



## مطالعه تجربی مقاومت به فرورفتگی در لوله‌های خطوط انتقال آب آشامیدنی تعمیر شده با رزین پلی‌استر

سید صادق درخشان<sup>1</sup>، عباس نیک نژاد<sup>2\*</sup>، سیما ضیائی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

\* یاسوج، صندوق پستی 75914-353، [aniknejad@yu.ac.ir](mailto:aniknejad@yu.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق، فرایند فرورفتگی موضعی لوله‌های آسیب‌دیده خطوط انتقال آب آشامیدنی، که توسط رزین پلی‌استر تعمیر شده‌اند و در دو حالت مختلف، تحت فشار داخلی ثابت و فشار داخلی متغیر قرار دارند، به روش آزمایشگاهی بررسی می‌شود. بدین منظور، یک عیب مکانیکی در جداره لوله، ماشین‌کاری و سپس، بخش آسیب‌دیده لوله، توسط رزین پلی‌استر تعمیر می‌شود. در ادامه، جهت تزریق آب درون لوله و اعمال فشارهای مختلف در هر تست، لوله دو سر مسدود به یک مدار هیدرولیک از پیش طراحی شده، متصل می‌شود. سپس، نمونه تحت فشار داخلی مشخص، بصورت جانبی، درون دستگاه تست یونیورسال بین یک صفحه صلب تخت و یک سنبه استوانه‌ای قرار می‌گیرد. با اعمال نیروی جانبی بر جداره نمونه‌ها، تست فرورفتگی موضعی در شرایط شبه‌استاتیکی انجام می‌شود که تا زمان بروز اولین آثار نشستی در محل تعمیر شده لوله، ادامه می‌یابد. در یک نوع تست، فشار داخلی آب درون لوله، در حین انجام فرایند فرورفتگی موضعی ثابت نگهداشته می‌شود و در نوع دیگر، فشار آب درون لوله، در اثر فرورفتگی تدریجی جداره لوله، به تدریج افزایش می‌یابد. در هر تست، فشار داخلی اولیه، الگوی تغییرشکل نمونه، جابجایی نهایی سنبه، نیروی نهایی و میزان جذب انرژی جنبشی اندازه‌گیری می‌شود و در آزمایش‌های فشار متغیر، فشار نهایی نیز ثبت می‌شود. آزمایش‌های فشار متغیر نشان می‌دهند، با افزایش فشار داخلی اولیه، مقادیر جابجایی سنبه، بیشینه نیروی جانبی اعمالی و جذب انرژی جنبشی کاهش می‌یابد. در حالی که، در آزمایش‌های فشار ثابت، با افزایش فشار داخلی ثابت، مقادیر جابجایی نهایی، نیروی نهایی و جذب انرژی به ازای فشارهای کمتر از 14 بار، روند افزایشی و به ازای فشارهای بزرگتر از 14 بار، روند کاهشی را دنبال می‌کنند.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 2 دی 1397  
پذیرش: 15 اسفند 1397  
ارائه در سایت: آبان 1398

### کلیدواژگان:

تعمیر خطوط انتقال آب  
رزین پلی‌استر  
نشستی  
لوله آسیب دیده  
آب آشامیدنی

## Experimental study on the indentation resistance of water pipelines repaired by polyester resins

Sayed Sadegh Derakhshan, Abbas Niknejad\*, Sima Ziaee

Mechanical Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran.

\*P.O.B. 353-75914, Yasouj, Iran, [aniknejad@yu.ac.ir](mailto:aniknejad@yu.ac.ir)

### Article Information

Original Research Paper  
Received 23 December 2018  
Accepted 6 March 2019  
Available October 2019

### Keywords:

Water pipelines repair  
Polyester resin  
Leakage  
Damaged pipe  
Drinking water

### Abstract

In this article, indentation process of damaged drinking water pipelines, repaired by the polyester resin is experimentally investigated, while they are under two different conditions of constant and variable inner pressures. For this purpose, a mechanical defect is machined in the pipe wall, and then, the damaged part of the tube is repaired by the polyester resin. Then, to inject water into the tube and apply different pressures, a two-end blinded tube is connected to a hydraulic circuit. Then, the specimen with a certain inner pressure is placed into the universal testing machine, between a rigid platen and a cylindrical punch. By applying the lateral force on the specimen, indentation test is performed in quasi-static condition; and it continues, up to considering the first leakage effect in the repaired zone. In one type of the tests, inner pressure is kept in a constant value during the indentation progress; and in the other type, inner pressure increases, slowly, due to indenting the tube wall. In each test, initial pressure, sample deformation mode, ultimate displacement of the punch, ultimate force, and energy absorption are measured; and in the variable pressure tests, ultimate pressure is also recorded. The variable pressure experiments show that when initial pressure increases, ultimate displacement of the punch, ultimate force and energy absorption decrease; while, in the constant pressure experiments, by increasing the constant inner pressure up to 14 bar, ultimate displacement, ultimate force and absorbed energy increase; and then, in higher inner pressures, the mentioned parameters follow a decreasing trend.

Please cite this article using:

S. S. Derakhshan, A. Niknejad, S. Ziaee, Experimental study on the indentation resistance of water pipelines repaired by polyester resins, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 1-11, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

خطوط انتقال آب همواره در معرض انواع عوامل واماندگی و شکست، نظیر خوردگی، سوراخ شدگی، فرو رفتگی موضعی، پوسته شدن و ترک خوردگی هستند. از آنجا که این عوامل واماندگی، معمولاً به نشتی و هدر رفت آب منجر می‌شوند، تعویض یا ترمیم سریع و مناسب لوله‌های خطوط انتقال آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در روش سنتی، بخش آسیب دیده لوله، طی فرایند برشکاری از خط لوله جدا شده و سپس، لوله جدید، طی فرایند جوشکاری و یا با اتصالات جداولی مانند فلنج، در محل مورد نظر، نصب می‌شوند. روش جایگزینی که در چند دهه اخیر پیشنهاد شده است، ترمیم و تقویت لوله به کمک وصله کامپوزیتی است که در مقایسه با روش سنتی تعمیر، دارای مزایای ویژه [1] و نیز معایبی است. در برخی موارد، این عیوب یا عوامل واماندگی در بخشی از خطوط لوله انتقال آب اتفاق می‌افتد که امکان به کارگیری تجهیزات مورد نیاز ترمیم، مانند دستگاه برش و دستگاه جوش، دشوار است و برای فراهم نمودن امکان تعمیر بخش آسیب دیده لوله، نیاز به انجام عملیات حفاری و خاکبرداری در حجم زیاد، در اطراف لوله است. در ضمن، باید دبی جریان آب عبوری از خطوط انتقال، به مدت طولانی قطع شود تا عملیات خاکبرداری و ترمیم صورت پذیرد. یکی از راهکارهای پیشنهادی نوین برای تعمیر خطوط لوله انتقال آب بدون مواجه شدن با برخی از مشکلات فوق، استفاده از روکش کامپوزیتی، بتونه یا رزین است. به دلیل آسیب‌های محتمل وارد بر لوله‌های خطوط انتقال آب، پژوهشگران بسیاری در سراسر جهان به بررسی و ارائه راهکارهایی برای تعمیر سریع و مناسب این خطوط لوله پرداخته‌اند. در سال 2013 میلادی، شمس‌الدوحا و همکاران، اثر استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف را برای تعمیر لوله‌های استیل خطوط انتقال آب به کار برده شده بر روی سطح زمین، زیرزمین و نیز خطوط انتقال زیر آب، بررسی کردند [2]. آنها، نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققان در حوزه تعمیر خطوط انتقال آب با استفاده از طوقه فولادی جوشکاری شده، طوقه فولادی دوتکه متصل به هم توسط پیچ و مهره، روکش کامپوزیتی، بتونه و نوار پیش‌ساخته و نیز استفاده از رزین اپوکسی را مرور کردند. یو و همکاران با حمایت مالی دولت کره جنوبی [3]، از یک نوع کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی برای بازسازی و تقویت خطوط لوله نصب شده در زیرزمین استفاده کردند و میزان نفوذپذیری و استحکام کامپوزیت‌های تقویت شده مورد استفاده را اندازه‌گیری نمودند.

در سال 2015 میلادی، ماتوس و همکاران [4]، با تجزیه و تحلیل رفتار لوله‌های جدارنازک فلزی تقویت شده با روکش کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و رزین پلی‌یورتان، یک مدل برای فشار بحرانی که منجر به شکست این لوله‌ها می‌شود، ارائه دادند.

دوئل و همکاران [5]، رفتار لوله‌های تعمیر شده توسط برچسب‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن بافته شده را بررسی و تحلیل نمودند. آنها، لوله‌هایی که دارای پارگی‌هایی با مساحت‌های مختلف بودند را با بتونه و لایه‌ای از کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، براساس معیار ضخامت مینیمم استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا، تعمیر کردند. در سال 2015 میلادی، بنزیان و همکاران [6]، اثر برچسب‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی در دو حالت متفاوت، شامل تک لایه و دو لایه چسبانده شده بر روی لوله‌های فولادی ترک خورده را به روش عددی (با استفاده از تحلیل المان محدود) بررسی کردند و نشان دادند که ضریب ایمنی تعمیر، به فشار و طول ترک بستگی دارد. در سال 2010 میلادی، الکساندر و اوچوا [7]، برای تعمیر لوله‌های مورد استفاده در دریا، با در نظر گرفتن تنش‌های فشاری و کششی و همچنین بارهای خمشی وارد بر این لوله‌ها، به بررسی و طراحی یک روکش کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن با هدف حفاظت از سطح بیرونی این لوله‌ها پرداختند. در سال 2007 میلادی، گوارترن و کسلر [8]، اثر دما را بر روی لوله‌های تعمیر شده با کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی بررسی کردند. آنها در این تحقیق، تغییرات رفتار مکانیکی روکش کامپوزیتی کربن-اپوکسی را تحت دماهای مختلف، تجزیه و تحلیل کردند. در سال 2015 میلادی، کارا و همکاران [9]، لوله‌های فولادی آسیب دیده در اثر ضربه جانبی را با استفاده از روکش‌های استوانه‌ای کامپوزیتی دو لایه، چهار لایه و شش لایه، تعمیر کردند و اثرهای مثبت هر یک از سه طوقه کامپوزیتی مختلف را با یکدیگر مقایسه نمودند. در سال 2016 میلادی، گروسو و همکاران [10]، با شبیه‌سازی‌های عددی و انجام آزمایش‌های تجربی، روشی برای اتصال دو لوله خطوط انتقال سیال بصورت لب‌به‌لب ارائه کردند و اثر دما را بر رفتار این اتصال، بررسی نمودند. در سال 2016 میلادی، لی و همکاران [11]، دلایل جدا شدن اتصالات فلزی چسبانده شده بر روی لوله‌های کامپوزیتی بتونی را بررسی کردند. در این مطالعه، دما به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته شده است و مشخص شده است که با افزایش دما، از مقاومت چسب این اتصالات، کاسته می‌شود. در سال 2017

شده است. برای انجام این آزمایش، ابتدا، یک عیب مصنوعی به شکل یک شیار محوری با طول 50 میلی‌متر، عرض 10 میلی‌متر و عمق 2 میلی‌متر (راه به‌در) در جداره لوله سالم، ایجاد شده است. بدین منظور، از فرز انگشتی نصب شده بر روی دستگاه فرز CNC مدل FP4ME استفاده شده است. شکل 1، تصویری شماتیک از این عیب مصنوعی به همراه پارامترهای ابعادی آن را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، از دو کپ نیم‌کروی جهت مسدود کردن دو سر لوله‌های آزمایشی استفاده شده و بدین منظور، دو کپ به دو سر لوله، جوش داده شده‌اند. سپس، به وسط یکی از دو کپ جوش داده شده به دو سر لوله، یک بوشن 1/2 اینچ، بصورت هم‌محور با محور لوله، جوش داده شده و در مرحله بعد، بخشی از کپ که در داخل بوشن قرار گرفته، سوراخکاری شده است تا مجرای ورودی آب به درون نمونه آزمایشی، ایجاد شود. سپس، رزین پلی‌استر غیراشباع بر پایه ارتوفتالیک اسید، محصول شرکت فرایپل با کد تجاری 505 با گواهی «قابل استفاده برای آب آشامیدنی» با هاردنر متیل‌اتیل‌کتون پروکساید (MEKP) و کاتالیزور کبالت اکتات با غلظت 10% با نسبت‌های وزنی تعیین شده توسط شرکت سازنده، ترکیب و مخلوط حاصل به آرامی همزده شده‌اند تا از تشکیل حباب‌های هوا درون رزین جلوگیری شود. برای تعمیر لوله با رزین تهیه شده، ابتدا لوله آسیب دیده بصورت افقی به گونه‌ای نگاه‌داشته شده است که شیار ایجاد شده در جداره آن، رو به پایین باشد. سپس، مطابق شکل 2، یک نوار کاغذی بر روی محل عیب قرار داده شده است و همزمان با پیچاندن کاغذ به دور محیط لوله و حرکت بسیار آرام نوار کاغذی در امتداد محور لوله، رزین پلی‌استر آماده‌سازی شده به درون محل عیب تزریق شده است. در ادامه، نمونه، بدون حرکت، در مجاورت هوای محیط نگاه‌داشته شده تا زمان پخت رزین در معرض هوا، مطابق دستورالعمل شرکت تولید کننده آن، طی شود. در پایان مرحله اخیر، فرایندهای مکانیکی لازم برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی، به اتمام می‌رسد.

میلاادی، زرین‌زاده و همکاران [12، 13]، رفتار لوله‌های آلومینیومی ترک خورده تعمیر شده توسط روکش کامپوزیتی رزین اپوکسی-الیاف شیشه را تحت خستگی حاصل از نیروی محوری کششی به دو روش آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند. الهادی و همکاران [14]، رفتار لوله‌های فولادی دارای ترک مورب را در حالت تعمیر شده توسط روکش کامپوزیتی با الیاف شیشه، تحت فشار داخلی شبه‌استاتیکی مطالعه کردند. در این تحقیق، فرایند فرورفتگی موضعی لوله‌های آسیب دیده مورد استفاده در خطوط انتقال آب آشامیدنی، در حالتی که توسط رزین پلی‌استر تعمیر شده‌اند و تحت فشار داخلی آب آشامیدنی در دو حالت فشار ثابت و فشار متغیر قرار دارند، به روش آزمایشگاهی بررسی می‌شود. بدین منظور، ابتدا بصورت مصنوعی، یک عیب مکانیکی بصورت ناپیوستگی هندسی، در جداره لوله‌های استوانه‌ای، ایجاد و سپس، بخش آسیب دیده لوله، توسط رزین پلی‌استر تعمیر می‌شود و لوله دو سر مسدود، به یک مدار هیدرولیک از پیش طراحی شده، متصل و با تزریق آب آشامیدنی با فشارهای مختلف درون لوله تعمیر شده، لوله آسیب دیده تعمیر شده، تحت فشار داخلی اولیه مشخصی قرار می‌گیرد که مقدار این فشار اولیه، در تست‌های مختلف، متفاوت است. سپس، نمونه تحت فشار داخلی، بصورت جانبی، درون دستگاه تست یونیورسال، بین یک صفحه صلب تخت و یک سنبه استوانه‌ای قرار می‌گیرد و با اعمال نیروی جانبی موضعی بر جداره نمونه‌های آزمایشگاهی، تست فرورفتگی موضعی در شرایط شبه‌استاتیکی در دو حالت فشار ثابت و فشار متغیر انجام می‌شود. این تست تا زمانی ادامه می‌یابد که نشی در محل تعمیر شده لوله، بروز کند. در هر تست، استحکام لوله آسیب دیده تعمیر شده، اندازه‌گیری می‌شود. در ضمن، الگوی تغییرشکل نمونه‌ها و پارامترهای جذب انرژی ساختار، تعیین و بررسی می‌شوند.

## 2- تحلیل آزمایشگاهی

برای اولین بار در سطح جهان، در این مقاله، تست لهیدگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی، طراحی، معرفی و بر روی لوله‌های فولادی خطوط انتقال آب انجام می‌شود.

### 2-1- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی مورد استفاده در تست لهیدگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی، از لوله‌های فولادی از آلیاژ St37 با قطر 50 میلی‌متر و ضخامت جداره 2 میلی‌متر استفاده

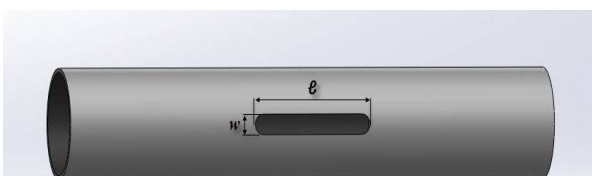


Fig. 1 The schematic artificial defect created in the tube wall, and its dimensional parameters [15]

شکل 1 تصویری شماتیک از عیب مصنوعی ایجاد شده در جداره لوله به همراه پارامترهای ابعادی آن [15]

داخلی متغیر، ابتدا هر یک از نمونه‌های آماده شده، به مدار هیدرولیک متصل می‌شوند.

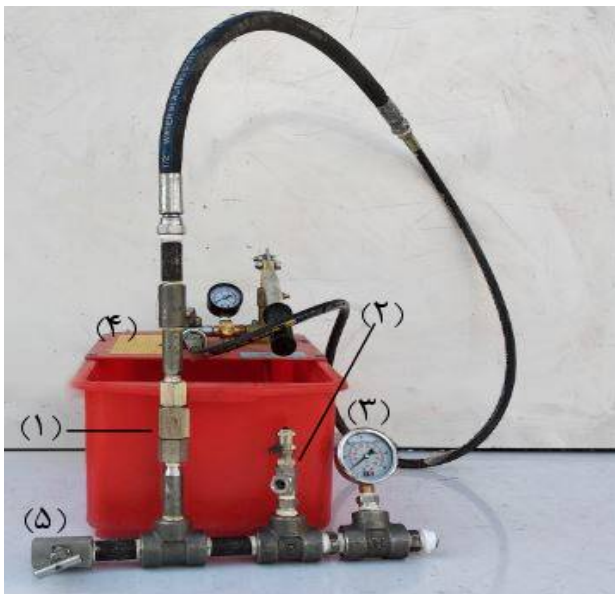


Fig. 3 The designed and assembled hydraulic circuit to perform two types of the indentation tests

شکل 3 مدار هیدرولیک طراحی و مونتاژ شده، برای انجام دو نوع تست لهدیگی موضعی



Fig. 4 Calibrating the relief valve in Gachsaran's Oil and Gas Company  
شکل 4 کالیبره کردن شیر فشارشکن، در شرکت نفت و گاز گچساران

در ادامه، با تحریک دستی پمپ پیستونی متصل به مدار هیدرولیک، ابتدا مدار و نمونه آزمایشی هواگیری (شکل 5) و سپس، با بستن شیر هواگیری، آب آشامیدنی با یک فشار مشخص درون نمونه‌های آزمایشی تزریق می‌گردد. با رسیدن فشار آب درون مخزن به فشار اولیه مورد نظر، شیر قطع و وصل جریان ورودی بسته شده و سپس، پمپ پیستونی از مدار جدا می‌گردد. در آزمایش‌های فشار متغیر، ابعاد هندسی و نحوه تعمیر نمونه‌های مختلف کاملاً یکسان است؛ ولی، فشار اولیه نمونه‌های مختلف، متفاوت است. در پایان مرحله اخیر، نمونه آزمایشی به یک مدار هیدرولیک فاقد پمپ متصل است که این



Fig. 2 Repair trend of the damaged tube by the resin

شکل 2 روند تعمیر لوله آسیب دیده توسط رزین

## 2-2- مدار هیدرولیک

برای ساخت مدار هیدرولیک، از قطعات و اتصالات هیدرولیک فشار قوی استفاده شده است. در ورودی این مدار هیدرولیک، یک شیر قطع و وصل جریان و در ادامه مدار، یک شیر فشارشکن قابل تنظیم و یک فشارسنج بوردن به صورت سری با یکدیگر نصب شده‌اند. برای تکمیل مدار هیدرولیک، در ورودی مدار، قبل از شیر قطع و وصل جریان، یک پمپ هیدرولیک با تحریک دستی با فشار نامی 160 بار نصب گردیده تا در آزمایش‌های مختلف، فشار مورد نیاز مدار هیدرولیک را به وجود آورد و همچنین، شیر قطع و وصل جریان دیگری نیز به منظور انجام فرایند هواگیری، در مدار تعبیه و نصب شده است. در سمت دیگر، در خروجی مدار هیدرولیک، یک شلنگ فشار قوی نصب شده تا مدار هیدرولیک را به نمونه‌های آزمایشی آماده شده (لوله‌های دو سر مسدود) متصل کند. شکل 3، مدار هیدرولیک طراحی و مونتاژ شده برای انجام این پژوهش را نشان می‌دهد. 5 عضو اصلی مدار هیدرولیک که در این شکل نشان داده شده‌اند، عبارتند از:

- 1) شیر قطع و وصل جریان
  - 2) شیر فشارشکن قابل تنظیم
  - 3) فشارسنج بوردن
  - 4) پمپ هیدرولیک با تحریک دستی با فشار نامی 160 بار
  - 5) شیر قطع و وصل جهت هواگیری سیستم.
- برای کالیبره کردن شیر فشارشکن، از تجهیزات موجود در شرکت نفت و گاز گچساران استفاده شده است. شکل 4، نحوه کالیبره کردن شیر فشارشکن و مدار هیدرولیک را در شرکت نفت و گاز گچساران نشان می‌دهد.

3-2- نحوه انجام تست لهدیگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی متغیر  
برای انجام آزمایش‌های لهدیگی موضعی لوله‌های تحت فشار



دلیل کاهش حجم درون لوله ناشی از لهیدگی موضعی، به تدریج افزایش می‌یابد. در هر آزمایش، روند انجام تست و تداوم بارگذاری تا زمانی ادامه می‌یابد که نشستی آب از محل آسیب‌دیده لوله تعمیرشده مشاهده گردد که این رخداد، با افت ناگهانی فشار نشان داده شده بر روی فشارسنج بودن، قابل تشخیص است. شکل 7، تصویری از یک نمونه آزمایشی را بعد از انجام تست لهیدگی موضعی نشان می‌دهد. جدول 1، ابعاد هندسی عیب ایجاد شده در جداره نمونه‌های آزمایشی را بیان می‌کند که دو پارامتر  $w$  و  $l$  نشان داده شده در این جدول، روی شکل 1 تعریف شده‌اند. جدول 2، مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در تست لهیدگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی متغیر را گزارش می‌کند. برای اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر تست حداقل دو بار انجام شده است.

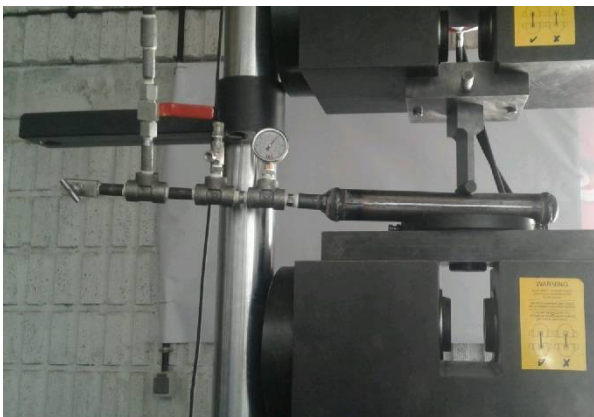


Fig. 6 Indentation test trend by the Universal Testing Machine  
شکل 6 نحوه انجام تست لهیدگی موضعی، درون دستگاه تست یونیورسال



Fig. 7 An experimental repaired specimen after the indentation test  
شکل 7 یک نمونه آزمایشی تعمیرشده، بعد از انجام تست لهیدگی موضعی

جدول 1 ابعاد هندسی عیب ایجاد شده در جداره نمونه‌های تست فرورفتگی موضعی

**Table 1** Geometrical dimensions of the created defect in the wall of the indentation test specimens

ابعاد هندسی عیب		نوع عیب
$l$ (mm)	$w$ (mm)	
50	10	D1050

مدار هیدرولیک دارای یک فشارسنج بودن و نیز یک شیر فشارشکن تنظیم شده بر روی یک فشار مشخص است و لوله، تحت یک فشار داخلی از پیش تعیین‌شده قرار دارد. برای انجام آزمایش لهیدگی موضعی لوله تحت فشار داخلی اولیه، از دستگاه تست یونیورسال DMG مدل 7166 استفاده می‌شود.

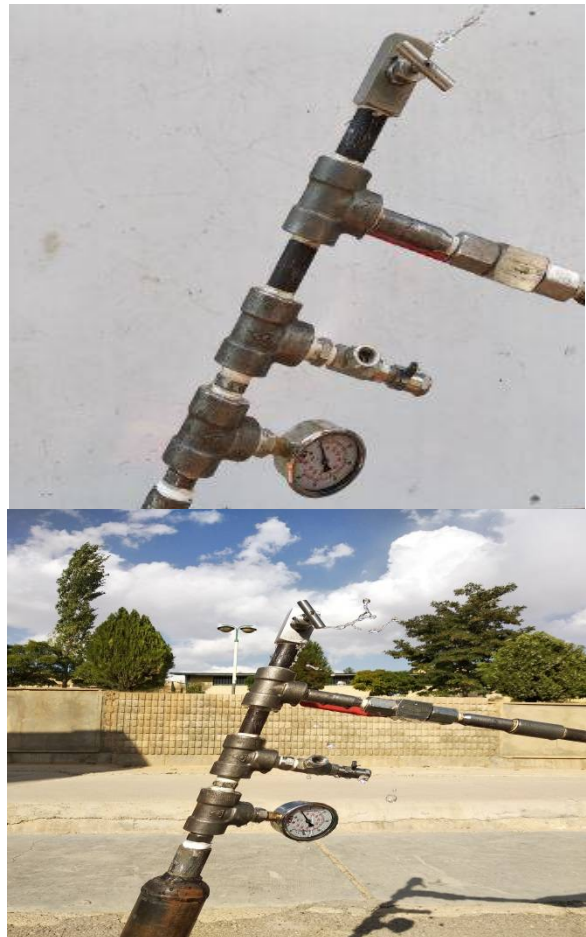


Fig. 5 Bleeding an experimental specimen  
شکل 5 نحوه هواگیری یک نمونه آزمایشی

در ادامه، مجموعه آماده شده، مطابق شکل 6، درون دستگاه تست یونیورسال بین یک صفحه صلب تخت و یک سنبه استوانه‌ای با قطر 22 mm قرار می‌گیرد؛ به گونه‌ای که محل آسیب دیده لوله، دقیقاً در زیر سنبه استوانه‌ای قرار گیرد. محور سنبه استوانه‌ای عمود بر محور لوله است. با شروع هر آزمایش، فک پایین دستگاه تست یونیورسال که صفحه صلب تخت به آن متصل شده است، به آرامی و با سرعت ثابت 2 mm/min به سمت بالا شروع به حرکت می‌کند. در اثر این حرکت، سنبه استوانه‌ای از بالا، به محل آسیب دیده لوله، فشار وارد می‌کند و این بخش از لوله، به‌طور موضعی دچار لهیدگی می‌شود. به‌طور همزمان، در آزمایش‌های فشار متغیر، فشار آب درون لوله (به

آزمایش، فشار آب آشامیدنی درون مخزن به دلیل عملکرد مداوم شیر اطمینان تنظیم شده، ثابت باقی می‌ماند. در هر آزمایش، روند بارگذاری تا زمانی که اولین نشی آب از محل آسیب دیده لوله تعمیر شده، مشاهده گردد، ادامه می‌یابد. در این نوع آزمایش نیز بروز نشی با افت ناگهانی فشار نشان داده شده بر روی فشارسنج بودن همراه است. جدول 3، مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در تست لهیدگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی ثابت را گزارش می‌کند. برای اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر تست حداقل دو بار انجام شده است.

### 3- نتایج و بحث

در هر آزمایش فشار ثابت، علاوه بر ثبت فشار داخلی اولیه، در لحظه بروز نشی، جابجایی نهایی سنبه و نیروی نهایی، اندازه‌گیری و ثبت شده است. در ضمن، نمودار نیروی جانبی بر حسب جابجایی جانبی هر نمونه رسم شده و با محاسبه سطح زیر این نمودار، میزان انرژی جنبشی جذب شده توسط هر نمونه آزمایشی تعیین شده است. در هر آزمایش فشار متغیر، علاوه بر موارد فوق، فشار نهایی آب درون لوله در لحظه بروز نشی نیز اندازه‌گیری و ثبت شده است.

#### 3-1- تحلیل نتایج آزمایش‌های فشار متغیر

مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های فشار متغیر، در جدول 4 گزارش شده است.

شکل 8 نمودار جابجایی نهایی سنبه را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر نشان می‌دهد. شکل 8 نشان می‌دهد که با افزایش فشار داخلی اولیه درون نمونه‌های آزمایشی از صفر تا 24 بار، حداکثر جابجایی سنبه تا لحظه بروز اولین آثار نشی از محل تعمیر شده لوله آسیب دیده، به تدریج در نمونه‌های مختلف، کاهش می‌یابد.

جدول 3 مشخصات نمونه‌های تست فرورفتگی موضعی تحت فشار داخلی ثابت  
Table 3 Characteristics of the indentation test specimens under the constant inner pressure

کد نمونه	ضخامت × قطر (mm)	فشار داخلی ثابت (bar)
CPI-01	50 × 2	6
CPI-02	50 × 2	10
CPI-03	50 × 2	12
CPI-04	50 × 2	14
CPI-05	50 × 2	18
CPI-06	50 × 2	20
CPI-07	50 × 2	23

جدول 2 مشخصات نمونه‌های تست فرورفتگی موضعی تحت فشار داخلی متغیر

Table 2 Characteristics of the indentation test specimens under the variable inner pressure

کد نمونه	ضخامت × قطر (mm × mm)	فشار داخلی اولیه (bar)
PIT-01	50 × 2	صفر
PIT-02	50 × 2	4
PIT-03	50 × 2	10
PIT-04	50 × 2	14
PIT-05	50 × 2	20
PIT-06	50 × 2	24

در تمام آزمایش‌های فشار متغیر، شیر فشارشکن در فشار 52 بار تنظیم شده است، در حالی که فشار اولیه نمونه‌های مختلف، متفاوت و مطابق جدول 2 انتخاب شده است. در حین انجام آزمایش‌های فشار متغیر، فشار آب درون نمونه آزمایشی، از فشار اولیه تنظیمی به تدریج افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در هیچ یک از آزمایش‌های فشار متغیر، شیر فشارشکن عمل نکرد، لذا فشار هر یک از نمونه‌ها در حین آزمایش فشار متغیر، از ابتدا تا زمان بروز اولین آثار نشی، افزایش تدریجی را نشان دادند. از فشارسنج بودن برای اندازه‌گیری فشار مدار هیدرولیک در لحظات مختلف، استفاده شده است.

#### 2-4- نحوه انجام تست لهیدگی موضعی لوله‌های تحت فشار داخلی ثابت

نحوه انجام آزمایش فشار ثابت، شبیه به آزمایش فشار متغیر است، با این تفاوت که در آزمایش‌های فشار ثابت، برای انجام آزمون لهیدگی جانبی تحت فشار داخلی ثابت، ابتدا شیر فشارشکن قابل تنظیم، بر روی فشار مد نظر هر تست تنظیم می‌گردد. سپس، با تحریک دستی پمپ پیستونی متصل به مدار هیدرولیک، ابتدا هواگیری مدار و نمونه آزمایشی انجام می‌شود و در ادامه، فشار آب آشامیدنی درون نمونه آزمایشی، به فشار ثابت مورد نظر آن تست، رسانده می‌شود. این امر، با افزایش تدریجی فشار آب درون مدار آغاز و تا ایجاد جریان آب از خروجی شیر فشارشکن ادامه می‌یابد. نحوه انجام ادامه فرایند این نوع آزمایش با فرایند متناظر در آزمایش فشار متغیر، کاملاً یکسان است. یعنی پس از ایجاد فشار داخلی ثابت، شیر قطع و وصل جریان، بسته و پمپ پیستونی از مدار هیدرولیک جدا می‌شود و هر یک از لوله‌های تحت فشار داخلی ثابت، درون دستگاه تست یونیورسال بین همان صفحه صلب تخت و سنبه استوانه‌ای با سرعت پیشروی ثابت 2 mm/min قرار می‌گیرند. طی این نوع

طرف آب بر سطح داخلی لوله، افزایش می‌یابد.

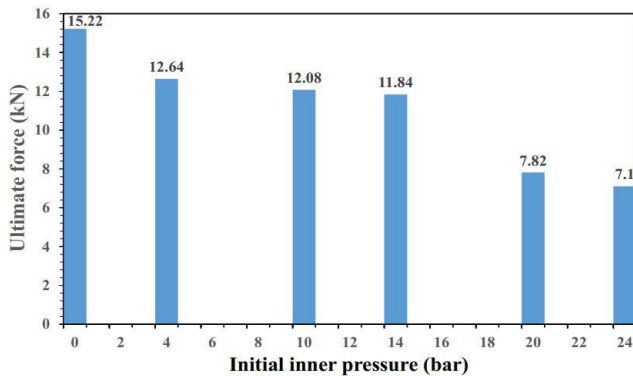


Fig. 9 Diagram of ultimate force versus initial inner pressure, during the variable pressure experiments

شکل 9 نمودار نیروی نهایی بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر

این نیروی فشاری به عنوان یک نیروی بازدارنده، از تغییر شکل پلاستیک لوله در نواحی دور از ناحیه تحت اثر سنبه، جلوگیری می‌کند. به عبارت دیگر، نیروی فشاری اعمالی از طرف آب درون لوله به سطح داخلی آن، باعث می‌شود تا در نمونه‌هایی که تحت فشار داخلی اولیه بالاتری قرار گرفتند، تغییر شکل پلاستیک در ناحیه کوچک‌تری اتفاق بیفتد و برای ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در یک ناحیه محدودتر (کوچک‌تر)، به نیروی اعمالی کوچک‌تری از طرف سنبه نیاز است.

شکل 10 نمودار انرژی جذب شده را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با رسم نمودار نیرو-جابجایی در هر تست و محاسبه سطح زیر این نمودار تا لحظه بروز اولین آثار نشتی، میزان جذب انرژی توسط لوله‌های خطوط انتقال آب آسیب دیده تعمیر شده با رزین پلی‌استر تعیین می‌شود. نتایج گزارش شده در شکل 10 نشان می‌دهد که جذب انرژی توسط نمونه‌های تحت فشار داخلی اولیه بالاتر، کمتر است که بصورت زیر قابل توجیه فیزیکی است. در نمونه‌های تحت فشار داخلی اولیه مختلف، هر چه فشار داخلی اولیه کمتر باشد، براساس توجیه‌های قبلی ارائه شده، میزان جابجایی نهایی و نیروی نهایی سنبه کاهش می‌یابد و از آنجایی که طبق تعریف، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر با جذب انرژی است، میزان انرژی جذب شده توسط لوله آسیب دیده تعمیر شده توسط رزین پلی‌استر، با افزایش فشار داخلی اولیه، کاهش می‌یابد. بنابراین، از لحاظ کاربردی، در طراحی و بهره‌برداری از خطوط انتقال آب، باید فشار آب در ایستگاه‌های پمپاژ اولیه برابر با حداقل فشار ممکن

جدول 4 نتایج آزمایش‌های فرورفتگی موضعی فشار متغیر بر روی نمونه‌های مختلف

Table 4 Results of the variable pressure indentation tests on different specimens

کد نمونه	فشار اولیه (bar)	فشار نهایی (bar)	جابجایی نهایی (mm)	نیروی نهایی (kN)	جذب انرژی (J)
PIT-01	صفر	38	9/41	15/22	72/3
PIT-02	4	36	7/58	12/64	49/7
PIT-03	10	40	6/83	12/08	44/7
PIT-04	14	42	6/74	11/84	43/4
PIT-05	20	33	4/2	7/82	17/1
PIT-06	24	33	3/92	7/1	13/7

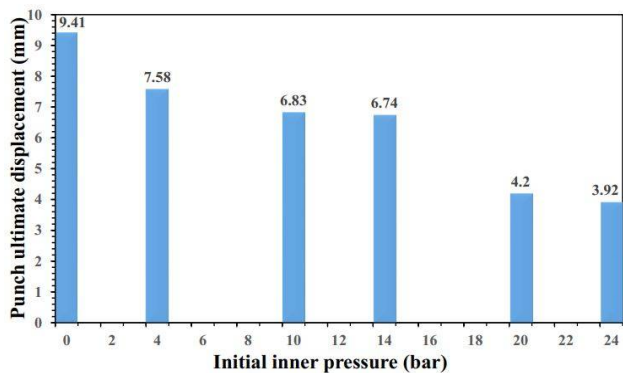


Fig. 8 Diagram of punch ultimate displacement versus initial inner pressure, during the variable pressure experiments

شکل 8 نمودار جابجایی نهایی سنبه بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر

علت فیزیکی این پدیده، افزایش مقاومت جداره لوله در اثر افزایش فشار داخلی اعمالی به سطح داخلی آن است. به عبارت دیگر، در آزمایش‌های مختلف، در یک جابجایی یکسان سنبه، نیرویی که آب تحت فشار درون لوله به رزین استفاده شده در محل تعمیر لوله، از سمت داخل به بیرون وارد می‌کند، با افزایش فشار داخلی اولیه نمونه‌های مختلف، افزایش می‌یابد که این نیروی فشاری داخلی بزرگ‌تر، محدودکننده و کاهش‌دهنده جابجایی جانبی جداره لوله در حین آزمایش‌های مختلف است.

شکل 9 نمودار نیروی نهایی را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر نشان می‌دهد. شکل 9 نشان می‌دهد، با افزایش فشار اولیه آب تزریق شده درون نمونه‌های آزمایشی مختلف، مقدار بیشینه نیروی جانبی اعمالی از طرف سنبه صلب استوانه‌ای بر محل آسیب دیده لوله قبل از بروز اولین آثار نشتی، به تدریج کاهش می‌یابد که این پدیده در ادامه توجیه می‌شود. در یک جابجایی جانبی یکسان سنبه، با افزایش فشار داخلی اولیه در نمونه‌های مختلف، نیروی فشاری اعمالی از

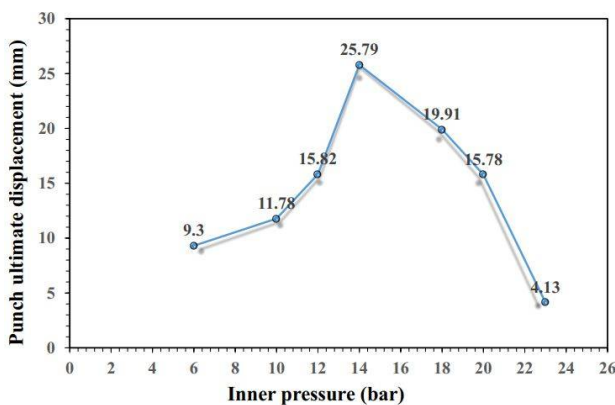
افزایش دو بعد دیگر (طول و عرض) رزین می‌شود.

برای رساندن آب به مقصد در نظر گرفته شود تا عملکرد ساختار بهینه باشد.

**جدول 5** نتایج آزمایش‌های فرورفتگی موضعی فشار ثابت بر روی نمونه‌های مختلف

**Table 5** Results of the constant pressure indentation tests on different specimens

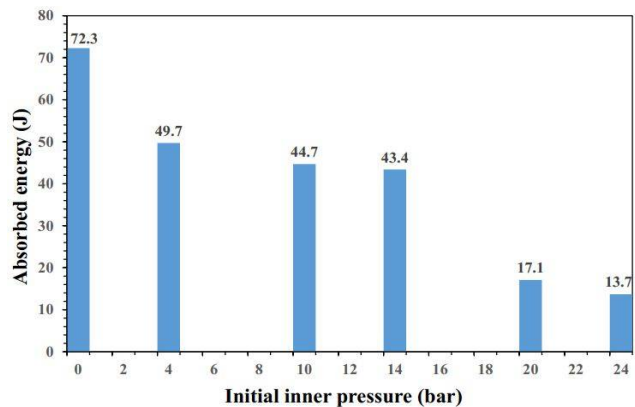
کد نمونه	فشار داخلی (bar)	جابجایی نهایی (mm)	نیروی نهایی جذب انرژی (kN)	انرژی جذب انرژی (J)
CPI-01	6	9/30	10/96	60/11
CPI-02	10	11/78	13/8	94/4
CPI-03	12	15/82	15/58	147/31
CPI-04	14	25/79	20/64	244/24
CPI-05	18	19/91	19/46	235/67
CPI-06	20	15/78	17/22	164/45
CPI-07	23	4/13	7/38	18/7



**Fig. 11** Diagram of punch ultimate displacement versus inner pressure, during the constant pressure tests

**شکل 11** نمودار جابجایی نهایی سنبه بر حسب فشار داخلی، طی آزمایش‌های فشار ثابت

این امر، باعث افزایش استحکام محل اتصال رزین و سطح ماشین‌کاری شده عیب و در نتیجه، افزایش مقاومت محل آسیب‌دیده تعمیر شده در برابر بروز نشی می‌شود. لذا، در این محدوده (فشارهای ثابت کمتر از 14 بار)، با افزایش فشار، جابجایی نهایی سنبه قبل از بروز اولین آثار نشی، افزایش می‌یابد. در ادامه و به ازای فشارهای داخلی بالاتر از 14 بار، فشار داخلی اعمالی بر حجم بخشی از ماده که در فرایند تغییر شکل پلاستیک مشارکت می‌کند، تأثیر قابل توجهی دارد. در نتیجه، در این محدوده فشار داخلی، تغییر شکل‌های پلاستیک در ناحیه کوچکتری از سطح جانبی لوله اتفاق می‌افتد؛ لذا، خیز ایجاد شده در رزین مورد استفاده، با شیب تندی (گرادیان بالایی) همراه است که رزین قادر به تحمل این گرادیان بزرگ تغییر شکل نیست. لذا، در ناحیه فشارهای ثابت بالاتر از 14 بار، با افزایش فشار داخلی، جابجایی نهایی سنبه کاهش می‌یابد.



**Fig. 10** Diagram of absorbed energy versus initial inner pressure, during the variable pressure experiments

**شکل 10** نمودار انرژی جذب شده بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار متغیر

### 3-2- تحلیل نتایج آزمایش‌های فشار ثابت

در حین انجام هر آزمایش لهیدگی موضعی فشار ثابت، نمودار نیروی جانبی بر حسب جابجایی سنبه رسم شده است. از روی این نمودار، مقادیر نیروی نهایی و جابجایی نهایی سنبه، تعیین و ثبت می‌شود. در ضمن، با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی، میزان جذب انرژی جنبشی توسط هر نمونه آزمایش شده، تعیین می‌شود. مقادیر مربوط به این پارامترها برای آزمایش‌های فشار ثابت انجام شده، در جدول 5 گزارش شده است.

**شکل 11** نمودار جابجایی نهایی سنبه را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار ثابت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد، با افزایش فشار داخلی ثابت درون نمونه‌های آزمایشی از 6 تا 23 بار، حداکثر جابجایی سنبه تا لحظه بروز اولین آثار نشی در نمونه‌های مختلف، ابتدا تا فشار ثابت 14 بار، افزایش و سپس، از این مقدار فشار تا فشار ثابت 23 بار، به تدریج کاهش می‌یابد. روند تدریجی افزایشی و سپس کاهش می‌یابد. میزان جابجایی نهایی سنبه، بدین صورت توجیه می‌شود. در فشارهای داخلی پایین، فشار داخلی آب درون لوله قادر نیست محدودیت قابل توجهی در حجم بخشی از ماده سازنده لوله که در فرایند تغییر شکل پلاستیک موضعی مشارکت می‌کند، ایجاد کند. از طرفی، افزایش فشار داخلی در نمونه‌های مختلف دارای فشارهای ثابت کمتر از 14 بار، باعث اعمال تنش سه محوره بر رزین نصب شده در محل آسیب‌دیدگی می‌شود. فشار داخلی باعث اعمال فشار بر سطح داخلی رزین و در نتیجه، تمایل به



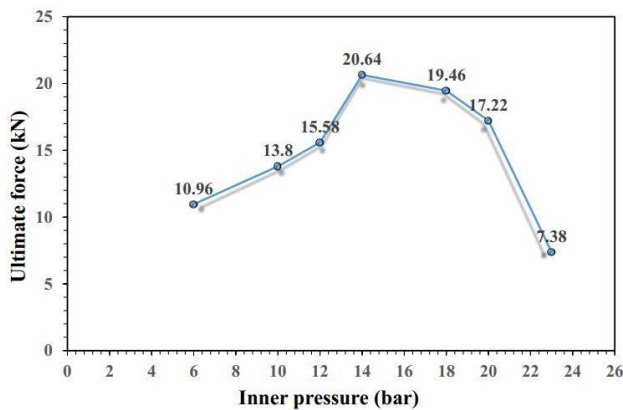


Fig. 12 Diagram of ultimate force versus inner pressure, during the constant pressure tests

شکل 12 نمودار نیروی نهایی بر حسب فشار داخلی، طی آزمایش‌های فشار ثابت

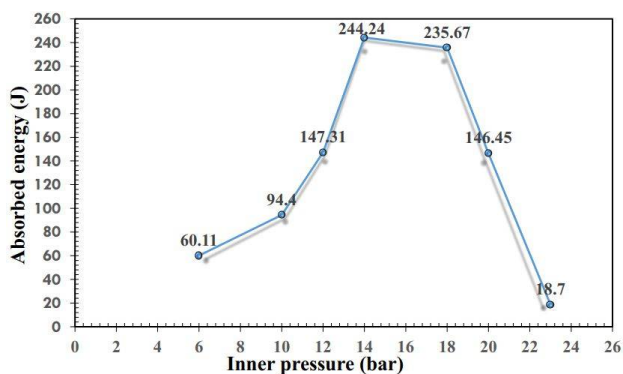


Fig. 13 Diagram of absorbed energy versus inner pressure, during the constant pressure tests

شکل 13 نمودار انرژی جذب شده بر حسب فشار داخلی، طی آزمایش‌های فشار ثابت

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از رزین پلی‌استر دارای گواهی «قابل استفاده برای آب آشامیدنی» که در داخل کشور تولید می‌شود، راهکار مناسبی برای تعمیر خطوط انتقال آب آسیب دیده است و لوله آسیب دیده تعمیر شده با استفاده از این نوع رزین، می‌تواند فشارهای داخلی بیش از 30 بار را تحمل کند که مقدار این ظرفیت فشار بیشینه، به مهارت تعمیرکاران بستگی دارد. لذا، با تربیت چند کارگر و گذراندن دوره‌های مهارت‌آموزی توسط آنها، می‌توان لوله‌های خطوط انتقال آب را تنها با استفاده از رزین پلی‌استر دارای گواهی «قابل استفاده برای آب آشامیدنی» تعمیر کرد؛ به گونه‌ای که بدون نیاز به عملیات حفاری و خاک‌برداری گسترده در اطراف لوله و نیز بدون نیاز به فرایندهای برش‌کاری و جوشکاری، لوله تعمیر شده بتواند حتی فشارهای داخلی تا 40 بار را تحمل کند.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرایند فرورفتگی موضعی لوله‌های آسیب دیده

شکل 12 نمودار نیروی نهایی بیشینه را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار ثابت نشان می‌دهد. شکل 12 نشان می‌دهد که با افزایش فشار ثابت آب تزریق شده درون نمونه‌های آزمایشی مختلف، مقدار بیشینه نیروی جانبی اعمالی از طرف سنبه صلب استوانه‌ای بر محل آسیب دیده لوله قبل از بروز اولین آثار نشستی، به تدریج، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این پدیده در ادامه توجیه می‌شود. مطابق توضیحات ارائه شده اخیر، به ازای فشارهای داخلی ثابت کمتر از 14 بار، حجم ماده مشارکت کننده در فرایند تغییرشکل پلاستیک، تغییرات محسوسی ندارد، در حالی که، افزایش تدریجی فشار در این ناحیه، باعث افزایش نیروی مقاوم داخلی ایجاد شده از طرف آب در برابر فرورفتگی موضعی می‌شود. لذا، با افزایش تدریجی فشار، مقدار نیروی جانبی نهایی در محدوده فشارهای کمتر از 14 بار، به تدریج افزایش می‌یابد تا بر نیروی مقاوم داخلی افزاینده، غلبه کند. در حالی که در محدوده فشارهای ثابت بالاتر از 14 بار، به ازای یک جابجایی جانبی یکسان سنبه، با افزایش فشار داخلی ثابت در نمونه‌های مختلف، نیروی مقاوم اعمالی از طرف آب بر سطح داخلی لوله، افزایش می‌یابد. در این محدوده فشار داخلی، نیروی مقاوم داخلی قادر است به عنوان یک نیروی بازدارنده، از تغییرشکل پلاستیک لوله در نواحی دور از ناحیه تحت اثر سنبه، جلوگیری کند. به عبارت دیگر، به ازای فشارهای ثابت بیشتر از 14 بار، نیروی فشاری اعمالی از طرف آب درون لوله به سطح داخلی آن، باعث می‌شود تا در نمونه‌هایی که تحت فشار داخلی بالاتری قرار دارند، تغییرشکل پلاستیک در ناحیه کوچک‌تری اتفاق بیفتد و برای ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در یک ناحیه محدودتر (کوچک‌تر)، به نیروی اعمالی کوچک‌تری از طرف سنبه نیاز است.

شکل 13 نمودار انرژی جذب شده را بر حسب فشار داخلی اولیه، طی آزمایش‌های فشار ثابت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش فشار داخلی، میزان جذب انرژی توسط نمونه‌های تحت فشار داخلی ثابت کمتر از 14 بار، افزایش می‌یابد؛ در حالی که این روند برای نمونه‌های تحت فشار داخلی ثابت بیشتر از 14 بار، کاهش می‌یابد. از آنجایی که میزان جذب انرژی توسط نمونه‌های آسیب‌دیده تعمیر شده با رزین پلی‌استر، با سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی در هر تست برابر است، مطابق توجیهات فیزیکی ارائه شده برای روند تغییرات نیروی نهایی و جابجایی نهایی، روند ذکر شده برای تغییرات میزان جذب انرژی قابل توجیه است.

شرکت) و سرکار خانم مهندس وحیده فرهادی (رئیس اداره تحقیقات، بهره‌وری و مدیریت تحول این شرکت) تشکر و قدردانی ویژه می‌شود که با حمایت‌های این عزیزان، این طرح پژوهشی انجام شده است. در ضمن، این مقاله، بخشی از «برنامه جامع تحقیقاتی دکتر عباس نیک نژاد» در دانشگاه یاسوج است؛ بنابراین، از حمایت‌های مادی و معنوی این دانشگاه در راستای پیشبرد اهداف این برنامه جامع تحقیقاتی، تشکر و قدردانی می‌شود.

## 6- مراجع

- [1] M. Ayatollah, H. Azadeh, R. Hashemi, Investigating the behavior of composite patch reinforced tubing, *Proceeding of the first conference of tubes and related industries*, Tehran, Iran, 2007. (in Persian فارسی)
- [2] M. Shamsuddoha, M. Mainul Islam, T. Aravinthan, A. Manalo, K. Lau, Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs, *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 40–54, 2013.
- [3] H.N. Yu, S.S. Kim, I.U. Hwang, D.G. Lee, Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes, *Composite Structures*, Vol. 86, pp. 285–290, 2008.
- [4] H.S.C. Mattos, J.M.L. Reis, L.M. Paim, M.L. Silva, F.C. Amorim, V.A. Perrut, Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures, *Composite Structures*, Vol. 114, pp. 117–123, 2014.
- [5] 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*, Vol. 85, pp. 782–788, 2008.
- [6] M. Meriem-Benziane, S.A. Abdul-Wahab, H. Zahloul, B. Babaziane, M. Hadj-Meliani, G. Pluvinaige, 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*, Vol. 77, pp. 431–439, 2015.
- [7] C. Alexander, O.O. Ochoa, Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 499–507, 2010.
- [8] W.K. Goertzen, M.R. Kessler, Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair, *Composites Part B*, Vol. 38, pp. 1–9, 2007.
- [9] M. Kara, M. Uyaner, A. Avci, Repairing impact damaged fiber reinforced composite pipes by external wrapping with composite patches, *Composite Structures*, Vol. 123, pp. 1–8, 2015.

مورد استفاده در خطوط انتقال آب، در حالتی که توسط رزین پلی‌استر تعمیر شده‌اند و تحت فشار داخلی آب آشامیدنی قرار دارند، در دو حالت فشار ثابت و فشار متغیر، به روش آزمایشگاهی بررسی شده است.

نتایج آزمایش‌های فشار متغیر انجام شده نشان می‌دهد، با افزایش فشار داخلی اولیه درون نمونه‌های آزمایشی از صفر تا 24 بار، حداکثر جابجایی سنبه و نیز مقدار بیشینه نیروی جانبی اعمالی از طرف سنبه صلب استوانه‌ای بر محل آسیب دیده لوله قبل از بروز اولین آثار نشتی، به تدریج در نمونه‌های مختلف، کاهش می‌یابد که به علت افزایش مقاومت جداره لوله در اثر افزایش فشار داخلی اعمالی به سطح داخلی آن و در نتیجه، کوچک‌تر شدن ناحیه‌ای از جداره لوله که دچار تغییر شکل پلاستیک شده، در ضمن، جذب انرژی توسط نمونه‌های تحت فشار داخلی اولیه بالاتر، کمتر است که به دلیل کاهش میزان جابجایی نهایی و نیروی نهایی سنبه و در نتیجه، کاهش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی است.

در ضمن، نتایج آزمایش‌های فشار ثابت انجام شده نشان می‌دهد، با افزایش فشار داخلی درون نمونه‌های آزمایشی از 6 تا 14 بار، جابجایی نهایی سنبه، مقدار بیشینه نیروی جانبی اعمالی از طرف سنبه صلب استوانه‌ای بر محل آسیب دیده لوله قبل از بروز اولین آثار نشتی و نیز مقدار انرژی جنبشی مستهلک شده، به تدریج در نمونه‌های مختلف، افزایش می‌یابد؛ در حالی که، به ازای فشارهای بالاتر از 14 بار، مقادیر جابجایی نهایی، نیروی بیشینه و جذب انرژی جنبشی کاهش می‌یابد.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از رزین پلی‌استر دارای گواهی «قابل استفاده برای آب آشامیدنی» راهکار مناسبی برای تعمیر خطوط انتقال آب آسیب دیده است و لوله آسیب دیده تعمیر شده با استفاده از این نوع رزین، می‌تواند فشارهای داخلی تا 30 بار را تحمل کند.

## 5- تقدیر و تشکر

این تحقیق، بخشی از یک طرح پژوهشی تحت عنوان «ارائه راهکارهایی برای تعمیر لوله‌های انتقال آب با استفاده از برچسب لایه کامپوزیتی» است که طبق قرارداد منعقد شده به شماره 17975 مورخ 1395/12/28 بین شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کهگیلویه و بویراحمد و دانشگاه یاسوج انجام شده و هزینه‌های انجام آن توسط شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کهگیلویه و بویراحمد تأمین شده است. لذا، از جناب آقای مهندس فیض‌اله پاسره (مدیرعامل و رئیس هیأت مدیره این

- 2017.
- [13] H. Zarrinzadeh, M.Z. Kabir, A. Deylami, Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminum pipe repaired by composite patch, *Engineering Structures*, Vol. 133, pp. 24–32, 2017.
- [14] A.A. Abd-Elhady, H.E. M. Sallam, M.A. Mubarak, Failure analysis of composite repaired pipelines with an inclined crack under static internal pressure, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 5, pp. 123–130, 2017.
- [15] A. Niknejad, Providing some solutions for the repair of water pipes using composite layer label, Report No. 3, Research project provided to Rural Water and Wastewater Company of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, 1397. (in Persian فارسی)
- [10] M. Grosso, J.E.C. Lopez, V.M.A. Silva, S.D. Soares, J.M.A. Rebello, G.R. Pereira, Pulsed thermography inspection of adhesive composite joints: computational simulation model and experimental validation, *Composites Part B*, Vol. 106, pp. 1–9, 2016.
- [11] J. Li, M. Sun, J. Hua, R. Ruan, Y. Wang, Structural performance of reinforced strain hardening cementitious composite pipes during monotonic loading, *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 794–804, 2016.
- [12] H. Zarrinzadeh, M.Z. Kabir, A. Deylami, Crack growth and debonding analysis of an aluminum pipe repaired by composite patch under fatigue loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 112, pp. 140–148,