

ارزیابی یکپارچگی لوله‌های گاز تعمیر شده با لایه‌های کامپوزیتی به کمک هیدروتست و آنالیز المان محدود

هانیه بازیار*^۱ و سیروس جوادپور^۲

چکیده

مدیریت طول عمر خطوط لوله گاز تعمیر شده با پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP)، بویژه در زمانی که احتمال نشتی وجود دارد، یک پارامتر مهم فنی-اقتصادی در سامانه تعمیر است. در این پژوهش، آزمون انفجار انجام شده روی خطوط لوله انتقال گاز تعمیر شده با FRP مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف، بررسی سامانه تعمیری خارجی بر یکپارچگی خطوط لوله با استفاده از شواهد آزمایشگاهی است. هیدروتست روی مقاطع یک متری از لوله‌های تعمیر شده که دارای یک سوراخ راه به در در موقعیت ساعت ۶ بودند، انجام گرفت. طراحی سامانه تعمیری بر اساس استاندارد ISO-24817 انجام گرفت و هیدروتست انجام شده نیز با نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده از آزمایش، نشان دهنده توانایی لوله تعمیر شده در تحمل فشارهایی بیش‌تر از ۱/۵ برابر فشار طراحی خط لوله است. این نتایج به همراه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، کاربرد پذیر بودن این گونه از سامانه‌های تعمیری را برای خطوط لوله انتقال گاز (حتی در بدترین شرایط) نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سامانه تعمیری کامپوزیتی، هیدروتست، آنالیز المان محدود، عیوب ساختگی

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۲ - دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی

*- نویسنده مسئول مقاله: hanie_baziar@yahoo.com

پیشگفتار

خطوط لوله زیرزمینی مانند لوله‌های انتقال آب، فاضلاب، گاز و ... در سراسر جهان ساخته شده و با افزایش استانداردهای زندگی و صنعتی شدن، روند رو به رشدی را از خود نشان داده‌اند [۱]. بتون و فولاد به عنوان متداول‌ترین مواد سنتی مورد استفاده در ساخت خطوط لوله، به شدت تحت تأثیر عوامل خورنده محیطی موجود در خاک یا آب قرار دارند و دچار تخریب یا خوردگی و در نتیجه، ایجاد نقص اساسی در لوله‌ها می‌شوند. نشت ناخواسته مواد به هر یک از دلایل بالا می‌تواند اثراتی جبران‌ناپذیر بر محیط زیست و اقتصاد آن منطقه داشته باشد. نفوذ پساب‌های صنعتی (فاضلاب یا نفت) باعث آلودگی خاک و زمین‌های اطراف می‌شود و در صورت نفوذ این مواد به منابع تأمین آب آن منطقه، می‌تواند باعث اختلال در زندگی روزمره یک جامعه شود. ایجاد انفجار ناشی از نشت گاز نیز از دیگر خطرات احتمالی فرسوده شدن و تخریب خطوط لوله است. هر یک از این مشکلات می‌تواند باعث ایجاد یک فاجعه بزرگ شود، از این‌رو، بازسازی و تعمیر خطوط لوله در مقیاس بزرگ و در کوتاه‌ترین زمان ممکن از نظر اقتصادی، فنی و زیست محیطی اهمیتی بسیار دارد [۲]. بتازگی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف به عنوان روش تعمیری جایگزین استفاده می‌شود. افزون بر کاهش هزینه، از جمله مزایای قابل توجه این روش نسبت به روش‌های سنتی جوشکاری می‌توان به موارد روبه‌رو اشاره کرد: (۱) اعمال تعمیر در مدت زمان کوتاه، (۲) نیاز نداشتن به قطع جریان سیال در حین تعمیر، (۳) کاهش احتمال انفجار به دلیل استفاده نکردن از جوشکاری و برشکاری [۳]. بر اساس آنالیزهای صنعتی انجام شده، سامانه‌های تعمیری کامپوزیتی به طور میانگین، ۲۴ درصد ارزان‌تر از جوش دادن غلاف‌های فلزی و ۷۳ درصد ارزان‌تر از جایگزین کردن قسمت آسیب دیده با خط لوله جدید است [۴]. آزمایش انفجار هیدروستاتیکی ساکن^۳ به منظور تأیید پیوستگی خط لوله، ارزیابی نوع جدیدی از فولاد و یا روش تعمیری جدید بکار می‌رود [۵]. آزمون انفجار هیدروستاتیکی انجام گرفته به وسیله فریر و همکاران

نشان داد که این‌گونه تعمیرات می‌تواند به عنوان تعمیر دائم برای عیوبی مانند خوردگی خارجی استفاده شود [۶]. پژوهش‌های بسیاری نیز در رابطه با آنالیز و مدل‌سازی لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به طراحی و شبیه‌سازی کامپوزیت‌های لایه‌ای با ویژگی‌های ناهمسان‌گرد اشاره کرد [۷]. در این پژوهش به منظور ارزیابی این‌گونه تعمیرات برای عیوب راه به در، روی لوله با حفره ساختگی در موقعیت ساعت ۶ که با لایه‌های کامپوزیتی تعمیر شده بود، هیدروتست انجام گرفت. طراحی تعمیر بر اساس استاندارد ISO-TS 24817 انجام گرفت و هیدروتست انجام شده به گونه کامل با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.11 شبیه‌سازی شد. ویژگی‌های لایه‌های کامپوزیتی در شبیه‌سازی اورتوتروپیک^۴ در نظر گرفته شد که نتایج آن با نتایج بدست آمده از آزمایش هم‌خوانی داشت. افزون بر این، تأثیر لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی در کاهش فاکتورهای تمرکز تنش و کرنش حفره ایجاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

هیدروتست

در این پژوهش به منظور انجام آزمایش انفجار روی لوله‌های تعمیر شده با استفاده از کامپوزیت از استاندارد ASTM D1599 استفاده شد. بر این اساس، مقاطع یک متری از لوله انتقال گاز Grade B, API 5L با طول ۶ متر، قطر خارجی ۲۱۹٫۰۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۷٫۰۴ میلی‌متر جدا و سپس حفره‌هایی با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر در موقعیت ساعت ۶ در مرکز آن‌ها ایجاد شد. پیش از لایه‌زنی دستی روی این مقطع، طراحی تعمیر بر اساس استاندارد ISO-24817 انجام گرفت. این طراحی شامل تعیین نوع مواد مورد استفاده، طول تعمیر و تخمین تعداد لایه‌های کامپوزیتی مورد استفاده مطابق با نوع عیب موجود در لوله است. بر اساس کار پیشین انجام شده، برای آماده‌سازی سطح لوله‌های فولادی از روش سندبلاست استفاده شد و زبری سطح آن‌ها به زبری بهینه (۶۰ میکرومتر) رسید [۸]. برای بستن دو انتهای لوله نیز دو

³ -Static hydrostatic burst test

⁴ - Orthotropic

محاسبه شد که در هر دو طرف به ترتیب به طول ۱۵، ۲۰ و ۳۵ میلی‌متر به صورت شیب‌دار^۶ ساخته شد.

(۱)

$$l_{over} = 4d \quad \text{if } d < 0.5\sqrt{Dt} \quad (a)$$

$$l_{over} = 2\sqrt{Dt} \quad (b)$$

$$l = 2l_{over} + l_{defect} + 2l_{taper} \quad (۲)$$

در این روابط، d قطر عیب، D قطر لوله و t ضخامت لوله است. برای قطرهای ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، رابطه ۱ قسمت a برقرار است، اما برای قطر ۲۵ میلی‌متر باید از قسمت b استفاده کرد.

برای محاسبه طول ناحیه تعمیراتی برای عیوب راه به در، از رابطه ۳ استفاده شد:

(۳)

$$p = f_{T2} f_{leak} \sqrt{\left\{ \frac{0.001 \gamma_{LCL}}{\frac{(1-\nu^2)}{E_{ac}} \left\{ \frac{3}{512 t_{min}^3} d^4 + \frac{1}{\pi} d \right\} + \frac{3}{64 G t_{min}} d^2} \right\}}$$

در این رابطه، E_{ac} مدول کششی ترکیبی ($\sqrt{E_a E_c}$) بر حسب مگاپاسکال، G مدول برشی لایه تعمیراتی بر حسب مگاپاسکال، p فشار داخلی طراحی بر حسب مگاپاسکال، ν ضریب پواسون لایه تعمیراتی، d قطر عیب بر حسب میلی‌متر، t_{min} ضخامت لایه تعمیراتی بر حسب میلی‌متر و γ_{LCL} ۹۵ درصد از حد اعتماد پایینی برای نرخ رهایی انرژی بر حسب ژول بر متر مربع است. f_{T2} و f_{leak} نیز پارامترهایی هستند که با توجه به شرایط کاری خط لوله از استاندارد به دست می‌آیند.

پارامتر مجهول دیگر افزون بر ضخامت لایه‌های تعمیراتی، γ_{LCL} است که برای محاسبه آن آزمایشی بر اساس پیوست D استاندارد ISO TS-24817 انجام گرفت. بر اساس محاسبه پیچیده مربوط به آزمایش انجام شده، در نهایت، این پارامتر برابر با ۴۶/۱۷ ژول بر متر مربع به دست آمد. پس از محاسبه γ_{LCL} ، ضخامت لایه تعمیراتی برای قطرهای یاد شده به ترتیب برابر با ۱۲، ۱۶ و

صفحه فولادی با ضخامت ۲۶ میلی‌متر در آن نواحی جوش داده شد که روی یکی از آن‌ها دو قلاویز ۱۲/۵ میلی‌متری برای اتصال شلنگ‌های ورود آب و خروج هوا ایجاد شده بود. شکل ۱ قسمت (الف) یکی از لوله‌های آماده شده با قطر حفره ۱۵ میلی‌متر، قسمت (ب) چگونگی قرارگیری لوله لایه‌زنی شده برای هیدروتست و قسمت (ج) نمونه را پس از واماندگی نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش نیز در جدول ۱ آمده است.

طراحی تعمیر

همان‌گونه که اشاره شد، این طراحی بر اساس استاندارد ISO-24817 صورت گرفت. بر اساس این استاندارد به منظور تعیین مواد مورد استفاده در تعمیر، آزمایش‌های گوناگونی بر اساس استانداردهای مربوطه بر روی رزین، الیاف، لمینت‌های کامپوزیتی، چسب و لوله تعمیر شده انجام گرفت. با استناد به نتایج این آزمایش‌ها در نهایت، از رزین وینیل استر، چسب اپوکسی بر پایه بیسفنول A، نانو ذرات ۱۲ نانومتری SiO_2 به همراه چسب اپوکسی جهت ساخت بتونه، پارچه‌های ۲ بعدی از الیاف شیشه (E glass) به عرض ۵ سانتی‌متر و جهت-گیری ۰ و ۹۰ درجه، و پارچه سوزنی (CSM^۵) استفاده شد. به منظور انتخاب مناسب‌ترین نوع از پارچه شیشه‌ای، تعیین راستایی که بیش‌ترین تنش در سامانه وارد می‌شود، ضروری است. با توجه به این نکته که در لوله بیش‌ترین تنش در راستای محیطی وارد می‌شود؛ بنابراین، از الیاف دو بعدی نواری شکل با جهت‌گیری ۰ و ۹۰ درجه، استفاده شد به گونه‌ای که الیاف پیوسته در راستای محیطی و الیاف برش خورده در راستای محوری قرار گرفت. پارچه سوزنی نیز تنها به منظور افزایش مقاومت شیمیایی استفاده شد و نقش زیادی در افزایش استحکام ندارد. طول ناحیه تعمیراتی بر اساس استاندارد ISO-24817 و با توجه به نوع عیب موجود در لوله با استفاده از رابطه ۱ و ۲ به ترتیب برای حفره‌هایی با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر، برابر با ۱۳۰، ۱۷۵ و ۲۵۰ میلی‌متر

^۶- Tapered

^۵- Chopped strand mat

راستای عرضی) در نظر گرفته شد. برخی از خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی از آزمایش مستقیم و برخی نیز با استفاده از رویکرد الاستیسیته در تخمین خواص لمینا [۹] به دست آمدند.

به منظور بررسی صحیح بودن مدل‌سازی انجام شده برای لوله، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با روابط ارائه شده به وسیله Lotsberg، در تئوری موسوم به تئوری پوسته، مقایسه شد [۱۰]. به این منظور، تنش و کرنش ناشی از آنالیز و محاسبات تحلیلی در هر دو راستای محیطی و محوری با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۳ مقایسه تنش محیطی و محوری را برای حفره‌ای به قطر ۱۵ میلی‌متر برای ۵ مدل گوناگون نشان می‌دهد (در این مدل‌ها فشار از 10bar تا 150bar افزایش یافته است). با توجه به این شکل، تنش‌های محیطی در ۵ مدل انجام شده تطابق خوبی با محاسبات تحلیلی دارد که اختلاف میانگین بین این دو مقدار برابر با ۲٫۰۵ درصد است. اختلاف میانگین تنش‌های محوری در مدل‌سازی انجام شده و محاسبات تحلیلی برابر با ۸٫۵۵ درصد است. برای کرنش نیز نمودار و نتایج مشابهی به دست آمد که در هر دو مورد تطابق خوبی مشاهده می‌شود.

شکل ۴ هیدروتست مدل شده با قطر حفره ۱۵ میلی‌متر و شکل ۵ چگونگی توزیع کرنش محیطی را برای لوله بدون تعمیر و لوله تعمیر شده نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج فاکتور تمرکز کرنش را در راستای محیطی در لوله بدون تعمیر و لوله دارای تعمیر در فشار ثابت 50bar نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز تغییرات فاکتور تمرکز تنش و کرنش محیطی را برای لوله بدون تعمیر و لوله دارای تعمیر نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

بر اساس استاندارد ASME B31.8، معیار پذیرش هیدروتست لوله تعمیر شده، توانایی تحمل فشاری برابر با ۱٫۵ برابر فشار طراحی خط لوله است. با استناد به نتایج هیدروتست (جدول ۱) با افزایش قطر حفره، فشار واماندگی کاهش می‌یابد؛ اما کلیه فشارهای واماندگی بیش‌تر از ۱٫۵ برابر فشار طراحی خط لوله است و بنابراین، آزمون‌های انجام شده مورد پذیرش هستند. در

۱۸ میلی‌متر به دست آمد. فشار طراحی نیز بر اساس استاندارد ASME B31.8 برابر با 77.5 bar بدست آمد. گفتنی است که برای به دست آوردن خواص مکانیکی لایه‌های تعمیراتی (مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون)، آزمایش کشش محوری و محیطی روی این لایه‌ها انجام گرفت.

انجام لایه‌زنی روی لوله

پس از آماده شدن لوله، لایه‌زنی دستی با استفاده از مواد انتخاب شده انجام گرفت که به این منظور، ابتدا سوراخ مورد نظر با بتونه که شامل چسب اپوکسی، نانوذرات SiO_2 و کاتالیست بود، پر شد سپس چسب اپوکسی که در حدود ۷ سی‌سی کاتالیست به آن اضافه شده بود، به ضخامت ۲٫۵ میلی‌متر روی لوله اعمال گردید. پس از پخت چسب، ۳ لایه الیاف سوزنی با استفاده از لایه‌گذاری دستی اعمال شد. پس از آن پارچه شیشه‌ای دو بعدی با عرض ۵۰ میلی‌متر، دور لوله پیچیده شد تا به ضخامت مدنظر رسید. شکل ۲ مراحل گوناگون لایه‌زنی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی هیدروتست انجام شده با نرم‌افزار ABAQUS

به منظور بررسی تأثیر لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی بر کاهش فاکتور تمرکز تنش و کرنش اطراف حفره، هر کدام از هیدروتست‌های انجام شده شبیه‌سازی شد (باتوجه به مشابه بودن نتایج برای حفره‌هایی با قطرهای متفاوت، در این‌جا تنها به ذکر آنالیز مربوط به حفره ۱۵ میلی‌متری بسنده شده است). بخش‌های گوناگون از جمله لوله، بتونه، چسب، سه لایه پارچه سوزنی و لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی بطور جداگانه مدل شدند. برای لوله فولادی، بتونه، چسب و لایه کامپوزیتی با پارچه سوزنی از المان جامد خطی C3D8R با ۸ گره استفاده شد؛ در صورتی که المان مورد استفاده برای لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی، المان پوسته‌ای معمولی مستطیلی S8R با ۸ گره بود. خواص لایه‌های کامپوزیتی با پارچه سوزنی به صورت همسان‌گرد و لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی به صورت اورتوتروپیک (به معنی همسان‌گرد بودن خواص در

نتیجه‌گیری

نتایج هیدروتست انجام‌شده در مورد لوله تعمیر شده با لایه‌های کامپوزیتی، در شرایطی که سوراخ کامل در در لوله وجود دارد، نشان‌دهنده قابل کاربرد بودن این روش تعمیری نوین برای تعمیر و تقویت خطوط لوله انتقال گاز، حتی در بدترین شرایط است. افزون بر این، مقایسه نتایج بدست آمده از این آزمون برای این روش تعمیری و روش‌های تعمیری دیگر (مانند جوشکاری یا استفاده از چسب اپوکسی)، برتری این روش را نشان می‌دهد. از جمله مزایای این‌گونه تعمیرات برای بدترین شرایط خط لوله (وجود عیب راه به در) کاهش قابل ملاحظه فاکتورهای تمرکز تنش و کرنش در هر دو راستای محیطی و محوری است که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی بیانگر این مطلب بود. روی هم رفته، نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داد که انجام تعمیرات کامپوزیتی در بحرانی‌ترین شرایط خط لوله، یکپارچگی آن را حفظ کرده و لوله تعمیر شده در این شرایط عمل‌کردی مناسب را از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین، در مقایسه با روش‌های تعمیراتی دیگر، تعمیرات کامپوزیتی با استفاده از کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) در شرایط گوناگون قابل استفاده بوده و کاملاً ایمن هستند.

پژوهش‌های انجام گرفته در مورد تعمیرات گوناگون از قبیل جوشکاری و غلاف‌های فلزی به شکل مستطیل یا دایره‌ای و انجام آزمون انفجار هیدروستاتیکی ساکن بر آن‌ها، از هم گسیختگی در این تعمیرات با به تسلیم رسیدن خود لوله مشاهده شد [۱۱]. در پژوهشی دیگر نیز این آزمایش روی لوله سوراخ شده که با اپوکسی تعمیر شده بود، انجام شد که با توجه به تأثیر بسیار زیاد دما بر این نوع تعمیرات، افزایش بسیار اندک دما باعث ایجاد تغییرات بسیار زیادی در فشار اعمالی به سامانه شد؛ بنابراین، پیش از این‌که خود لوله به تسلیم برسد، نشی از اطراف تعمیر مشاهده شد [۱۲].

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی (شکل ۶) نیز با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان داد، به این معنی که فاکتورهای تمرکز تنش و کرنش در هر دو راستای محوری و محیطی، با افزایش قطر حفره افزایش می‌یابد که باعث کاهش فشار و اماندگی می‌شود. افزون بر این، تأثیر لایه‌های تعمیراتی کامپوزیتی در کاهش فاکتورهای تمرکز تنش و کرنش نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۶) که به طور میانگین فاکتورهای تمرکز تنش و کرنش محیطی به ترتیب ۷/۵۶ و ۱۳/۱ درصد کاهش یافته است که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت تعمیرات کامپوزیتی در کاهش این دو فاکتور است. نکته جالب توجه دیگر در چگونگی توزیع کرنش است، همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع کرنش به گونه قابل ملاحظه‌ای در اطراف سوراخ تغییر کرده و یکنواخت‌تر می‌شود.

References

- 1- H. N. Yu, S. S. Kim, I. U. Hwang, D. G. Lee, "Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes", journal of composite structures, Elsevier, Vol. 86, pp. 285-290, 2008.
- 2- L. Van Den Einde, L. Zhao, F. Seible, "Use of FRP Composites in Civil Structural Application", Journal of Construction and Building Materials, Elsevier, Vol.17, 389-403, 2003.
- 3- J.M. Duell, J.M. Wilson, M.R. Kessler, "Analysis of a carbon composite overwrap

pipeline repair system", Journal of pressure vessel and piping, Elsevier, Vol. 85, pp. 782-788, 2008.

4- G.H. Koch, M.P. Brongers, N.G. Tompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer, "Corrosion Cost and Preventative Strategies in the United States", Federal Highway Administration, Office of Infrastructure research and development, pp. 260-311, 2001.

5- D. Quingquan, Zhang Hong, Yan Feng, Deng Changyi, "Hydrostatic burst test of X80 grade steel pipe", Journal of loss

prevention in the process industry, Elsevier, Vol. 22, pp. 897-900, 2009.

6- J.F.L. Freire, R.D. Vieira, J.L.C. Diniz, "Hydrostatic tests of pipelines with composite repairs", SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, pp. 1-4, 2002.

7- P. Nali, E. Carrera, "A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures", Composites: Part B, Vol. 43, pp. 280-289, 2012.

8- H. Bazyar, S. Karimi, A. Tashtzar, S. Javadpour, "Studying the steel pipes surface roughness on cathodic disbondment of FRP composite repairs", 4th Iranian pipe and pipeline conference, pp. 1-10, 2012.

9- R.D. Rawlings, , F.L Matheu's, "Composite materials, engineering and

science", first edition, Chapman & Hall, London, UK, 1994.

10- I. Lotsberg, "Stress concentration factors at welds in pipelines and tanks subjected to internal pressure and axial force", Journal of marine structures, Elsevier, Vol. 21, pp. 138-159, 2008.

11- P. Gabriel Fazzini, J. Luis Otegui, "Influence of old rectangular repair patches on the burst pressure of a gas pipeline", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier, Vol. 83, pp. 27-34, 2006.

12- H.S. da Costa Mattos, L.M. Paim, J.M.L. Reis, "Analysis of burst tests and long-term hydrostatic tests in produced water pipelines", Engineering Failure Analysis, Elsevier, Vol. 22, pp. 128-140, 2012.

پیوست‌ها



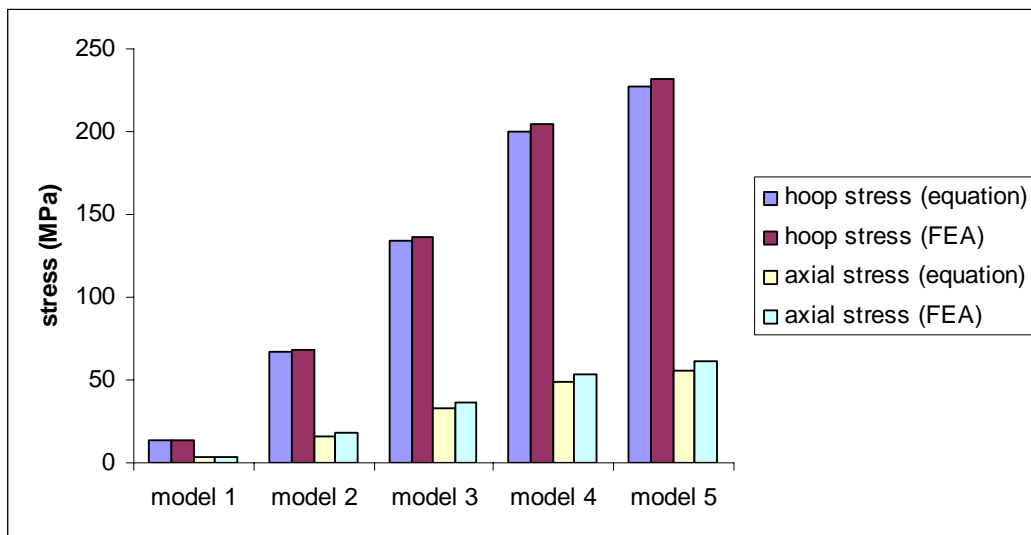
شکل ۱- (الف) لوله آماده شده برای هیدروتست، (ب) لوله لایه‌زنی شده و چگونگی قرارگیری آن برای هیدروتست، (ج) مشاهده نشتی پس از انجام هیدروتست روی نمونه



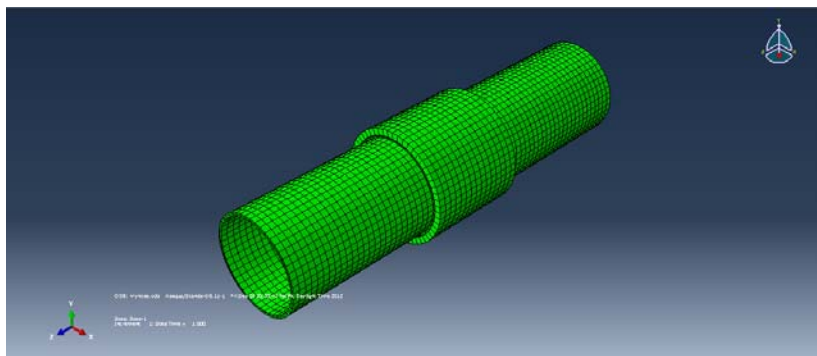
شکل ۲- مراحل گوناگون لایه‌زنی روی لوله، الف) چسب اپوکسی اعمال شده روی لوله پس از پخت و آماده‌سازی سطح، ب) الیاف سوزنی اعمال شده روی لوله، ج) اعمال پارچه سوزنی ۲ بعدی

جدول ۱- نتایج هیدروتست انجام‌شده در مورد نمونه لایه‌زنی شده با قطر حفره‌های متفاوت

فشار واماندگی (MPa)	ضخامت تعمیر (mm)	قطر حفره (mm)
۱۶۵	۱۲	۱۰
۱۵۵	۱۶	۱۵
۱۲۰	۱۸	۲۵



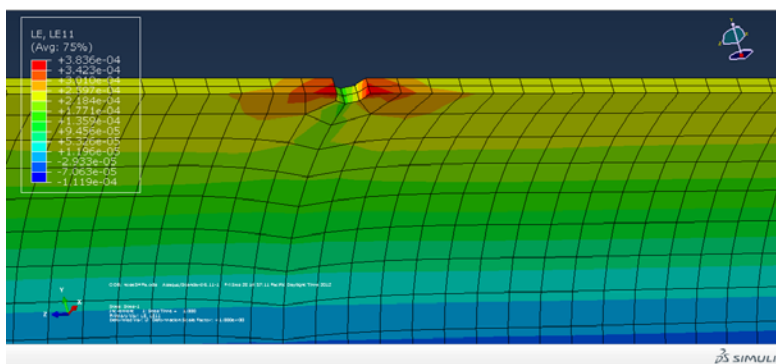
شکل ۳- مقایسه تنش محیطی و محوری در شبیه‌سازی انجام شده و محاسبات تحلیلی



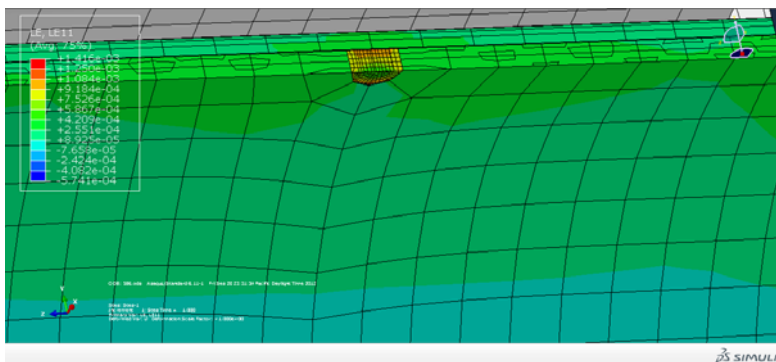
شکل ۴- هیدروتست مدل شده برای حفره‌ای به قطر ۱۵ میلی‌متر

جدول ۲- مقایسه فاکتور تمرکز کرنش در لوله دارای تعمیر و بدون آن در فشار 50 bar

قطر سوراخ (mm)	10	15	25
بیش‌ترین کرنش محیطی (بدون تعمیر)	4.87×10^{-4}	6.03×10^{-4}	6.77×10^{-4}
کرنش محیطی اسمی (بدون تعمیر)	1.36×10^{-4}	1.58×10^{-4}	1.68×10^{-4}
فاکتور تمرکز کرنش محیطی (بدون تعمیر)	3.58	3.82	4.03
بیش‌ترین کرنش محیطی (با تعمیر)	3.78×10^{-4}	5.87×10^{-4}	6.53×10^{-4}
کرنش محیطی اسمی (با تعمیر)	1.25×10^{-4}	1.87×10^{-4}	1.73×10^{-4}
فاکتور تمرکز کرنش محیطی (با تعمیر)	3.02	3.13	3.77

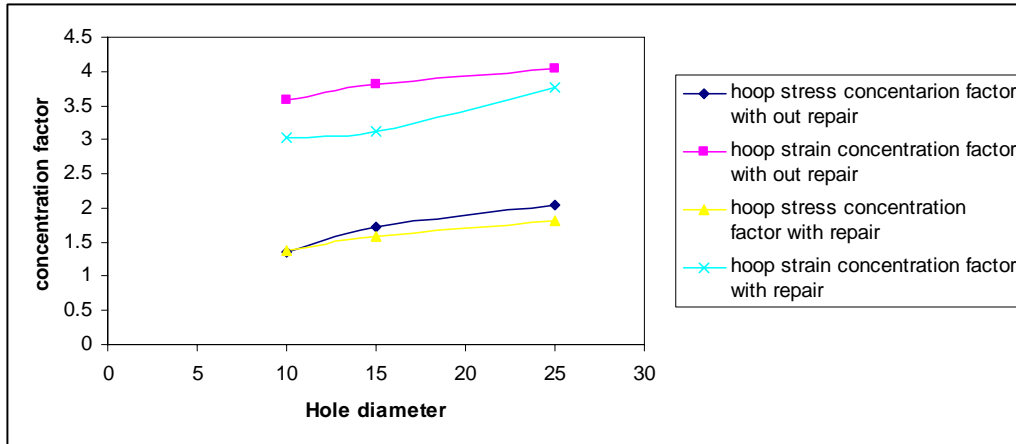


(الف)



(ب)

شکل ۵- مقایسه چگونگی توزیع کرنش محیطی در لوله بدون تعمیر و لوله تعمیر شده



شکل ۶- کاهش فاکتور تمرکز تنش و کرنش محیطی پس از انجام تعمیرات

