



مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری محوری فشاری لوله‌های فولادی دارای نقص مکانیکی و تحت فشار داخلی

مرتضی نقی‌پور^{1*}، مهدی عزتی²، مجید الیاسی³

1- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 484، m-naghi@nit.ac.ir

چکیده

علاوه بر بارهای محیطی و بهره‌برداری، خطوط لوله ممکن است در معرض بارهای جانبی تصادفی مانند سقوط اجسام سنگین و یا برخورد لنگر کشتی قرار بگیرند. در نتیجه، ظرفیت باربری این خطوط به دلیل نواقص احتمالی ایجاد شده مانند قرشدگی و یا کاهش ضخامت موضعی به شدت کاهش پیدا می‌کند. چنین آسیب‌های وارده به یک سازه فراساحل ممکن است پیامدهای اقتصادی، زیستی و جانی جدی را به دنبال داشته باشد. در این تحقیق تأثیر حضور قرشدگی و کاهش ضخامت بر روی رفتار یک‌سویه فشاری اعضای لوله‌ای، همراه با فشار داخلی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چندین نمونه آزمایشگاهی با نسبت قطر به ضخامت (D/t) 22 و از جنس فولاد API-5L-X80 ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته است. قرشدگی توسط یک سنه کروی شکل با نسبت (d/D) برابر با 0.45، و کاهش ضخامت موضعی با مقطع مستطیلی توسط دستگاه تخلیه الکتریکی (اسپارک) در بخش میانی نمونه‌ها اعمال شده‌اند. پس از اعمال قرشدگی نمونه‌های سالم و آسیب دیده تحت بارگذاری محوری یک‌سویه فشاری قرار گرفته‌اند. در این تحقیق اثر پارامترهایی از جمله عمق قرشدگی، حضور فشار داخلی و ابعاد کاهش ضخامت موضعی مورد بررسی قرار گرفته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 بهمن 1396

پذیرش: 09 اسفند 1396

ارائه در سایت: 24 فروردین 1397

کلید واژگان:

بارگذاری محوری

یک‌سویه فشاری

لوله‌های فولادی

فشار داخلی

نقص مکانیکی

Experimental investigation of pressurized steel pipes with mechanical defect under axial compression

Morteza Naghipour^{1*}, Mehdi Ezzati¹, Majid Elyasi²

1-Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2-Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 484 Babol, Iran, m-naghi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 January 2018

Accepted 28 February 2018

Available Online 13 April 2018

Keywords:

Axial Loading

Monotonic Compression

Steel Pipelines

Internal Pressure

Mechanical Damage

ABSTRACT

In addition to the operational and environmental loads, an offshore pipeline may be subjected to accidental transverse loads by falling heavy objects or trawl gears. As a result, the load bearing capacity of the pipeline may be significantly impaired by the dents, gouges or other types of damages caused by the impact. Such damage to an offshore structure may have serious environmental and economic consequences. In this study, results of experimental investigations on the residual strength of plain and gouged dented steel pressurized pipes under monotonic axial compression are presented. Some series small-scale specimens were fabricated from API-5L-X80 steel pipes with (D/t) ratio of 22 for the purpose of experimental tests. The specimens were dented by a spherical indenter with (d/D) ratio of 0.45 and gouges were applied along the pipe axis on the outer surface of the middle portion, whose cross section was rectangular. Defected and intact specimens were then collapsed by monotonic axial compression loading whilst subjected to constant internal pressure. In this research, effects of some key non-dimensional parameters such as dent depth, presence of the internal pressure and geometrical parameters of gouges have been studied.

1- مقدمه

امروزه بیش از نیمی از سوخت دنیا توسط نفت و گاز تامین می‌شود که اغلب آن‌ها از طریق خطوط لوله انتقال می‌یابند. در واقع خطوط لوله را می‌توان از شاهراه‌های انتقال نفت و گاز به شمار آورد. با توجه به اینکه بیشتر این خطوط در بستر دریا و یا مدفون در زیر خاک می‌باشند، عامه مردم آن‌ها را مشاهده نمی‌نمایند. از طرف دیگر با توجه به بالا بودن حجم انتقال محصولات، عموماً

این خطوط دارای قطر زیاد بوده و تحت فشارهای داخلی بالا عمل می‌کنند

[1].

عموماً محصولات از طریق خطوط لوله انتقال می‌یابند خطرناک بوده و در صورت پخش شدن در محیط می‌توانند خسارات جانی، مالی و زیست محیطی بسیاری به دنبال داشته باشند. به همین دلیل این خطوط توسط ضوابط سخت‌گیرانه موجود در آیین‌نامه‌های بین‌المللی و نشریه‌های محلی،

معیارهایی را به منظور ارزیابی شدت قرشدگی و تأثیر آن بر روی ظرفیت باقی‌مانده اعضای لوله‌ای ارائه کرده‌اند. در ادامه تلاش شده است تا خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده از گذشته تا حال مورد بررسی قرار گیرد.

گروهی از محققین نشان دادند که قرشدگی تا عمق 8% قطر اولیه لوله ($X/D=8\%$) تأثیری بر روی فشار ترکیدگی خطوط لوله ندارد [7]. از طرف دیگر نشان داده شد که عمق‌های قرشدگی تا 24% قطر اولیه لوله نیز تأثیر اندکی بر روی فشار ترکیدگی خطوط لوله دارد [8]. در آئین‌نامه API-579 [9]، حضور قرشدگی بر روی محل جوش را از جمله قرشدگی‌های خطرناک معرفی می‌نماید، زیرا رشد ترک در این مناطق به سادگی رخ می‌دهد و می‌تواند منجر به کاهش شدید فشار ترکیدگی در خطوط لوله گردد. از طرفی تحقیقات دیگری نشان می‌دهد که قرشدگی‌ها تا عمق قرشدگی معادل 10% قطر اولیه لوله عموماً منجر به ایجاد خرابی در خطوط نمی‌گردد ($X/D=10\%$) [10]. در این تحقیق عمق قرشدگی (X) در حالتی که فشار داخلی وجود ندارد در نظر گرفته شده است. اما این در حالی است که در صورت حضور فشار داخلی باید این ضوابط اصلاح گردند. تحقیقات انجام شده توسط گروه EPRG نشان می‌دهد که عمق قرشدگی در حالتی که فشار داخلی وجود ندارد، حدود 1.43 برابر عمق قرشدگی در حالت بهره‌برداری و با حضور فشار داخلی می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده می‌توان اظهار داشت که معیار ارائه شده توسط گروه EPRG برای عمق قرشدگی، به 7% قطر اولیه لوله در حالتی که فشار داخلی بهره‌برداری وجود دارد کاهش می‌یابد [10].

همچنین حضور قرشدگی منجر به کاهش عمر خستگی می‌گردد. نتایج محققان مختلف نشان می‌دهد که با افزایش عمق قرشدگی میزان کاهش عمر خستگی نیز شدت می‌یابد [7، 10]. هاپکینز و همکارانش نیز نشان دادند که عمر خستگی در لوله‌هایی که قرشدگی با کاهش ضخامت همراه می‌باشد بین 10 تا 100 برابر کمتر از لوله‌هایی است که در آن‌ها قرشدگی با کاهش ضخامت همراه نمی‌باشد [7].

در سال‌های اخیر، موضوع تأثیر حضور قرشدگی بر روی رفتار سازه‌ای اعضای لوله‌ای تحت بارگذاری‌های یک‌سویه و تناوبی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. تأثیر حضور قرشدگی بر روی رفتار یک‌سویه فشاری اعضای لوله‌ای بدون حضور فشار داخلی توسط زین‌الدین و همکارانش و همچنین توسط قاضی‌جهانی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [11-13]. نتایج نشان دادند که با حضور قرشدگی، ظرفیت باربری فشاری اعضای لوله‌ای کاهش می‌یابد. تأثیر حضور قرشدگی بر روی لوله‌های فولادی تحت بارگذاری تناوبی محوری نیز توسط زین‌الدینی و همکارانش [14] و همچنین آزاده و طاهری [15] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق قرشدگی، نرخ کرنش خمیری پیش‌رونده به شدت افزایش می‌یابد. حضور قرشدگی همچنین می‌تواند ظرفیت خمشی اعضای لوله‌ای را نیز تحت تأثیر قرار دهد [16]. علی‌رغم تمامی مطالعات انجام شده، به علت پیچیدگی موضوع قرشدگی، تاکنون ضوابط و معیارهای مشخص و ساده‌ای به منظور ارزیابی دقیق شدت قرشدگی در اعضای لوله‌ای توسط آئین‌نامه‌های مربوطه ارائه نشده است. از طرف دیگر باید توجه داشت که بررسی رفتار لوله‌های دارای قرشدگی به همراه کاهش ضخامت بسیار پیچیده می‌باشد، زیرا قرشدگی می‌تواند با ایجاد ترک‌هایی در محل کاهش ضخامت همراه باشد. در واقع خرابی‌های ایجاد شده در لوله‌های دارای قرشدگی و کاهش ضخامت، ترکیبی از تغییرشکل‌های پلاستیک و همچنین تشکیل و رشد ترک می‌باشد. این در حالی است که اثر حضور قرشدگی به همراه دیگر آسیب‌ها از جمله

طراحی و ساخته می‌شوند. در واقع با انجام مجموعه عملیات‌هایی از جمله طراحی مناسب، استفاده از مصالح مورد تایید آئین‌نامه‌ها و شیوه‌های ساخت، اجرا و کنترل‌های مناسب می‌توان ایمنی خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز را تامین نمود. علی‌رغم در نظر گرفتن تمامی موارد بالا که می‌تواند بسیاری از انواع خرابی‌های معمول در این خطوط، از جمله کمانش‌های محلی و کلی، خستگی^۲، شکست^۳، سوراخ‌شدگی^۴ و ترکیدگی^۵، ممانعت به عمل آورد، ولی همچنان امنیت و صحت کارکرد این خطوط از طرف انواع ناراستی‌ها و آسیب‌هایی که در حین بهره‌برداری رخ می‌دهند تهدید می‌شود. این تهدیدها از جمله دلایل اصلی خرابی خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز به شمار می‌آیند. بنابراین به منظور کنترل صحت و اطمینان از سرویس‌دهی این خطوط باید تمامی آسیب‌های ایجاد شده در حین بهره‌برداری به خوبی شناخته و بررسی شوند.

مطالعات گسترده‌ای بر روی علل، فراوانی رخداد و خسارات حاصل از خرابی خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز در آمریکا، اروپا، انگلیس و چین انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که یکی از مهمترین دلایل خرابی در خطوط انتقال نفت و گاز، آسیب‌های مکانیکی می‌باشد [2]. آسیب‌های مکانیکی می‌تواند به شکل قرشدگی^۶ و یا کاهش ضخامت^۷ ایجاد شود. این آسیب‌ها تحت اثر بارهای جانبی ناشی از برخورد لنگر کشتی، تجهیزات حفاری، زمین لغزش و امثال آن رخ می‌دهند. قرشدگی یک تغییرشکل پلاستیک در مقطع لوله تعریف می‌شود و منجر به تمرکز تنش و کرنش و کاهش قطر در لوله می‌گردد [3]. مهمترین پارامتر در نظر گرفته شده برای ارزیابی شدت قرشدگی در اغلب آئین‌نامه‌ها از جمله 49 CFR 192 [4] و 49 CFR 195 [5]، عمق فرورفتگی (X) می‌باشد. عمق قرشدگی به بیشترین مقدار کاهش در قطر لوله در مقایسه با قطر اولیه لوله اطلاق می‌گردد و عموماً به صورت درصدی از قطر اولیه ارائه می‌گردد (شکل 1). همچنین کاهش ضخامت به عنوان یک آسیب سطحی بر روی بدنه لوله بر اثر برخورد اجسام خارجی با لوله که منجر به کاهش ضخامت موضعی در جداره لوله می‌شود اطلاق می‌گردد. وقوع همزمان قرشدگی به همراه کاهش ضخامت در 80% مواقع منجر به خرابی ناگهانی و سریع خطوط لوله شده و خسارات مالی و زیست محیطی بسیاری را به دنبال داشته است [6].

1-1- مطالعات پیشین

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تأثیر قرشدگی بر روی رفتار سازه‌ای اعضای لوله‌ای انجام شده است. همچنین آئین‌نامه‌های مختلف، ضوابط و

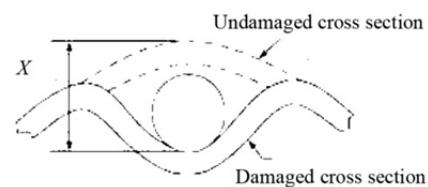


Fig. 1 Definition of the dent depth (X) [3]

شکل 1 تعریف عمق قرشدگی (X) [3]

¹ Buckling

² Fatigue

³ Fracture

⁴ Puncture

⁵ Burst

⁶ Dent

⁷ Gouge

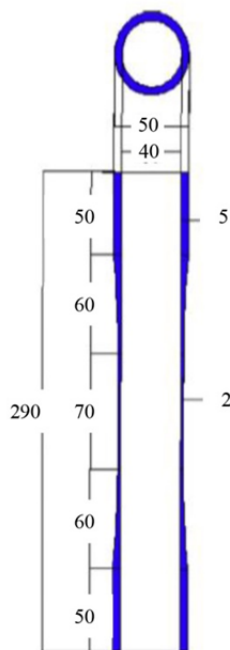


Fig. 2 Geometrical properties of the Experimental specimens (mm) [14]
 شکل 2 مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی (mm) [14]



Fig. 3 View of the preparation of tensile test coupons
 شکل 3 نمای از ساخت نمونه‌های تست کشش

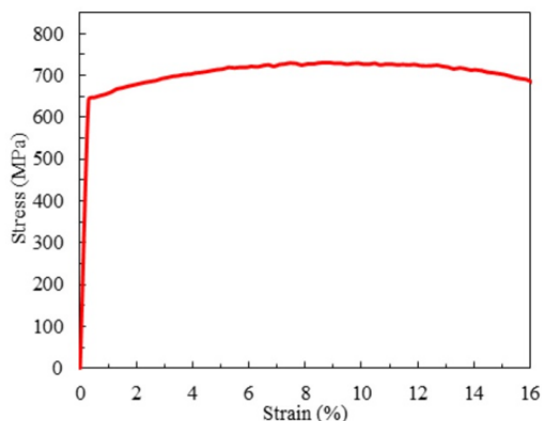


Fig. 4 Stress-Strain curve obtained by the tensile test
 شکل 4 منحنی تنش-کرنش حاصل از تست کشش

کاهش ضخامت و ترک تحت بارگذاری‌های جانبی، محوری، خمشی و تناوبی کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است.

به منظور دستیابی به یک بینش جامع در موضوع اشاره شده در بالا، که از جمله نیازهای مالکان و بهره‌برداران خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز در دنیا می‌باشد، انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی در این حیطه امری مهم و ضروری تلقی می‌گردد. از طرف دیگر مطالعات انجام شده در سال‌های گذشته عموماً بر روی فولادهای با درجه متوسط انجام شده است. این در حالی است که امروزه خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز اغلب از فولادهای با درجه مقاومت بالا (بالتر از API-5L-X70) ساخته می‌شوند. بر همین اساس، استفاده از نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در سال‌های پیشین بر روی فولادهای با درجه مقاومت متوسط، امروزه نیاز به ارزیابی و بررسی بیشتری دارد. در این تحقیق، ظرفیت باربری محوری فشاری یک‌سویه اعضای لوله‌ای فولادی (API-5L-X80) تحت فشار داخلی، دارای نواقص مکانیکی از جمله کاهش ضخامت موضعی و قرشدگی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات تنظیمات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصل شده در ادامه ارائه گردیده است.

2- تنظیمات آزمایشگاهی

1-1- هندسه و جنس نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی از لوله‌ای با قطر خارجی اولیه 50 میلی‌متر و ضخامت (t) 5 میلی‌متر تراشکاری شده‌اند. هندسه انتخابی برای نمونه‌های آزمایشگاهی مشابه با هندسه انتخابی در کارهای قبلی انجام شده توسط زین‌الدینی و همکارانش [14] می‌باشد. نمونه‌ها با طول کلی 290 میلی‌متر از 3 بخش تشکیل شده‌اند. بخش‌های ضخیم‌تر دارای ضخامت 5 میلی‌متر و طول 50 میلی‌متر می‌باشند. بخش‌های انتقالی دارای ضخامت متغیر از 5 میلی‌متر به 2 میلی‌متر و طول 60 میلی‌متر می‌باشند و بخش میانی که تحت آزمایش قرار می‌گیرد دارای ضخامت ثابت 2 میلی‌متر و طول 70 میلی‌متر می‌باشد. شکل 2 ابعاد هندسی لوله‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در واقع هندسه نمونه‌ها به نحوی انتخاب شده است تا نسبت قطر به ضخامت (D/t) در بخش میانی برابر با 22 باشد. جنس لوله‌ها از فولاد API-5L-X80 ساخته شده‌اند.

به منظور بدست آوردن مشخصات مکانیکی لوله‌های فولادی انتخاب شده، نمونه‌های تست کشش از جهت طولی لوله به وسیله دستگاه وایرکات تهیه شده و سپس تحت آزمایش کشش قرار گرفته‌اند. شکل 3 نمای از مراحل ساخت این نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. منحنی تنش-کرنش حاصل از تست کشش نیز در شکل 4 نشان داده شده است. آزمایش کشش 3 مرتبه تکرار شده و میانگین نتایج حاصل شده عبارت است از: تنش تسلیم (MPa) 640، تنش نهایی 740 (MPa) و مدول الاستیسیته (GPa) 225، لازم به ذکر است که در این تحقیق تمامی نمونه‌ها از مصالح یکسان ساخته شده‌اند.

قطر خارجی بخش میانی نمونه‌های آزمایشگاهی پس از انجام مجموعه عملیات‌های تراشکاری، و نصب کلاهک‌های انتهایی با استفاده از اسکن 3 بعدی اندازه‌گیری شده و نتایج میانگین مربوط به هریک از نمونه‌ها در جدول 1 گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار خطا در بخش قطر خارجی برابر با 0.07 میلی‌متر و در بخش طول میانی برابر با 0.09 میلی‌متر می‌باشد.

جدول 1 میانگین ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 1 Mean value of geometric characteristics for the experimental specimens				
نمونه	میانگین قطر خارجی (mm)	میانگین طول (mm)	کاهش ضخامت	بارگذاری یک‌سویه فشاری
Exp. 1	44.02	70.05	خیر	بلی
Exp. 2	44.05	70.07	خیر	بلی
Exp. 3	44.07	69.92	خیر	بلی
Exp. 4	44.02	70.06	خیر	بلی
Exp. 5	44.03	69.97	خیر	بلی
Exp. 6	44.06	70.08	خیر	بلی
Exp. 7	43.97	70.07	بلی	بلی
Exp. 8	44.04	70.09	بلی	بلی
Exp. 9	44.05	70.04	بلی	بلی
Exp. 10	44.06	69.91	بلی	بلی
Exp. 11	44.06	70.05	بلی	بلی
Exp. 12	43.96	70.06	بلی	بلی
Exp. 13	44.07	70.08	بلی	بلی
Exp. 14	44.05	70.06	خیر	بلی
Exp. 15	44.03	70.09	خیر	بلی

هندسه مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است (جدول 2). در شکل 8 میزان خطای ناشی از ماشین‌کاری در بخش اعمال کاهش ضخامت مربوط به یکی از نمونه‌ها ارائه شده است.

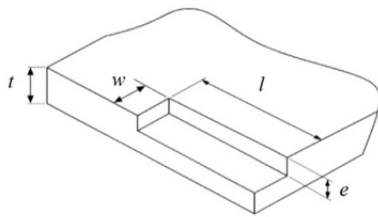


Fig. 6 Geometrical characteristics of the gouges [16]

شکل 6 پارامترهای استفاده شده جهت معرفی ابعاد کاهش ضخامت [16]



Fig. 7 Spark erosion at mid-span of the specimens

شکل 7 عمل کاهش ضخامت موضعی با استفاده از دستگاه اسپارک در بخش میانی نمونه‌ها

جدول 2 مشخصات هندسی ابعاد کاهش ضخامت‌های در نظر گرفته شده

Table 2 The geometrical characteristics of the gouges			
نمونه	$(e/t) \%$	$(l/D) \%$	$(w/t) \%$
Exp. 7	75	45	100
Exp. 8	75	45	100
Exp. 9	75	22	200
Exp. 10	50	45	100
Exp. 11	50	45	100
Exp. 12	50	22	200
Exp. 13	50	22	200

در این مطالعه، فشار داخلی با استفاده از یک سیستم مستقل اعمال فشار ایجاد شده است. این سیستم شامل یک پمپ هیدرولیک با ظرفیت (Bar) 300 می‌باشد. در ابتدا فشار داخلی با استفاده از این سیستم تا مقدار مورد نیاز افزایش داده شده و سپس ثابت باقی می‌ماند. برای جلوگیری از تغییرات فشار داخلی در حین انجام آزمایش، از یک دستگاه آکومولاتور جهت تثبیت فشار داخلی و حذف نوسانات فشار داخلی استفاده شده است. برای اعمال فشار داخلی در داخل نمونه‌ها از دو کلاهک فولادی استفاده شده است. این دو کلاهک در دو انتهای نمونه‌های آزمایشگاهی پیچ شده و در نهایت به بدنه لوله جوش داده شده است تا کلاهک‌ها با نمونه به صورت یک‌پارچه عمل کنند و از ایجاد هرگونه جابه‌جایی‌های نسبی بین کلاهک‌ها و نمونه جلوگیری شود. دو سوراخ بر روی بدنه یکی از کلاهک‌ها نیز تعبیه شده است که یکی به عنوان مسیر ورودی روغن و دیگری به عنوان ابزاری جهت انجام هواگیری اولیه در نمونه‌ها و نصب فشارسنج به منظور ثبت مقدار فشار داخلی عمل می‌کنند. شکل 5 نمایی از کلاهک‌های ساخته شده قبل و بعد از اتصال به نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار فشار داخلی (P) بر اساس تابعی از مقدار فشار تسلیم ($P_y = f_y t / R = 640 \text{ Bar}$) انتخاب شده است و این مقدار تا انتهای آزمایش ثابت نگه داشته شده است.

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، در این مطالعه رفتار محوری یک‌سویه فشاری لوله‌های دارای قرشدگی به همراه کاهش ضخامت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. کاهش ضخامت در راستای محور طولی لوله و با استفاده از دستگاه اسپارک در بخش میانی نمونه‌ها اعمال شده است. کاهش ضخامت‌های ایجاد شده با استفاده از پارامترهای عمق کاهش ضخامت (e)، طول کاهش ضخامت (l) و عرض کاهش ضخامت (w) معرفی می‌شوند (شکل 6).

شکل 7 نیز نمایی از اعمال کاهش ضخامت با استفاده از دستگاه اسپارک را بر روی بخش میانی نمونه‌ها نشان می‌دهد. ابعاد کاهش ضخامت‌های ایجاد شده با استفاده از اسکن 3 بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از اسکن سه بعدی تغییرات اندکی را در پارامترهای مربوطه از جمله عمق، عرض و طول نشان می‌دهند. در این تحقیق، تأثیر حضور کاهش ضخامت با 4

سرعت اعمال قرشدگی توسط دستگاه در حدود 2 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

مراحل انجام آزمایش را می‌توان به 6 بخش تقسیم کرد:

- 1- قرارگیری نمونه فولادی بر روی بستر زینی شکل
 - 2- اعمال فشار داخلی تا رسیدن به مقدار مورد نظر
 - 3- مماس کردن سنبه بر جداره لوله
 - 4- اعمال قرشدگی تا رسیدن به عمق مورد نظر
 - 5- باربرداری تا نقطه‌ای که سنبه از بدنه نمونه جدا شود
 - 6- اعمال بارگذاری محوری یک‌سویه فشاری
- همان‌طور که اشاره شد به منظور بررسی تأثیر عواملی همچون عمق قرشدگی، فشار داخلی، کاهش ضخامت و همچنین ابعاد کاهش ضخامت، در این بخش 13 نمونه تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای نمونه‌های دارای کاهش ضخامت و بدون کاهش ضخامت، دو عمق قرشدگی نسبی مرجع (X/D) 16% و 20% در نظر گرفته شده است. علاوه بر موارد اشاره شده، در نمونه‌های بدون کاهش ضخامت (نمونه Exp.1 الی Exp. 6) عمق قرشدگی نسبی (X/D) 9% نیز در نظر گرفته شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- قرشدگی

شکل 11 منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بخش‌های بارگذاری و باربرداری در نمونه‌های Exp. 1 الی Exp. 3 را نشان می‌دهد. حداکثر عمق قرشدگی نسبی در این نمونه‌ها برابر با 20% در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش بارگذاری یک نقطه عطف دیده می‌شود که این موضوع به دلیل ناپایداری هندسی موضعی در جداره لوله رخ داده است. در طول اعمال قرشدگی، هندسه و انحنای اولیه نمونه در حال تغییر است. این

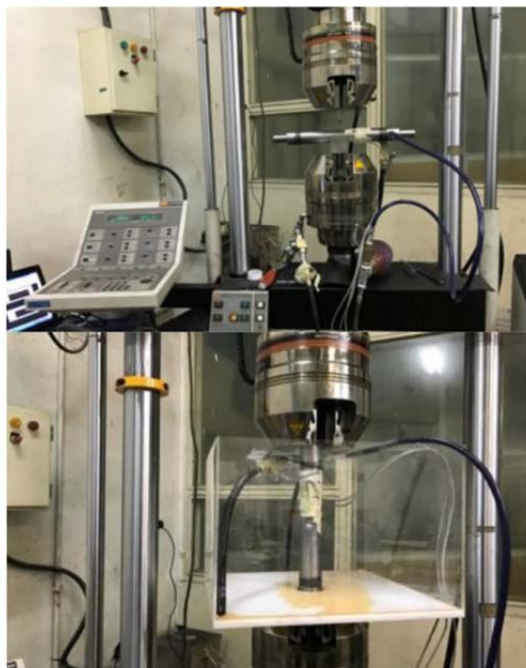


Fig. 10 View of the experimental setup (up) denting tests (down) monotonic axial compression

شکل 10 نمایی کلی از تنظیمات آزمایشگاهی (بالا) اعمال قرشدگی و (پائین) بارگذاری یک‌سویه فشاری در آزمایشگاه

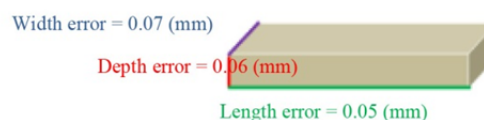


Fig. 8 the mean error values from creation of the gouge for one of the specimens obtained by 3D scan analysis

شکل 8 میانگین خطای اعمال کاهش ضخامت حاصل از انجام اسکن سه‌بعدی یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی

2-2- بستر و سنبه

به منظور اعمال قرشدگی، از یک سنبه فولادی با نوک کروی شکل از جنس فولاد CK45 استفاده شده است. در این تحقیق تنها از یک سنبه به قطر (d) 20 میلی‌متر استفاده شده است. بنابراین نسبت قطر سنبه به قطر لوله (d/D) برای تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی ثابت و برابر با 0.45 در نظر گرفته شده است. همچنین برای نگهداری نمونه‌ها در هنگام اعمال قرشدگی، یک بستر فولادی با هندسه زینی‌شکل از جنس CK45 استفاده شده است. شکل 9 ابعاد هندسی بلوک بستر لوله و سنبه را نشان می‌دهد. شعاع هندسه بستر قدری بزرگتر از شعاع لوله انتخاب شده است که در حین اعمال قرشدگی، لوله بتواند تغییر شکل آزادانه دهد و از طرفی خود بستر زینی شکل به قدری مقاوم باشد تا در برابر نیروی وارده تغییرشکلی در آن ایجاد نشود. همچنین باید توجه داشت که در هنگام اعمال قرشدگی در دو انتهای لوله هیچ قیدی وجود نداشته بنابراین می‌تواند آزادانه حرکت کنند.

2-3- روند انجام آزمایش

تمامی نمونه‌ها در بخش میانی خود، با استفاده از یک سنبه کروی تا رسیدن به عمق قرشدگی مورد نظر (X) تحت قرشدگی قرار گرفته‌اند. پس از اعمال قرشدگی، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری به صورت جابه‌جایی کنترل قرار گرفته‌اند. بارگذاری تا رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها ادامه پیدا کرده است. تمامی آزمایش‌ها در این مطالعه با استفاده از دستگاه Servo-Hydraulic Dynamic Testing System Instron 8502 انجام شده است. شکل 10 نمایی کلی از نحوه انجام آزمایش و تجهیزات به کار رفته در طول آزمایش را نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها،

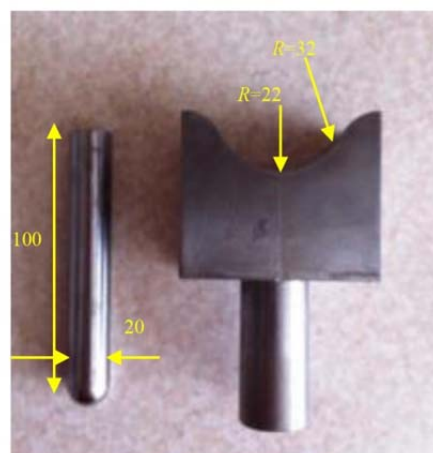


Fig. 9 Geometrical properties of the indenter and pipe bed (mm)

شکل 9 مشخصات هندسی سنبه و بستر لوله (mm)

نتایج نشان می‌دهند که رفتار کلی نمونه‌های دارای کاهش ضخامت موضعی و نمونه‌های بدون کاهش ضخامت موضعی، مشابه با یکدیگر می‌باشند. اما حضور کاهش ضخامت تا حدی بر روی مقدار F_{max} تأثیر گذاشته ولی در مقابل، تأثیر چندانی بر روی رفتار الاستیک نمونه در ناحیه باربرداری نداشته است. با توجه به جدول 3 و با مقایسه نتایج مربوط به نمونه‌های Exp. 11 و 13 که در هر دو عمق نسبی کاهش ضخامت (e/t) برابر 50% می‌باشند، می‌توان اظهار داشت که با افزایش عرض کاهش ضخامت (w) ، میزان کاهش F_{max} تشدید می‌یابد.

همچنین به منظور ارزیابی تأثیر عمق کاهش ضخامت (e) ، نمونه‌های Exp. 7 الی Exp. 9 نیز با عمق نسبی (e/t) متناظر با 75% تحت بارگذاری ناشی از قرشدگی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت (e/t) ، نیروی متناظر (F_{max}) با یک عمق قرشدگی مشخص کاهش می‌یابد. این موضوع تا حدی ادامه پیدا کرده است که در نمونه Exp. 9، قبل از رسیدن به عمق قرشدگی از پیش تعیین شده (16%)، نمونه در عمق قرشدگی معادل (X/D) 9% به دلیل ایجاد ترک در محل کاهش ضخامت به گسیختگی رسیده است.

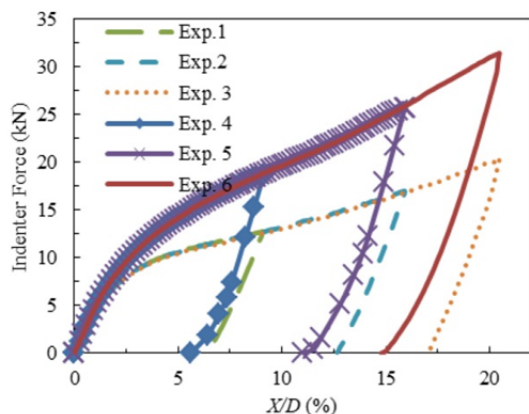


Fig. 11 Force-displacement curves obtained from Exp. 1 to Exp. 6

شکل 11 منحنی نیرو-تغییر مکان حاصل از نمونه‌های 1 الی Exp. 6.

موضوع تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا به علت مسطح شدن انحنای لوله در محل تماس با سنبه، ناپایداری سازه‌ای رخ می‌دهد. بعد از نقطه عطف، با افزایش عمق قرشدگی، نیروی متناظر با اعمال قرشدگی نیز افزایش یافته است. در واقع می‌توان اظهار داشت که نیروی اعمال قرشدگی با مقدار عمق قرشدگی رابطه مستقیم و تقریباً خطی دارد. در ادامه، همان‌طور که در شکل 11 مشخص است در مرحله باربرداری مقداری از عمق قرشدگی به صورت ارتجاعی بازگردانده می‌شود.

نمونه‌های Exp. 4 الی Exp. 6 (بدون کاهش ضخامت) که دارای فشار داخلی برابر با $0.31P_y$ می‌باشند نیز تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته‌اند. شکل 11 به مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌های بدون/با فشار داخلی می‌پردازد. با توجه به شکل واضح است که با حضور فشار داخلی، شیب بخش بارگذاری به شدت افزایش یافته است که این موضوع منجر به افزایش نیروی لازم (F_{max}) برای رسیدن به یک عمق قرشدگی مشخص شده است. به عنوان مثال، نیروی مورد نیاز برای رسیدن به عمق قرشدگی نسبی 20% در حالتی که فشار داخلی صفر است (Exp. 3)، برابر با 20.18 کیلو نیوتن می‌باشد اما این در حالی است که نیروی لازم برای حالتی که فشار داخلی وجود دارد (Exp. 6)، برابر با 31.4 کیلو نیوتن می‌باشد. همچنین حضور فشار داخلی باعث شده تا منحنی نیرو-تغییر مکان در بخش باربرداری از حالت خطی خارج شده و تبدیل به یک منحنی شود. در واقع تنش شعاعی ناشی از حضور فشار داخلی منجر به تشدید رفتار الاستیک در مرحله باربرداری شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عمق قرشدگی از شدت این موضوع کاسته می‌شود. خلاصه‌ای از نتایج حاصل شده از این بخش در جدول 3 گزارش شده است.

همان‌طور که در بخش قبلی نیز توضیح داده شد، به منظور مقایسه همه‌جانبه، نمونه‌ها پس از اتمام مرحله باربرداری، با استفاده از اسکن سه بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بخشی از نمونه‌های Exp. 3 و Exp. 6 که تحت تأثیر قرشدگی قرار گرفته‌اند در شکل 12 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با حضور فشار داخلی، ناحیه تحت تأثیر قرشدگی به شدت موضعی‌تر و محلی‌تر رفتار می‌کند و در واقع هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی کاهش می‌یابد.

جدول 3 خلاصه‌ای از نتایج حاصل از بارگذاری جانبی

Table 3 A summary of results obtained by denting tests

نمونه	(P/P_y)	کاهش ضخامت	$(X/D) \%$	نیروی قرشدگی (kN)	$(X/D)_{Residual}$	درصد بازگشت عمق قرشدگی (%)
Exp. 1	0	خیر	9	12.72	6.41	28
Exp. 2	0	خیر	16	16.96	12.64	21
Exp. 3	0	خیر	20	20.18	18.03	14
Exp. 4	0.31	خیر	9	18.67	5.61	37
Exp. 5	0.31	خیر	16	25.68	11.30	29
Exp. 6	0.31	خیر	20	31.4	14.77	26
Exp. 7	0.31	بلی	16	24.19	10.98	31
Exp. 8	0.31	بلی	20	30.50	14.16	29
Exp. 9	0.31	بلی	16	Failed	-	-
Exp. 10	0.31	بلی	16	25.15	11.03	31
Exp. 11	0.31	بلی	20	30.71	14.74	26
Exp. 12	0.31	بلی	16	24.29	10.98	31
Exp. 13	0.31	بلی	20	30.10	14.71	26
Exp. 14	0	خیر	0	-	-	-
Exp. 15	0.31	خیر	0	-	-	-

2-3- بارگذاری یک‌سویه فشاری

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در دقت آزمایش‌های انجام شده، میزان خروج از مرکزیت نیروی محوری اعمال شده توسط تجهیزات آزمایشگاهی به کار گرفته شده می‌باشد. به منظور ارزیابی میزان خروج از مرکزیت نیروی محوری اعمالی، از دو کرنش‌سنج در دو طرف نمونه‌ها استفاده شده است که شکل 14 نشان می‌دهد. این شکل تاریخیچه کرنش‌های ثبت شده در برابر زمان را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در طول اعمال نیروی محوری، کرنش طولی ثبت شده در دو سمت نمونه تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته است که این موضوع نشان از خروج از مرکزیت اندک در سیستم اعمال بارگذاری دارد.

شکل 15 به مقایسه منحنی تنش-کرنش نمونه‌های Exp. 14 و Exp. 15 تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری می‌پردازد. نمونه اول بدون حضور فشار داخلی و نمونه دوم با حضور فشار داخلی برابر با $(P/P_0=0.31)$ 200 (Bar) تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در نمونه‌ای که فشار داخلی حضور ندارد، نمونه پس از اعمال نیروی محوری فشاری در کرنش معادل $\epsilon_{yield}=0.3$ (%) و تنش معادل $f_{yield}=648$ (MPa) وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. پس از ورود به ناحیه پلاستیک، چروکیدگی‌هایی در بخش میانی رخ داده است. این چروکیدگی‌ها در ابتدا دارای دامنه اندک بوده ولی با ادامه بارگذاری‌ها این چروکیدگی‌ها افزایش پیدا کرده است و منجر به کاهش سختی محوری گردیده است. با افزایش بارگذاری نهایتاً نمونه در تنش حداکثر $f_t=740$ (MPa) و کرنش معادل $\epsilon_t=3.03$ (%) به حداکثر باربری خود رسیده است و سپس، با تجمع موضعی کرنش‌ها در یکی از چروکیدگی‌ها، نمونه ناپایدار شده است. اعمال نیروی محوری فشاری در نمونه دارای فشار داخلی نیز منتهج به رفتار مشابهی اما با مقادیر تنش کوچک‌تری شده است. باید توجه داشت که تنش کششی اولیه ایجاد شده در این نمونه به دلیل حضور فشار داخلی ایجاد شده است. نمونه مذکور در تنش فشاری حداکثر $f_t=675$ (MPa) و کرنش معادل $\epsilon_t=3.19$ (%) به حداکثر باربری خود رسیده است. در نتیجه می‌توان چنین اظهار داشت که با حضور فشار داخلی مقدار تنش حداکثر کاهش یافته ولی مقدار کرنش معادل آن افزایش می‌یابد. شکل 16 روند شکل‌گیری و رشد چروکیدگی‌ها را در نمونه Exp. 15 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چروکیدگی‌ها در بخش پائینی نمونه رشد کرده و در نهایت منجر به خرابی نمونه شده است. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در جدول 4 گزارش شده است.

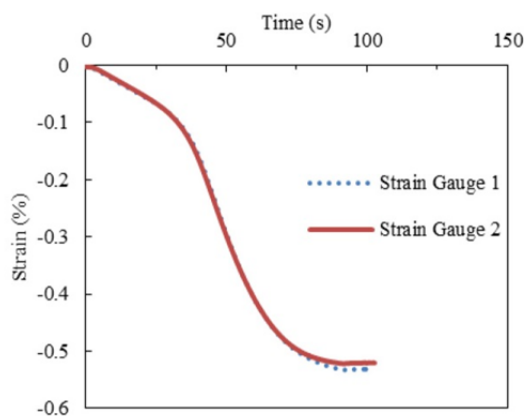


Fig. 14 Strains measured by strain gauges for Exp. 15 under monotonic axial compression

شکل 14 تاریخیچه کرنش‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها در دو سمت نمونه Exp. 15 تحت بارگذاری محوری فشاری یک‌سویه

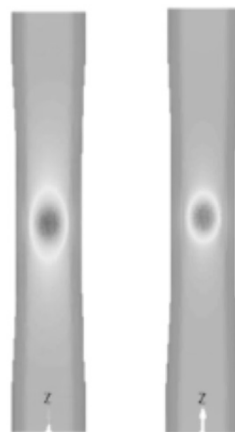


Fig. 12 The area affected by denting for the specimens (right) Exp. 6 (left) Exp. 3

شکل 12 ناحیه تحت تأثیر قرشدگی در نمونه‌های (راست) Exp. 6 و (چپ) Exp. 3

در حین آزمایش‌ها، از دو کرنش‌سنج یکی در جهت طولی (SG1) و دیگری در جهت شعاعی (SG2) به منظور ارزیابی توزیع کرنش‌های ناشی از اعمال قرشدگی در اطراف ناحیه قرشده استفاده شده است. کرنش‌سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع YEFLA بوده که قادر به ثبت کرنش‌های پلاستیک تا مقادیر 8% می‌باشد. تلاش بر آن بوده است که کرنش‌سنج‌ها به نحوی جانمایی شوند تا حداکثر کرنش را در جهت طولی و شعاعی ثبت کنند. نتایج عددی نشان دادند که حداکثر کرنش در حاشیه نزدیک به مرکز قرشدگی رخ می‌دهد. البته باید توجه داشت که کرنش‌سنج‌ها نباید با سنبه تماس داشته باشند، زیرا که این موضوع می‌تواند موجب از دست رفتن کرنش‌سنج در حین آزمایش‌ها شود. در نهایت موقعیت دقیق کرنش‌سنج‌ها با توجه به نتایج عددی و در نقاطی انتخاب شده‌اند که مقادیر کرنش‌ها قابل توجه باشند. شکل 13 به مقایسه کرنش‌های طولی و شعاعی حاصل شده از نمونه‌های Exp. 3 و Exp. 6 می‌پردازد. در این شکل، محور افقی بیانگر مقدار جابجایی سنبه و محور قائم بیانگر مقدار کرنش ثبت شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که با حضور فشار داخلی، مقادیر کرنش در جهت‌های طولی و شعاعی افزایش می‌یابند که این موضوع با توجه به موضعی شدن ناحیه تحت تأثیر قرشدگی در نمونه‌های دارای فشار داخلی قابل توجیه می‌باشد. در شکل 13 توجه شود که به ازای کرنش 4.7 درصد، کرنش‌سنج در جهت طولی از روی نمونه جدا شده است.

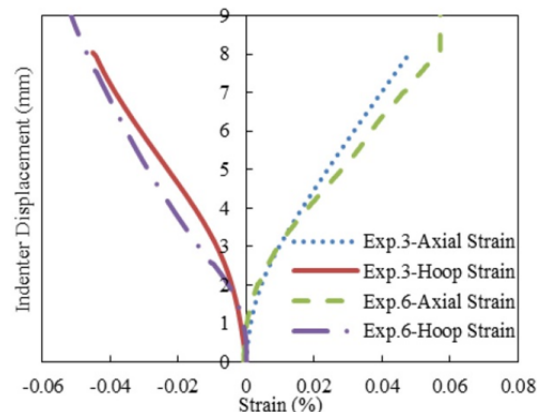


Fig. 13 Axial and hoop strain corresponding to Exp. 3 and Exp. 6

شکل 13 کرنش‌های طولی و شعاعی مربوط به نمونه‌های Exp. 6 و Exp. 3

درصد و بدون حضور فشار داخلی را نشان می‌دهد. همچنین شکل 18، نتایج حاصل از نمونه‌های بدون حضور فشار داخلی را با نمونه‌های دارای فشار داخلی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با حضور قرشدگی تنش حداکثر قابل تحمل (f_t) توسط اعضای استوانه‌ای و کرنش معادل آن (ϵ_t) کاهش می‌یابد. از طرفی ظرفیت باربری الاستیک (f_{yield}) در نمونه‌ها با توجه به ایجاد لنگر خمشی ناشی از قرشدگی در عضو نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، یک قرشدگی با عمق نسبی (X/D) 12٪، ظرفیت باربری نهایی را در حدود 10٪ و کرنش معادل آن را در حدود 28٪ کاهش می‌دهد که این موضوع با افزایش عمق قرشدگی شدت می‌یابد. البته باید توجه داشت که از شدت اثرات کاهش قرشدگی، با حضور فشار داخلی کاسته می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌های Exp. 6 و Exp. 15 مشاهده می‌شود که با حضور قرشدگی با عمق نسبی (X/D) 14٪، تنش حداکثر در حدود 7٪ و کرنش معادل آن تنها در حدود 6٪ کاهش یافته است.

به منظور بررسی تأثیر کاهش ضخامت موضعی بر روی رفتار یک‌سویه فشاری، نمونه‌های Exp. 7 الی Exp. 13 نیز تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که رفتار نمونه‌های دارای کاهش ضخامت نیز مشابه با نمونه‌های بدون کاهش ضخامت می‌باشد و حضور آسیب‌های سطحی تأثیر چندانی بر روی ظرفیت باربری نهایی و الاستیک نمونه‌ها ندارد. اما با حضور کاهش ضخامت، کرنش معادل ظرفیت باربری نهایی (ϵ_t) کاهش یافته است و این موضوع با افزایش در عمق کاهش ضخامت (e/t) تشدید پیدا کرده است.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای و همچنین رفتار اعضای لوله‌ای دارای قرشدگی با حضور فشار داخلی و کاهش ضخامت موضعی تحت بارگذاری محوری یک‌سویه فشاری به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با حضور فشار داخلی، مقاومت جانبی اعضای لوله‌ای برای رسیدن به یک عمق قرشدگی مشخص و میزان بازگشت ارتجاعی عمق قرشدگی در مرحله باربرداری به شدت افزایش می‌یابد و همچنین بخش کمتری از لوله تحت تأثیر قرشدگی قرار می‌گیرد. همچنین مشاهده شد که حضور کاهش ضخامت موضعی بر روی بدنه نمونه‌ها، ظرفیت باربری جانبی اعضای لوله‌ای را تا حدی کاهش می‌دهد اما این موضوع تأثیر چندانی بر روی بازگشت عمق قرشدگی در مرحله باربرداری ندارد.

نتایج حاصل از بخش 2-3 نیز نشان دادند که با حضور فشار داخلی، ظرفیت باربری نهایی فشاری اعضای لوله‌ای کاهش یافته است، اما کرنش معادل آن افزایش پیدا می‌کند. چروکیدگی‌هایی در بخش میانی نمونه‌ها تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری ایجاد شده است که با افزایش بارگذاری این چروکیدگی‌ها گسترده‌تر شده و در نهایت منجر به خرابی نمونه می‌گردند.

با حضور قرشدگی تنش حداکثر قابل تحمل (f_t) توسط اعضای استوانه‌ای و کرنش معادل آن (ϵ_t) کاهش می‌یابد. از طرفی ظرفیت باربری الاستیک (f_{yield}) در نمونه‌ها با توجه به ایجاد لنگر خمشی ناشی از قرشدگی در عضو نیز کاهش می‌یابد. البته شایان ذکر است که از شدت اثرات کاهش قرشدگی، با حضور فشار داخلی کاسته می‌شود. همچنین می‌توان اظهار داشت که حضور کاهش ضخامت موضعی بر روی بدنه لوله، تأثیر زیادی بر روی ظرفیت باربری نهایی (f_t) و ظرفیت باربری الاستیک (f_{yield}) ندارد، اما منجر به کاهش کرنش معادل ظرفیت باربری نهایی اعضا (ϵ_t) می‌گردد و این موضوع با افزایش عمق کاهش ضخامت (e) نیز تشدید می‌یابد.

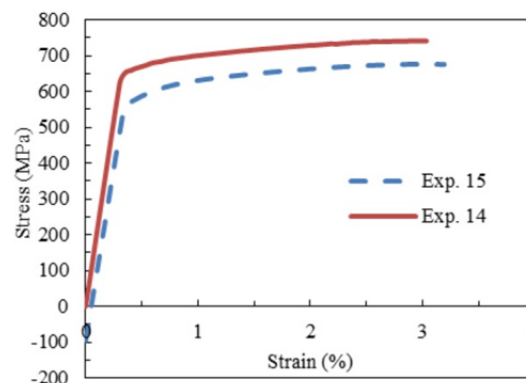


Fig. 15 Stress-strain response of intact specimens (Exp. 14 and Exp. 15) under axial compression

شکل 15 منحنی تنش کرنش نمونه‌های سالم Exp. 14 و Exp. 15 تحت بارگذاری یک‌سویه فشاری

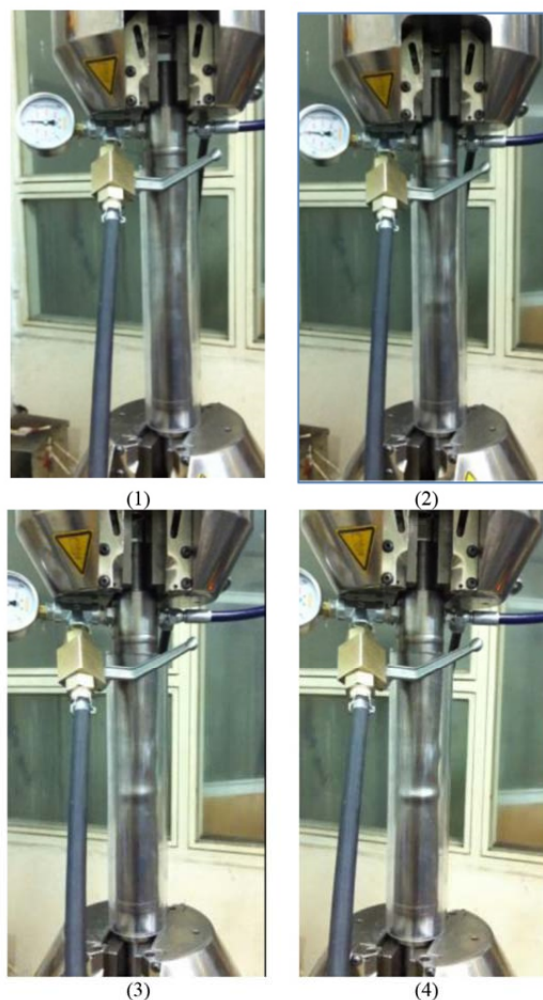


Fig. 16 Evolution and growth of wrinkling (Exp. 15)

شکل 16 روند شکل‌گیری و رشد چروکیدگی در نمونه Exp. 15

همان‌طور که اشاره شد، مقداری از عمق قرشدگی اعضای استوانه‌ای پس از باربرداری به صورت ارتجاعی بازگردانده می‌شود. به همین جهت عمق‌های قرشدگی در نظر گرفته شده در این بخش بر مبنای عمق قرشدگی باقی مانده در نمونه می‌باشد. شکل 17 منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های سالم و دارای قرشدگی با عمق‌های نسبی $(X/D)_{Residual}$ 6، 12 و 18

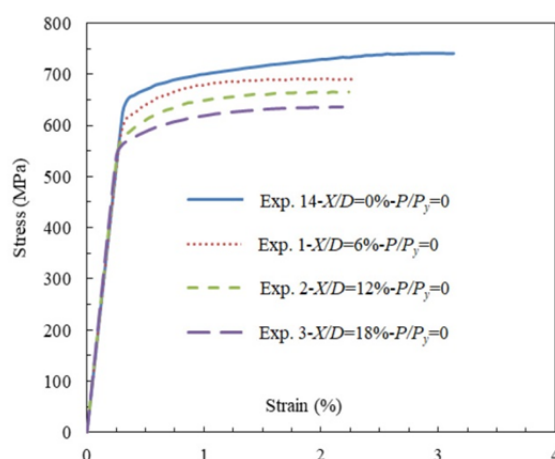


Fig. 17 Stress-strain curves of intact and dented specimens in the absence of internal pressure

شکل 17 منحنی تنش-کرنش نمونه‌های سالم و دارای فرسودگی بدون حضور فشار داخلی

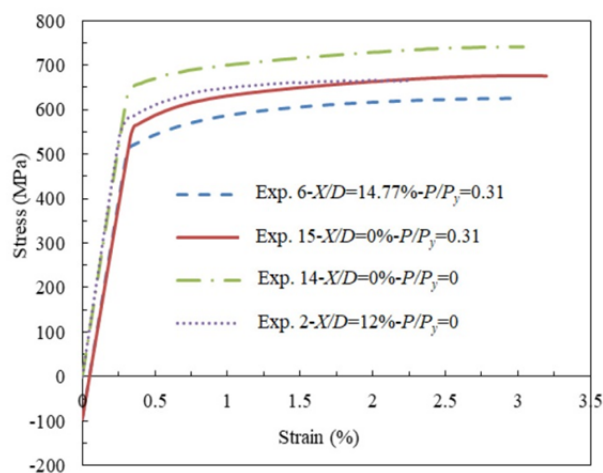


Fig. 18 Comparison of stress-strain responses of pressurized/un-pressurized specimens

شکل 18 مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های بدون/دارای فشار داخلی

جدول 4 خلاصه نتایج حاصل از بارگذاری یک‌سویه فشاری

Table 4 Summary of results obtained by axial compression tests

F_{yield} (MPa)	ε_L (%)	f_L (MPa)	$(X/D)_{Residual}$ %	w/t (%)	l/D (%)	e/t (%)	P/P_y	نمونه
609	2.30	689.00	6.41	0	0	0	0	Exp. 1
576	2.23	665.33	12.64	0	0	0	0	Exp. 2
559	2.13	636.07	18.03	0	0	0	0	Exp. 3
561	3.10	658.24	5.61	0	0	0	0.31	Exp. 4
531	3.05	634.64	11.30	0	0	0	0.31	Exp. 5
517	2.98	625.35	14.77	0	0	0	0.31	Exp. 6
520	2.21	619.74	10.98	100	45	75	0.31	Exp. 7
508	2.16	606.60	14.16	100	45	75	0.31	Exp. 8
-	-	-	Failed	200	22	75	0.31	Exp. 9
522	2.70	625.48	11.03	100	45	50	0.31	Exp. 10
515	2.77	618.00	14.74	100	45	50	0.31	Exp. 11
523	2.62	624.73	10.98	200	22	50	0.31	Exp. 12
513	2.53	615.86	14.71	200	22	50	0.31	Exp. 13
638	3.03	740.60	0	0	0	0	0	Exp. 14
586	3.19	675.51	0	0	0	0	0.31	Exp. 15

5- مراجع

- [9] T. L. Anderson, D. A. Osage, API 579: A comprehensive fitness-for-service guide, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, No. 14, pp. 953-963, 2000.
- [10] P. Roovers, R. Bood, M. Galli, U. Marewski, M. Steiner, M. Zaréa, EPRG methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage, *Proceeding of the 3rd International Pipeline Technology Conference*, Vol. 2, pp. 405-425, Brugge, Belgium, May 21-24, 2000.
- [11] M. Zeinoddini, M. Ezzati, G. Parke, Plastic buckling, wrinkling and collapse behaviour of dented X80 steel line pipes under axial compression, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 38, pp. 67-78, 2015.
- [12] T. G. Ghazijahani, H. Jiao, D. Holloway, Experimental study on damaged cylindrical shells under compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 80, pp. 13-21, 2014.
- [13] T. G. Ghazijahani, H. Jiao, D. Holloway, Plastic buckling of dented steel circular tubes under axial compression: An experimental study, *Thin-Walled Structures*, Vol. 92, pp. 48-54, 2015.
- [14] M. Zeinoddini, M. Ezzati, J. Fakheri, Uniaxial strain ratcheting behavior of dented steel tubular: An experimental study, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 44, pp. 202-216, 2014.
- [15] M. Azadeh, F. Taheri, Ratcheting response of dented pipes under monotonic and cyclic axial loadings, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 49, No. 2, pp. 122-132, 2014.
- [16] J. Blachut, I. Iflefel, Collapse of pipes with plain or gouged dents by bending moment, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, No. 9, pp. 560-571, 2007.
- [1] P. Hopkins, *The structural integrity of oil and gas transmission pipelines, Comprehensive Structural Integrity*, pp. 3-7, U.K., Elsevier Publishers Penspen Ltd., 2002.
- [2] L. Dai, D. Wang, T. Wang, Q. Feng, X. Yang, analysis and comparison of long-distance pipeline failures, *Journal of Petroleum Engineering*, Vol. 2017, Article No. 3174636, 7 pages, 2017.
- [3] M. Allouti, C. Schmitt, G. Pluvinae, J. Gilgert, S. Hariri, Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 21, No. 3, pp. 40-51, 2012.
- [4] Code of Federal Regulations, 49CFR part 192, *Transportation of Natural and Other Gases by Pipeline*, Revision 02/10, Current through 192-113c, Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, Department of Transportation, 2010.
- [5] Code of Federal Regulations, 49CFR part 195, *Transportation of hazardous liquids by pipeline*, Revision 02/10, Current through 195-92c, Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, Department of Transportation, 2010.
- [6] M. J. Rosenfeld, Factors to consider when evaluating damage on pipelines, *Oil & Gas Journal*, Vol. 100, No. 37, 9 pages, 2002.
- [7] P. Hopkins, D. Jones, A. Clyne, The significance of dents and defects in transmission pipelines, *International Conference on Pipework, Engineering and Operations*, London, UK., pp. 137-145, February 1989.
- [8] D. Jones, The significance of mechanical damage in pipelines, *3R International Conference*, Jahrgang, Heft, pp. 347-354, July 7, 1982.