



## بررسی رفتار ترک ناشی از خوردگی در مخازن فلزی تعمیر شده با الیاف کامپوزیتی تحت بارگذاری مونوتونیک

میرمیثم نیکسیرت<sup>۱</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>۲</sup>، شهرام حسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- فارغ التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: rahimi\_gh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۵ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۶ آذر ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

تعمیر با الیاف کامپوزیت

نقص

ترک

مخزن حامل سوخت

خوردگی

### چکیده

وجود ترک در مخازن حامل سوخت و خطوط لوله در مقابل بارهای متناوب، موجب رشد آن در ناحیه آسیب خواهد شد و فرآیند انتقال سوخت را با مشکل همراه خواهد کرد. استفاده از الیاف کامپوزیتی به منظور ترمیم ناحیه آسیب دیده می تواند به افزایش عمر سازه و قطعه منجر شود و مانع از بروز خرابی های بیشتر به هنگام تخلیه و سوخت گیری مجدد گردد. در این تحقیق برای نخستین بار یک مخزن فولادی تحت بارگذاری مونوتونیک با نرخ افزایش یک مگاپاسکال در دقیقه قرار گرفته است. معمولاً جنس این نوع سازه ها از فولاد API 5L X65 است و شرایط تعمیر مطابق با استاندارد ISO24817 و ASME PCC-2 صورت می گیرد. تحلیل عددی این سازه ها با توجه به نوع نقص موجود در آن و مقایسه آن با مخزن ترمیم یافته، می تواند شرایط مطلوب کاری را پیش بینی نماید. همچنین وجود ترک در این نوع مخازن با توجه به نوع خوردگی باعث تمرکز تنش بالا و تغییر شکل آن ها خواهد شد. استفاده از الیاف کامپوزیت و فضا سازه باعث کاهش سطح تنش و جلوگیری از رشد ترک ناشی از خوردگی خواهد شد. از مزایای تعمیر به کمک الیاف کامپوزیت، می توان به عدم قطع جریان سیال داخل لوله هنگام تعمیر، نصب آسان، کاهش هزینه ها و همچنین ارتقاء ایمنی آن اشاره کرد. از این رو این روش، میزان تمرکز تنش را در ناحیه خوردگی کاهش می دهد.

## Analysis of crack behavior caused by corrosion in metal vessel repaired with composite under monotonic loading

MirMeysam Niksirat<sup>1</sup>, Gholamhosein Rahimi<sup>2\*</sup>, Shahram Hosseini<sup>3</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: rahimi\_gh@modares.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 7 October 2023

Accepted: 17 December 2023

#### Keywords:

Repair with Composite Fibers

Defects

Cracks

Fuel Vessel

Corrosion

### Abstract

The presence of cracks in fuel vessels and pipelines against intermittent loads will cause them to grow in the damaged area and cause problems in the fuel transfer process. Using composite fibers to repair the damaged area can increase the life of the structure and part and prevent further damage during unloading and refueling. In this research, a steel tank is subjected to monotonic loading with an increase rate of 1 MPa per minute. The main material of these types of structures is API 5L X65 steel, and the repair conditions are made according to ISO24817 and ASME PCC-2 standards. Numerical analysis of these structures according to the type of defect in it and comparing it with the repaired tank can predict the optimal working conditions. Also, the presence of cracks in this type of tank due to the type of corrosion will cause a lot of stress concentration and change their shape. Using composite fibers and spacers will reduce the stress level and prevent the growth of cracks caused by corrosion. Among the advantages of repairing with the help of composite fibers are the non-interruption of fluid flow inside the pipe during the repair, easy installation, reduced costs, and improved safety. Therefore, this method reduces the stress concentration in the corrosion area.

### Please cite this article using:

Niksirat MM, Rahimi Gh, Hosseini Sh. Analysis of crack behavior caused by corrosion in metal vessel repaired with composite under monotonic loading. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):34-42. doi: 10.22034/IJME.2023.419708.1853 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

با توجه به افزایش تقاضای انرژی، بهره‌برداری از منابع نفت و گاز به عنوان منابع اصلی جهان به طور چشم‌گیری افزایش یافته است و در آینده نیز این روند افزایشی خواهد بود. در سال ۲۰۳۰ مصرف نفت و گاز به بیش از ۸ میلیارد تن (بیش از مصرف نیمی از مصرف انرژی جهان) خواهد رسید. از این رو استخراج سوخت‌های فسیلی از اعماق زمین محققان را در جستجوی منابع جدید برای انرژی بیشتر ترغیب کرده است. یکی از راه‌های قابل اطمینان جهت جابجایی و انتقال این مواد، استفاده از خطوط انتقال و مخازن حمل سوخت است. از سازه‌های توخالی در صنعت نفت و گاز در سیستم‌های لوله‌کشی برای انتقال نفت خام، گاز طبیعی و آب و مخازن تحت فشار برای ذخیره مواد استفاده می‌گردد. صنایع نفت و گاز به این نتیجه رسیده‌اند که خطوط انتقال یکی از بهترین راه‌های اقتصادی جهت انتقال نفت خام و گاز طبیعی در گستره بزرگی از بعد جغرافیایی هستند [۱].

با در نظر گرفتن این مورد، دو عامل عمده که می‌تواند باعث خرابی خط لوله شود، عبارتند از: تداخل‌های مکانیکی و خوردگی. این آسیب‌ها عمدتاً به شکل برآمدگی‌ها، رسوب، ترک، خوردگی و ترکیبی از آن‌ها در خطوط لوله مشاهده می‌شود که ممکن است در اثر حوادث غیرطبیعی یا تصادفی از جمله سقوط اشیاء، لنگرهای که جهت جابجایی قطعات استفاده می‌شود، ابزار ماهی‌گیری، کشتی‌های غرق‌شده، آلودگی دریایی و محیط‌های پرتلاطم مانند امواج و جریان‌های شدید به وجود بیاید [۲-۷]. ترک‌ها معمولاً به عنوان یک نقص ساختاری کوچک به شمار می‌روند، اما زمانی که تحت بارگذاری متناوب قرار می‌گیرند به تدریج باعث شکست سازه خواهند شد. فرورفتگی و خوردگی در سازه‌های مدور می‌تواند با ترک همراه باشد یا به عبارت دیگر ترک نیز می‌تواند در اثر ضربه و یا به دلیل قرار گرفتن در معرض محیط خورنده و یا به دلیل بارگذاری خستگی ناشی از نوسانات فشار و حرکات ژئوتکنیکی در یک فرورفتگی ایجاد شود [۸]. مطالعات مختلفی با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی و تجربی برای درک تأثیر نقص خوردگی دیواره لوله، مانند خوردگی یا ترک بر مقاومت ترکیب‌گی خط لوله و مخازن انجام شده است [۹-۱۰]. ابطحی و رحیمی [۱۱] مخزن حامل سوخت تعمیر شده با استفاده از الیاف کامپوزیتی را روشی کم‌هزینه و با بازدهی بالا ارزیابی نموده‌اند؛ به نحوی که مدت عمر قطعه را می‌تواند به مدت ۱۰ سال ارتقا بخشد. هدف این پژوهش بررسی عددی رفتار ترک موجود در مخازن و کپسول‌های دچار نقص خوردگی و مقایسه آن با مخازنی که با پوشش‌های کامپوزیتی ترمیم یافته‌اند، می‌باشد. همچنین بررسی رفتار خود مخزن از حیث تغییر شکل با توجه به درپوش‌های موجود در دو انتهای مخزن حائز اهمیت است. برای این منظور، شبیه‌سازی‌های عددی در نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شده است.

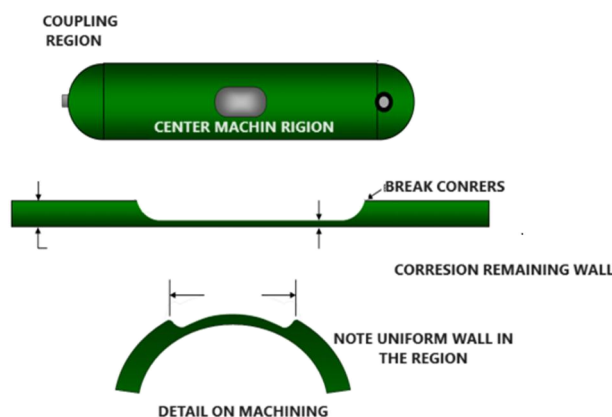
## ۲- مشخصات مخزن و الیاف کامپوزیتی

مشخصات مخزن فولادی و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ آمده است. مخزن مورد بررسی از سری لوله‌های به کار رفته در خطوط انتقال نفت و گاز از سری API5L X65 [۱۲] می‌باشد و نقص خوردگی با توجه به استاندارد ISO 24817 و ASME.PCC-2 [۱۳] بر روی آن با استفاده از ماشین‌کاری ایجاد شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نقص ایجاد شده بر روی دیواره مخزن، روش معمول در شبیه‌سازی اثر خوردگی خارجی در یک خط لوله و مخزن است [۱۴].

جدول ۱ مشخصات مخزن فولادی API5L X65

مشخصه	مقدار	واحد
مدول یانگ	۲۱۰	Gpa
ضریب پواسون	۰/۳	
طول خوردگی	۸۹	mm
ضخامت	۵/۵	mm
طول مخزن	۵۰۰	mm

اما در مقیاس خوردگی واقعی به دلیل زمان‌بر بودن، ممکن است با ترک‌ها و نابجایی‌هایی مواجه شویم که نتایج تحلیل را تحت شعاع قرار دهند. به همین منظور در این شبیه‌سازی به بررسی ترک ایجاد شده در راستای طول و در ضخامت باقی‌مانده از نقص پرداخته شده است.



شکل ۱ شماتیک مخزن دارای نقص خوردگی [۱۳]

جدول ۲ ویژگی‌های نقص مورد بررسی به همراه ترک را ارائه می‌دهد. به منظور تحلیل رفتار نقص به همراه ترک در حضور الیاف کامپوزیتی، نقص توسط الیاف کامپوزیتی و فیلر بر اساس استاندارد ASME PCC-2 & ISO 24817 تعمیر شده است. ضخامت مورد نیاز و تعداد لایه کامپوزیتی توسط روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه شده و همچنین به منظور پر کردن فضای خالی نقص و نوار کامپوزیتی از فضا ساز فیلر به ابعاد نقص و مشخصات  $E=3.3 \text{ Gpa}$  و  $\nu=0.37$  استفاده شده است. کامپوزیت مورد استفاده در ترمیم نقص مخزن فولادی، پارچه کربن است. ویژگی این الیاف مدول شعاعی و محوری برابر، نسبت استحکام به وزن مناسب و مقاومت نسبت به شرایط رطوبت و خوردگی است [۱۳].

جدول ۲ مشخصات ناحیه آسیب

مشخصه	مقدار	واحد
L	۴۴/۵	mm
W	۲۲/۵	mm
H	۱/۸۷۵	mm
D	۸۹	mm
K	۳۸/۵	mm

$$t_{repair} = 1 \frac{1}{s_c} \left( \frac{p_f \cdot d}{t_{wrap}} - s_a \cdot t \right) \quad (1)$$

$$t_s = t(1 - \beta) \quad (2)$$

$$N_{wrap} = \frac{t_{repair}}{t_{wrap}} \quad (3)$$

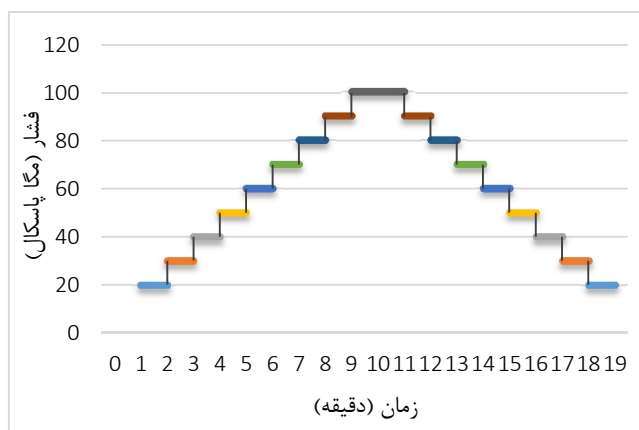
خواص مکانیکی الیاف کربنی در نظر گرفته شده در جدول ۳ قید شده است. ضخامت هر نوار تکی CFRP ( $t_{wrap}$ )، ۱/۵۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ خواص مکانیکی الیاف CFRP

مشخصه	مقدار	واحد
E11	۸۰	Gpa
E22	۸۳	Gpa
ضریب پواسون	۰/۲۵	

### ۳- شبیه‌سازی مخزن

شبیه‌سازی مخزن توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس با توجه به مشخصات موجود در جداول ۱ تا ۳ انجام شده و بارگذاری مخزن به صورت مونوتونیک در محدوده یک مگاپاسکال تا ۱۰ مگاپاسکال در بازه زمانی ۱۰ ثانیه با نرخ افزایش ۱۰ مگاپاسکال در هر دقیقه اعمال شده است. سپس فشار به شکل معکوس تخلیه می‌گردد (شکل ۲).



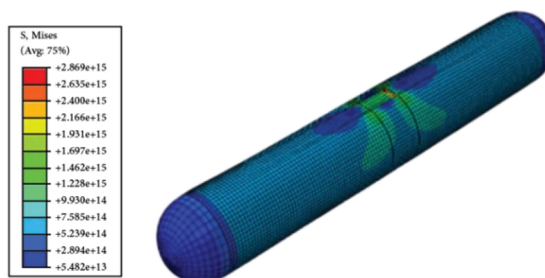
شکل ۲ فشار مونوتونیک موجود در مخزن

به علت کوچک بودن نسبت ضخامت به شعاع، تئوری حاکم بر سازه، تئوری مخازن جدار نازک خواهد بود. اتصال لایه کامپوزیتی و فیلر با مخزن به صورت قید tie اعمال شده است. همچنین ترک موجود در نقص به شکل طولی و اندازه ۳۸/۵ میلی‌متر و روش contour integral مدل‌سازی شده است که با توجه به وجود ترک و نقص در کنار هم، میزان تنش و جابجایی قابل توجهی در ناحیه نقص انتظار می‌رود.

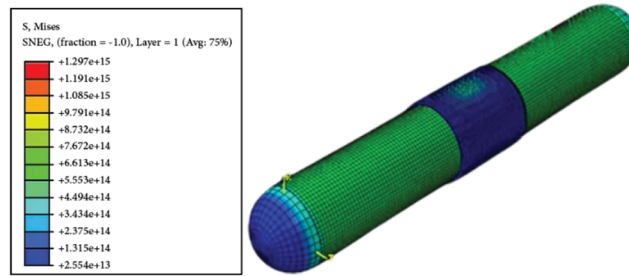
المان‌ها به منظور تحلیل هم‌گرایی با تعداد ۱۹۳۷۵، ۲۰۱۴۱ و ۲۷۸۴۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج، برای تعداد المان‌ها ۲۰۱۴۱ همگرایی مناسبی حاصل شد.

### ۴- نتایج و بحث

شکل ۳ و ۴ نتایج توزیع تنش در مخزن در دو حالت عادی و تعمیر شده با الیاف کامپوزیتی را نشان می‌دهد. توزیع تنش در حالت تعمیر شده با کامپوزیت نسبت به حالت عادی، بهبود یافته است و وجود فیلر و لایه پیچی الیاف کامپوزیتی حول محل آسیب و اطراف نقص مانع از تغییر شکل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین تنش ایجاد شده در مخزن در حالت‌های بدون لایه پیچی الیاف و با لایه پیچی الیاف به ترتیب  $2.869 \times 10^{15}$  و  $1.297 \times 10^{15}$  است. به عبارت دیگر، مقدار بیشینه تنش به میزان ۵۴/۸ درصد کاهش یافته است.

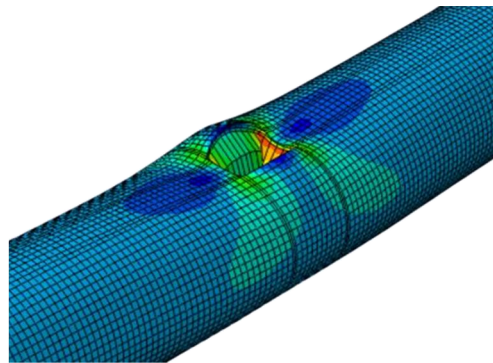


شکل ۳ توزیع تنش در مخزن در حالت عادی برای فشار بیشینه



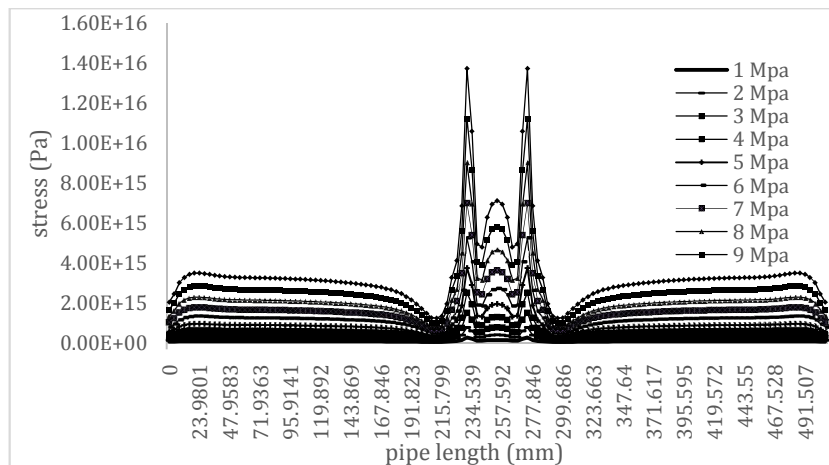
شکل ۴ توزیع تنش در مخزن در حالت تعمیر شده با کامپوزیت برای فشار بیشینه

شکل ۵ رفتار مخزن را در محل نقص نمایش می‌دهد. فرورفتگی مخزن در قسمت نقص به علت اعمال فشار روغن در دو سر مخزن بر روی سطح کمتر است که از طرفین باعث کشش بیشتر می‌گردد. با وجود اینکه فشار روغن به همان میزان بر روی سطح جانبی اعمال می‌گردد اما برخلاف تصور مرسوم که حاکی از انفجار و برآمدگی ترک و نقص است، در این حالت وجود درپوش‌ها در دو سر مخزن، برخلاف سایر لوله‌هایی که از دو سر آزاد می‌باشند، باعث ایجاد فرورفتگی در محل ترک در محل نقص می‌گردد.



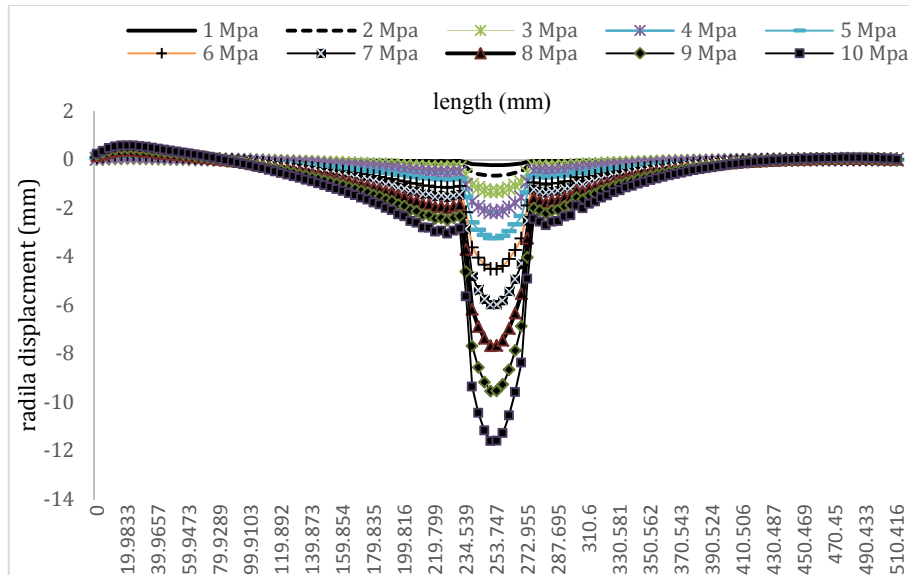
شکل ۵ فرورفتگی بزرگنمایی شده مخزن در محل نقص

شکل ۶ توزیع تنش فون میسز در راستای طولی مخزن را برای نقص و ترک موجود به ازای بارگذاری یک الی ۱۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش در محل نقص به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش تنش در لبه‌ها به طور چشمگیری رخ داده و در فشارهای بالا می‌تواند خطرناک باشد. لذا تقویت محل آسیب امری ضروری برای جلوگیری از خطرات ناشی از بارگذاری است.



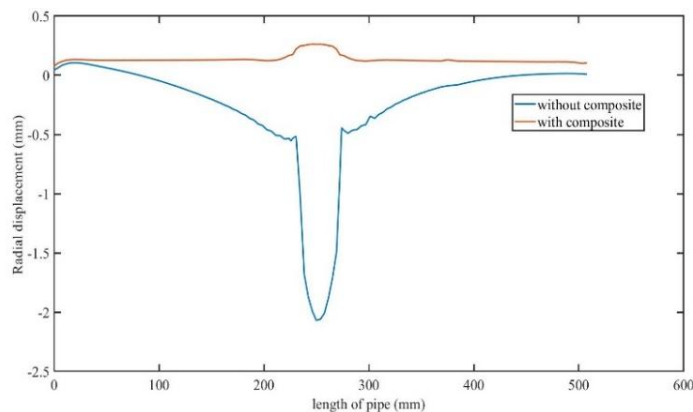
شکل ۶ نمودار توزیع تنش فون میسز در راستای طول مخزن دارای ترک

نمودار شکل ۷ میزان جابجایی نقص در اطراف ترک در راستای شعاعی را نشان می‌دهد. نمودار نشان دهنده این مسئله است که با افزایش فشار میزان فرورفتگی مخزن با وجود ترک، افزایش می‌یابد. این فرورفتگی در فشارهای بیشتر بسیار قابل توجه بوده و لزوم استفاده از تقویت کننده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بیشترین میزان فرورفتگی در مرکز محل آسیب است که دلیل آن وجود ترک در این ناحیه می‌باشد.

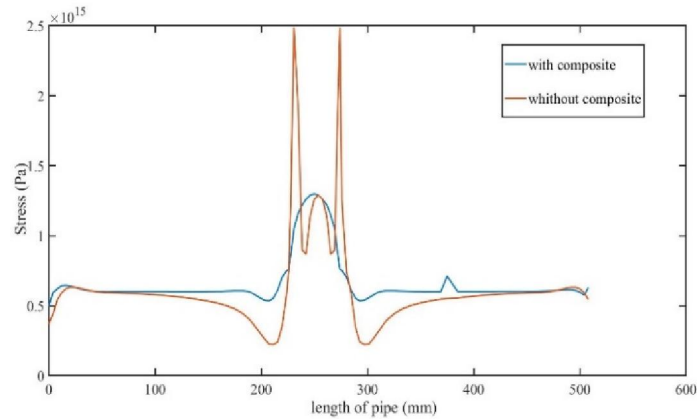


شکل ۷ نمودار جابجایی شعاعی در راستای طول مخزن دارای ترک

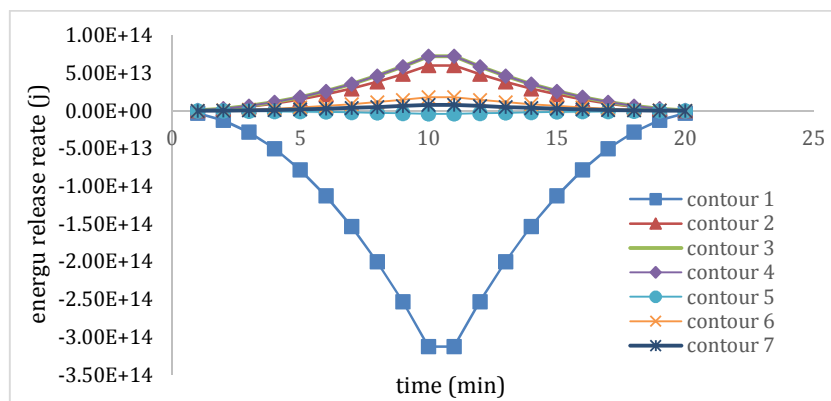
شکل ۸ و ۹ نمودار میزان تنش فون میسز و جابجایی شعاعی را برای فشار بیشینه ۱۰ مگاپاسکال برای دو حالت عادی و تعمیر شده با الیاف شیشه را مقایسه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، با ترمیم ناحیه آسیب دیده توسط الیاف کامپوزیتی، مقدار جابجایی و تنش به طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند. همچنین تمرکز تنش در لبه‌ها نیز به مقدار زیادی کاهش یافته و توزیع تنش نسبت به حالت آسیب‌دیده هموارتر شده است. نکته قابل توجه در این نمودار مثبت شدن مقادیر تنش در حالت ترمیم شده است. در حالت ترمیم نشده، جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف ترک به صورت فشاری هستند که این مورد ناشی از شرایط مرزی آزاد در اطراف ترک است و می‌تواند نتایج نامطلوبی، مانند افزایش تنش و افزایش جابجایی را به همراه داشته باشد. در حالی که در نمونه ترمیم شده با استفاده از کامپوزیت، جابجایی‌های ایجاد شده به صورت کششی بوده و تغییرات تنش به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین توزیع تنش در راستای طول مخزن برای حالت‌های ترمیم نشده و ترمیم شده نشان می‌دهد که استفاده از الیاف کامپوزیتی تاثیر محسوسی در کاهش تمرکز تنش در اطراف محل آسیب دارد.



شکل ۸ مقایسه جابجایی در راستای شعاعی برای دو حالت عادی و تعمیر شده با کامپوزیت در فشار بیشینه

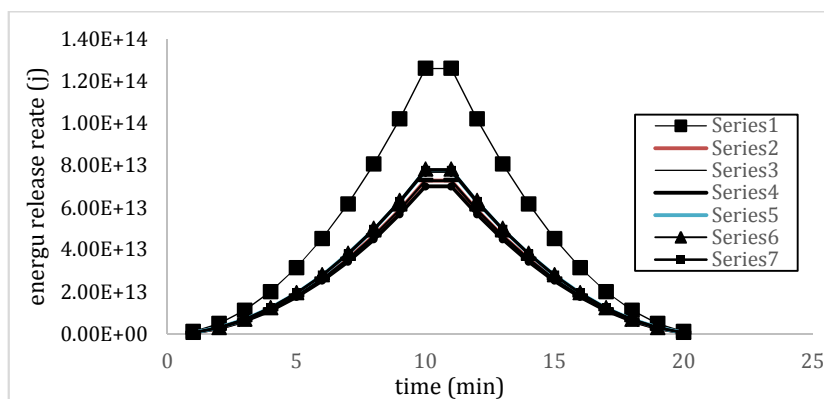


شکل ۹ مقایسه تنش فون مایسز در طول مخزن برای دو حالت عادی و تعمیر شده با کامپوزیت در فشار بیشینه



شکل ۱۰ نرخ آزادسازی انرژی در مخزن عادی

در شکل ۱۰ و ۱۱ نرخ آزادسازی انرژی برای مدت زمان ۲۰ دقیقه از آزمایش برای ۷ کانتور در ناحیه ترک در دو مخزن عادی و تعمیر شده با الیاف کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی کانتور اول نشان می‌دهد که برخلاف رفتار مرسوم ترک داخل خطوط لوله که منجر به انفجار می‌گردد، مقدار انرژی به شکل منفی بوده و عملاً قطعه مورد نظر به دلیل وجود درپوش دچار فرورفتگی می‌شود و ترک در راستای طولی دچار گسترش نخواهد شد. وجود ترک در نقص خوردگی در مخازن با درپوش برخلاف روال مرسوم در لوله‌ها موجب فرورفتگی در آنها خواهد شد؛ اما استفاده از الیاف کامپوزیتی و روش‌های تعمیر باعث کاهش سطح تنش در محل نقص و جلوگیری از گسترش ترک و افزایش مدت زمان استفاده از مخزن تحت بارهای متناوب خواهد شد.



شکل ۱۱ نرخ آزادسازی انرژی در مخزن تعمیر شده

## ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش برای نخستین بار به بررسی رفتار ترک طولی در مخازن درپوش دار و مقایسه میزان تنش و تغییر شکل نقص و رشد ترک موجود در آن در حالت عادی و تعمیر شده با الیاف کامپوزیتی پرداخته شد. افزایش فشار در مخزن با نرخ ۱۰ مگاپاسکال در هر دقیقه انجام شده و تا مقدار ۱۰۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که تنش‌های ایجاد شده در اطراف ترک به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و می‌تواند موجب بروز مشکلات ناشی از تمرکز تنش شود. مشاهده شد که استفاده از الیاف کامپوزیتی برای تعمیر محل آسیب در مخزن، مقادیر تنش و جابجایی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. به طوری که مقادیر بیشینه تنش به میزان ۵۴/۸ درصد کاهش یافته‌اند. همچنین به دلیل وجود ترک در محل آسیب، در این محدوده فرورفتگی مخزن مشاهده شد که دلیل آن شرایط مرزی آزاد اطراف ترک است. ترمیم محل آسیب دیده با استفاده از الیاف کامپوزیتی مانع بروز چنین پدیده‌ای شده و فرورفتگی در اطراف محل ترک به طور کامل برطرف شد. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد زیر از این تحقیق نتیجه‌گیری شده است:

- ۱- مقدار تنش‌های ایجاد شده در اطراف محل نقص نشان می‌دهند که تمرکز تنش بسیار بالایی در این ناحیه ایجاد می‌شود. تعمیر این ناحیه با استفاده از الیاف کامپوزیتی تاثیر محسوسی در کاهش سطح تنش‌های ایجاد شده دارد.
- ۲- مشاهده شد که در اطراف ترک، با افزایش فشار، فرورفتگی ایجاد می‌شود. استفاده از الیاف کامپوزیتی برای ترمیم ناحیه آسیب دیده، این مشکل را به طور کامل برطرف کرده و از فرورفتگی این ناحیه جلوگیری می‌کند.
- ۳- استفاده از الیاف کامپوزیتی برای تعمیر مخزن می‌تواند سطح تنش ایجاد شده در این ناحیه را به میزان ۵۴/۸ درصد کاهش دهد.

## فهرست علائم

A	مساحت، $m^2$
E	مدول الاستیسیته، $N/m^2$
G	مدول برشی، $N/m^2$
W	عرض نقص، mm
L	طول نقص، mm
D	قطر لوله، mm
T	ضخامت لوله، mm
ts	ضخامت باقی مانده، mm
trepair	ضخامت کامپوزیت برای تعمیر، mm
twarp	ضخامت هر لایه کامپوزیت، mm
H	ضخامت خوردگی، mm
pf	فشار سیال، Pa
L	طول لوله، mm
Nwarp	تعداد لایه‌ها
K	طول ترک، mm
sa	استحکام تسلیم فولاد، $N/m^2$
sc	استحکام کامپوزیت، $N/m^2$

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
u	ضریب پواسون
$\beta$	درصد خوردگی



## References

- [1] Saeed N, Ronagh H, and Virk A. Composite repair of pipelines, considering the effect of live pressure-analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2. *Composites Part B: Engineering*; 2014;58: 605-610. doi: [10.1016/j.compositesb.2013.10.035](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.035)
- [2] Vaziri A. and Estekanchi H. Buckling of cracked cylindrical thin shells under combined internal pressure and axial compression. *Thin-Walled Structures*; 2006; 44(2): 141-151. doi: [10.1016/j.tws.2006.02.004](https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.02.004)
- [3] Zecheru G. Methods for determining the remaining strength factor of pipelines with volumetric surface defects. *Rev Chim*; 2015.; 66: 710-717.
- [4] Cai J, Jiang X, and Lodewijks G. Residual ultimate strength of offshore metallic pipelines with structural damage a literature review. *Ships and Offshore Structures*; 2017;12(8):1037-1055. doi: [10.1080/17445302.2017.1308214](https://doi.org/10.1080/17445302.2017.1308214)
- [5] Bjørnøy O, Sigurdsson G, and Cramer E. Residual strength of corroded pipelines, DNV test results. Paper presented at the tenth international offshore and polar engineering conference; Seattle; Washington; USA; May 2000. ISOPE-I-00-140
- [6] Abeele F, Galvan B, Ramose P, and Muylle J. Numerical simulation of the interference between trawl gear and offshore pipelines. in proceedings of the sixth international pipeline technology conference; Ostend: Lab. Soete and tiratsoo technical; Clarion teechnical conferences the european pipline research group; 2013.
- [7] Ghaednia H, Sreekanta D, Rick W, Richard K. Safe burst strength of a pipeline with dent-crack defect: effect of crack depth and operating pressure. *Engineering Failure Analysis*; 2015; 55: 288-299. doi: [10.1016/j.engfailanal.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.06.005)
- [8] Karamanos S, and K Andreadakis. Denting of internally pressurized tubes under lateral loads. *International Journal of Mechanical Sciences*; 2006; 48(10): 1080-1094. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2006.03.018](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.03.018)
- [9] Lavigne O, Gamboa E, Castin W, Law M, Luzin V, Linton V. Microstructural and mechanical factors influencing high pH stress corrosion cracking susceptibility of low carbon line pipe steel. *Engineering Failure Analysis*; 2014; 45: 283-291. doi: [10.1016/j.engfailanal.2014.07.011](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.011)
- [10] Smiderle J, Juan Manuel P, Sérgio T. Premature failure of superduplex stainless steel pipe by pitting in sea water environment. *Engineering Failure Analysis*; 2014;46: 134-139. doi: [10.1016/j.engfailanal.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.001)
- [11] Abtahi A, and Rahimi M. Analytical and numerical investigation of defective metal reservoirs using composite layering. In: Proceedings of the 29th International Congress of the Iranian Society of Mechanical Engineers and the 8th Symposium on the Industry of Thermal Power Plants. 1400. ISME: Khajeh Nasir Toosi University of Technology; Tehran; Iran.
- [12] Piping A, API 5L seamless & welded pipe, A.P.P. stock, Editor. 2015, American Piping: UNITED STATES.
- [13] Stress Engineering Services, I., ASME PCC-2 & ISO 24817 Certification Document Armor Plate 360 ZED Repair System. 2017, 13800 Westfair East Drive: Houston, Texas. doi: [10.1115/IPC2020-9571](https://doi.org/10.1115/IPC2020-9571)
- [14] Lim K, Azraai S, Yahaya N, Noor N, Zardasti L, Kim J. Behaviour of steel pipelines with composite repairs analysed using experimental and numerical approaches. *Thin-Walled Structures*; 2019; 139: 321-333. doi: [10.1016/j.tws.2019.03.023](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.023)