تنش فون میسز در شرایط اولیه (قبل از بستن CFRP) در فشار: الف) ۱۰ بار؛ ب) ۷۵ بار؛ ج) ۱۵۰ بار.

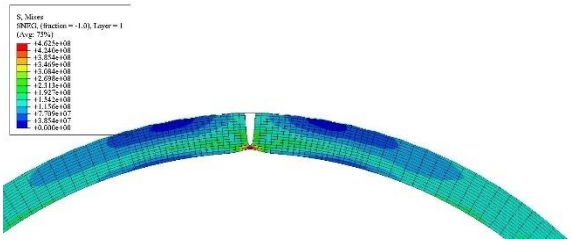
کانتورهای این شکل در مقطع میانی لوله و درجایی که بحرانی‌ترین وضعیت تنش رخ داده است نمایش داده می‌شود. کانتور تنش فون میسز برای شرایط فشار اولیه ۱۰، ۷۵ و ۱۵۰ بار به ترتیب در قسمت **الف**، **ب** و **ج** این شکل نمایش داده‌شده است. بیشترین مقدار تنش در فشار اولیه ۱۰ بار و قبل از بستن CFRP برابر ۳۴ مگا پاسکال است. در شرایطی که فشار اولیه ۷۵ بار می‌شود، بیشترین مقدار تنش فون میسز در نواحی اطراف ترک به ۲۳۲ مگا پاسکال افزایش میابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش اولیه در این دو حالت اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای دارد که همین موضوع سبب کاهش ظرفیت لوله در شرایط تعمیر لوله در شرایط سرویس می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۱): کانتور تنش فون میسز در آستانه ترکیدگی لوله وقتی در فشار اولیه سرویس ۷۵ بار: الف) روی سطح CFRP؛ ب) روی سطح لوله؛ ج) مقطع میانی لوله.

در شکل **۱۰ ج** و در فشار اولیه ۱۵۰ بار، بیشترین مقدار تنش فون میسز قبل از بستن CFRP برابر ۳۱۴ مگا پاسکال است. در این شرایط با وجود دو برابر شدن فشار اولیه نسبت به حالت **۱۰ ب**، تنش فون میسز افزایش کمتر از ۵۰ درصدی داشته است؛ اما نکته قابل‌تأمل در اختلاف بین شکل **۱۰ ب** و **۱۰ ج** گسترده‌تر شدن ماکزیمم مقدار تنش فون میسز است که به دلیل پلاستیک شدن مقطع رخ می‌دهد. این موضوع بیانگر تغییرشکل بیشتر لوله در نواحی

ترک‌خورده است؛ و همین تغییرشکل بیشتر در نواحی ترک‌خورده اجازه فعال شدن CFRP و تحمل بار بیشتر به آن را می‌دهد. دقیقاً به همین دلیل است که نرخ کاهش ظرفیت در فشارهای اولیه بالا در شکل **۸** کمتر است.

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در ابتدای مقاله بیان شد، در برخی شرایط تعمیر و تقویت لوله‌های آسیب‌دیده بایستی حین فشار سرویس باشد. همچنین بیان گردید که یکی از مزایای مهم استفاده از CFRP در تقویت لوله‌ها امکان استفاده در شرایط سرویس بدون هیچ‌گونه خطری است. به همین دلیل در این مقاله به بررسی میزان اثربخشی استفاده از CFRP در حین فشار سرویس پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱) به دلیل اختلاف مدول الاستیسیته فولاد و CFRP، میزان باربری CFRP در فشارهای اولیه کمتر است و وقتی لوله شروع به تغییرشکل‌های پلاستیک می‌کند میزان درصد باربری CFRP بیشتر می‌شود.

۲) به‌طورکلی تعمیر و تقویت لوله در شرایط سرویس باعث کاهش قابل‌ملاحظه ظرفیت لوله حتی در فشارهای پایین می‌شود.

۳) نرخ کاهش ظرفیت لوله در فشارهای پایین بیشتر از فشارهای بالا است. دلیل این امر، طبق استدلال ارائه‌شده در بند ۱، تحمل درصد بیشتری از فشار داخلی توسط بدنه لوله نسبت به CFRP در فشارهای پایین است.

تنش ایجادشده در CFRP در حین تعمیر لوله‌ها بسیار کمتر از ظرفیت نهایی CFRP است. بااین‌وجود نمی‌توان ضخامت CFRP را کم در نظر گرفت. چون اختلاف مدول الاستیسیته فولاد و CFRP سبب می‌شود که باربری CFRP عملاً پس از پلاستیک شدن فولاد رخ دهد که همین امر باعث می‌شود فولاد قبل از خراب شدن CFRP به آستانه خرابی برسد. در این شرایط لازم است به‌منظور افزایش درصد باربری CFRP حتی در فشارهای پایین‌تر از تعداد لایه‌های بیشتر CFRP استفاده شود تا ضعف مدول الاستیسیته پایین‌تر CFRP نسبت به فولاد در تحمل باربری پوشش داده شود.

۶- مراجع

[1] Reed RP, Smith J, Christ B. The economic effects of fracture in the United States. 1983.

[2] Pluvinage G, Elwany MH. Safety, reliability and risks associated with water, oil and gas pipelines: Springer Science & Business Media; 2007.

[3] Bai Y. Pipelines and risers: Elsevier; 2001.

[4] Fang B, Atrens A, Wang J, Han E, Zhu Z, Ke W. Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in “low” and “high” pH solutions. Journal of materials science. 2003;38:127-32. **DOI** https://doi.org/10.1023/A:1021126202539.

[5] Shouman A, Taheri F. Compressive strain limits of composite repaired pipelines under combined loading states. Composite Structures. 2011;93(6):1538-48. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.12.001.

[6] da Costa Mattos H, Reis J, Paim L, Da Silva M, Junior RL, Perrut V. Failure analysis of corroded pipelines reinforced with composite repair systems. Engineering Failure Analysis. 2016;59:223-36. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.007.

[7] Shadlou S, Taheri F. On the effectiveness of composites for repair of pipelines under various combined loading conditions: A computational approach using the cohesive zone method. Journal of Pressure Vessel Technology. 2017;139(2):021405. **DOI** https://doi.org/10.1115/1.4035081.

[8] Alexander C, Ochoa OO. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon–fiber reinforced composites. Composite Structures. 2010;92(2):499-507. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.034.

[9] Alexander C, editor Assessing the use of composite materials in reinforcing offshore risers and pipelines. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 2011. **DOI** https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49425.

[10] Lesani M, Bahaari M, Shokrieh M. FRP wrapping for the rehabilitation of Circular Hollow Section (CHS) tubular steel connections. Thin-Walled Structures. 2015;90:216-34. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.12.013.

[11] Hosseini-Toudeshky H, Fadaei E. Effects of composite patch geometry on collapse load of pressurized steel pipes with internal longitudinal flaws. Applied Mechanics and Materials. 2012;152:381-6. **DOI**

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.381.

[12] Benyahia F, Albedah A, Bachir Bouiadjra BA, Belhouari M. A comparison study of bonded composite repairs of through-Wall cracks in pipes subjected to traction, Bending moment and internal pressure. Advanced Materials Research. 2015;1105:41-5. **DOI** https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1105.41.

[13] Achour A, Albedah A, Benyahia F, Bouiadjra BAB, Ouinas D. Analysis of repaired cracks with bonded composite wrap in pipes under bending. Journal of Pressure Vessel Technology. 2016;138(6):060909. **DOI** https://doi.org/10.1115/1.4033449.

[14] Meriem-Benziane M, Abdul-Wahab SA, Zahloul H, Babaziane B, Hadj-Meliani M, Pluvinage G. Finite element analysis of the integrity of an API X65 pipeline with a longitudinal crack repaired with single-and double-bonded composites. Composites Part B: Engineering. 2015;77:431-9. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.008.

[15] Duell J, Wilson J, Kessler M. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008;85(11):782-8. **DOI** https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.08.001.

[16] Abduljabbar A, Khazal H, Hassan AKF. Experimental study on repair of cracked pipe under internal pressure. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2022;10(6):67-76. **DOI** https://doi.org/10.21533/pen.v10i6.3369.