

مدل‌سازی آزمایشگاهی کمانش موضعی خطوط لوله‌ی دریایی دارای خوردگی تحت بارگذاری محوری متناوب

محمد پیکانو* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مصطفی زین‌الدینی (دانشیار)

محمد متمدنی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۲ (۱۳۹۲)
دربی ۲ - ۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۱۷-۲۴

در طول عمر خطوط انتقال نفت و گاز فراساحلی، به علل مختلف، امکان قطع و وصل سیستم انتقال نفت و گاز وجود دارد. این قطع و وصل در خط باعث ایجاد کشش و فشار می‌شود، که می‌توانند به چین خوردگی، کمانش غیرخطی موضعی، یا خرابی خمیری پیش‌رونده منجر شوند. از طرف دیگر، مکانیزم‌های دیگر خرابی مثلاً خوردگی رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و در نهایت خرابی در لوله شود. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی، پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده در خطوط لوله‌ی خوردده‌شده‌ی دریایی تحت بارگذاری متناوب محوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که در نمونه‌های دارای خوردگی امکان بروز خرابی پیش‌رونده به میزان زیادی تشدید می‌شود.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، بارگذاری تناوبی، لوله‌های دارای خوردگی، چین خوردگی.

۱. مقدمه

لوله‌های دریایی از جمله اجزای اصلی صنعت نفت و گاز فراساحلی هستند. این لوله‌های انتقال به‌طور گسترده در مناطق مختلف دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌علاوه، همواره تلاش شده است حجم بیشتری از فرآورده‌های نفتی با استفاده از یک خط لوله انتقال داده شوند تا موجبات صرفه‌جویی اقتصادی فراهم شود. در نتیجه مواد تحت فشار و حرارت بیشتری در داخل لوله‌ها انتقال می‌یابند که به نوبه‌ی خود باعث افزایش نیروهای وارد بر لوله می‌شود.

در آب‌های دوراز ساحل، معمولاً خط لوله به‌صورت غیرمدفون اجرا می‌شود. در قسمت‌هایی از خط (Feed in Length) انباشتگی اصطکاک لوله با بستر دریا مانع از حرکت طولی لوله می‌شود. در حد فاصل این قسمت‌ها تحت تناوب‌های حرارت و فشار یک نیروی محوری در لوله ایجاد می‌شود که با وجود انحنای اولیه در خط لوله باعث ایجاد کمانش موضعی، کمانش کلی عرضی، و یا کمانش کلی رو به بالا یا پایین خواهد شد. یک طراحی رایج برای مدل‌سازی رفتار کمانش جانبی خط لوله، شامل حرکات جانبی کنترل‌شده‌ی لوله تحت دوره‌های فشار / حرارت بیشتر از ۱۰۰ بار در طول عمر خط است.^[۱] بنابراین پیش‌بینی رفتار و مدل‌سازی مناسب برای ارزیابی مقاومت لوله‌ی تحت نیروهای محوری متناوب حائز اهمیت است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۱۳، پذیرش ۱۳۹۱/۶/۲۰.

mpeykanu@yahoo.com
zeinoddini@kntu.ac.ir
m_motamedi@sina.kntu.ac.ir

از طرف دیگر، به دلیل ماهیت خوردده‌ی محیط دریا و نیز سیال داخل لوله، با افزایش زمان بهره‌برداری از خط لوله امکان بروز خوردگی در لوله افزایش می‌یابد. این خوردگی‌ها می‌توانند دارای عمق و اشکال متفاوت باشند و بر روی سطح بیرونی یا درونی خط لوله ایجاد شوند.

مسئله‌ی کمانش موضعی لوله‌های تحت بارگذاری متناوب محوری، توسط پژوهشگران مختلف مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه، پژوهشگران در سال ۲۰۱۰ پدیده‌ی ایجاد چین خوردگی‌های موضعی در عضو لوله‌ی تحت بارگذاری تناوبی خمشی و با حضور فشار داخلی را مورد بررسی قرار داده‌اند.^[۱] در سال ۲۰۰۹ نیز بحث کمانش خمیری و خرابی موضعی لوله‌ی تحت بارگذاری متناوب حرارت و فشار که نهایتاً به ایجاد چین خوردگی و تغییر شکل‌های خمیری پیش‌رونده منجر می‌شود، مورد توجه قرار گرفته است.^[۱] همچنین در سال ۲۰۰۸ موضوع کاهش مقاومت و کمانش اعضای لوله‌ی تحت بارگذاری خمشی تناوبی به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.^[۲] در سال ۲۰۰۶ نیز علاوه بر نیروی محوری خالص، تأثیر نیروی محوری توأم با فشار داخلی به روش آزمایشگاهی،^[۳] و پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده و ایجاد اعوجاج و در نهایت خرابی کلی در یک بارگذاری یک سویه مورد بررسی قرار گرفت.^[۵]

همچنین علاوه بر مسئله‌ی کمانش موضعی و خرابی پیش‌رونده، بحث مقاومت در لوله‌های دارای خوردگی فراساحلی به شکل گسترده‌ی بررسی شده است. برای مثال در سال ۲۰۱۰ به بررسی فشار خرابی بر روی خطوط لوله‌ی دارای خوردگی

۳. آماده‌سازی نمونه‌ها و تنظیمات آزمایش

۱.۳. تراشکاری نمونه‌ها

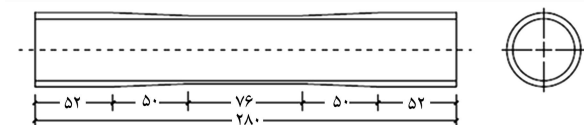
ابعاد و اندازه‌ی نمونه‌های مورد آزمایش بسیار نزدیک به آزمایش پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۱] در نظر گرفته شده است. اشاره به این نکته ضروری است که در پژوهش مذکور خوردگی در نظر گرفته نشده است که این موضوع در این نوشتار مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا نمونه‌ها با دستگاه فرز به طول‌های ۳۰ سانتی‌متر از لوله‌ی مادر بریده شده است (شکل ۲). این اندازه کمی بیشتر از اندازه‌ی نمونه‌ی اصلی موردنظر است. سپس نمونه‌ی موردنظر با استفاده از دستگاه تراش، تراشکاری شده است. به‌منظور کاهش ناراستی‌های موجود در لوله ابتدا لوله‌ها از داخل و خارج، ماشین‌کاری شده است. بعد از ماشین‌کاری قطعات از داخل و خارج، میزان خروج از محوریت به $3 \text{ mm} \pm 0.07$ کاهش می‌یابد. در واقع این عدد بدین معناست که میزان خطای ساخت در قطعات از 3×10^{-3} میلی‌متر کمتر است. در ادامه، دو انتهای لوله بر دو وجه دیگر گونیا و طول نهایی نمونه برابر ۲۸۰ میلی‌متر می‌شود. ابعاد هندسی نمونه در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه‌ی مورد آزمایش شامل سه بخش است:

- دو بخش انتهایی دارای بیشترین ضخامت است که معادل ضخامت لوله‌ی مادر است (طولی برابر ۵۲ میلی‌متر).
- بخش میانی که در وسط نمونه قرار دارد، دارای ضخامتی برابر با ۲ میلی‌متر است (طولی برابر ۷۶ میلی‌متر).
- دو بخش واسط که دو بخش انتهایی را با یک شیب ثابت به بخش میانی متصل می‌کند (طولی برابر ۵۰ میلی‌متر).

بخش واسط که در واقع بخش میانی و دو بخش انتهایی لوله را به یکدیگر متصل می‌کند، یک انتقال تنش ملایم میان دو ناحیه برقرار و از اثرات تمرکز تنش جلوگیری می‌کند. ابعاد نمونه‌ها بعد از ماشین‌کاری به کمک کولیس کنترل و اندازه‌ی نمونه‌ها گزارش شده است (شکل ۳).

۲.۳. اعمال خوردگی

به‌منظور ایجاد و مدل‌سازی خوردگی در نمونه‌های ساخته‌شده، از دستگاه CNC استفاده شده است. این دستگاه در سه محور اصلی قابلیت جابه‌جایی دارد و با حرکت در این سه محور و با استفاده از مته‌ی مخصوص، شکل خوردگی موردنظر را با دقت صدم میلی‌متر ایجاد می‌کند (شکل ۴). در آزمایش‌های گزارش‌شده در این نوشتار، عمق خوردگی برابر ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی محیطی خوردگی برابر ۶۰ درجه انتخاب شده است.



شکل ۲. ابعاد هندسی از نمونه‌ی ساخته‌شده (ابعاد mm).

از نوع باریک و بلند،^[۶] و در سال ۲۰۰۸ هم به مسئله‌ی فشار خرابی لوله‌های خورده‌شده که در معرض فشار خارجی قرار گرفته‌اند، پرداخته شده است.^[۷] در سال ۲۰۰۷ نیز در مقاله‌ی اثر خوردگی در فشار خرابی لوله،^[۸] و در سال ۲۰۰۵ فشار آستانه‌ی کمانش پیش‌رونده در لوله‌های دارای خوردگی با استفاده از تحلیل خمیری - صلب به شکل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.^[۹] همچنین در سال ۲۰۰۶ به بررسی کمانش پیش‌رونده در لوله‌های واقع در کف دریا و دارای خوردگی تحت اثر فشار هیدرواستاتیک خارجی، با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی پرداخته شده است.^[۱۰] در سال ۲۰۰۴ نیز لنگر خمشی قابل تحمل برای یک لوله‌ی دارای خوردگی موضعی مورد مطالعه قرار گرفته و معادله‌ی جدید ارائه شده است.^[۱۱]

مطابق بررسی انجام‌شده در این نوشتار، موضوع خرابی خمیری پیش‌رونده در لوله‌های خورده‌شده تحت بار محوری متناوب است، که در پژوهش‌های گذشته مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش رفتار خرابی خمیری پیش‌رونده‌ی لوله‌های فولادی سالم و دارای خوردگی تحت بارگذاری متناوب و یک سویه با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

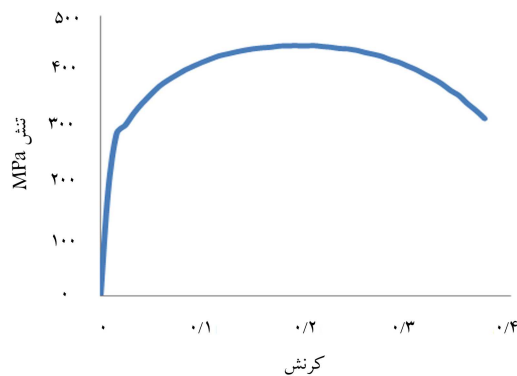
۲. آزمایش تعیین خواص مواد

۱.۲. رفتار یک سویه‌ی مواد

نمونه‌های آزمایش از لوله‌ی بدون درز از جنس فولاد کربنی از رده‌ی X۴۲/B، دارای قطر اسمی خارجی ۵۹/۴ میلی‌متر و ضخامت اسمی ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور شناخت مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده، دو نمونه‌ی استاندارد برای انجام آزمایش استاندارد کوپن از لوله‌ی مادر، به‌وسیله‌ی دستگاه Wire Cut برش‌کاری و ساخته شده است؛ و با استفاده از دستگاه کشش، تحت کشش یک سویه قرار گرفته است. یک نمونه از نمودارهای تنش - کرنش کششی نمونه در شکل ۱ و مشخصات مکانیکی لوله در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لوله.

نوع مصالح	تنش تسلیم (MPa)	کرنش گسیختگی (%)	قطر داخلی (mm)	ضخامت (mm)	D/t
نوع ۱	۲۹۷	۳/۸	۴۹/۲	۸	۶/۳۵



شکل ۱. نمودار تنش - کرنش آزمایش کشش نمونه.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از CMM.

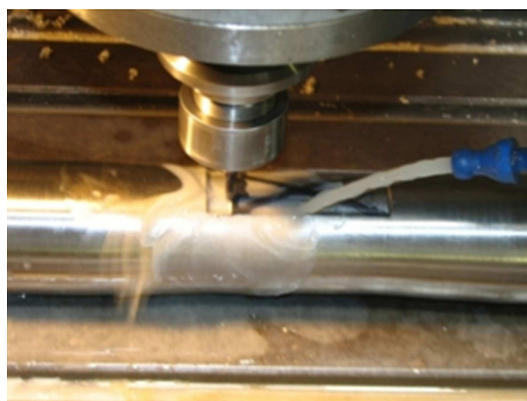
نمونه	L (mm)	t (mm)	α (°)	OD (mm)	ID (mm)	طول کل نمونه (mm)
CM1	۷۶٫۶۴	۰٫۹۹۱	۵۸٫۸۳	۵۳٫۸۰	۴۹٫۸۰	۲۷۹٫۹۶۸
CC1	۷۶٫۲۴	۱٫۰۳۶	۵۸٫۸۷	۵۳٫۷۳	۴۹٫۸۰	۲۷۹٫۹۳۴
CC2	۷۶٫۱۰	۱٫۰۹۳	۵۹٫۰۷	۵۳٫۷۳	۴۹٫۸۰	۲۷۹٫۹۸۳
CC3	۷۶٫۱۰	۱٫۰۹۳	۵۹٫۰۷	۵۳٫۸۰	۴۹٫۷۳	۲۷۹٫۹۸۳
CC4	۷۶٫۱۲	۱٫۰۷۶	۵۹٫۰۳	۵۳٫۸	۴۹٫۸	۲۷۹٫۹۸۶

جدول ۳. مشخصات کلی آزمایش‌های متناوب انجام شده بر روی نمونه‌های سالم.

شماره‌ی نمونه	کرنش آغازین (%)	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	نرخ رشد کرنش (%)	تعداد تناوب اعمال شده
IM	-	-	-	-	-
IC1	۲	۱۹۲	۱۵۳	۰٫۱۲	۲۰۰ (Collapse)
IC2	۲	۲۳۸	۱۱۰	۰٫۰۳۵	۱۳۵
IC3	۰٫۰۳	۱۹۲	۱۱۰	۰٫۰۱۴	۹۸
IC4	۴	۱۹۲	۱۸۵	۰٫۳	۴ (Collapse)



شکل ۳. اندازه‌گیری و کنترل ابعاد لوله‌ها با کولیس.



شکل ۴. برش‌کاری و ایجاد خوردگی با دستگاه CNC روی قطعه‌ی مورد نظر.



شکل ۵. شکل کلی و کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی نمونه‌ی دارای خوردگی.

اهمیت خاصی دارد. به منظور ثبت و قرائت این کرنش‌ها، از یک دستگاه ثبت کننده داده^۲ استفاده شده است.

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اعمال بار متناوبی فرمان پذیر هیدرولیکی^۳ تحت بارگذاری یک سوپه و تناوبی قرار می‌گیرند. این دستگاه از نوع Instron ۸۵۰۲ است. بارکلی وارد بر نمونه و جابه‌جایی کلی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Instron قابل اندازه‌گیری است. به منظور اعمال بار به شکل کاملاً محوری، از یک قطعه‌ی هم‌راستا کن استفاده شده است. شکل کلی و تنظیمات آزمایشگاهی در شکل ۵ ارائه شده است.

۳.۳. اندازه‌گیری دقیق نمونه‌ها

با توجه به شکل نسبتاً پیچیده‌ی خوردگی و لزوم اندازه‌گیری دقیق این بخش، استفاده از کولیس ممکن نیست. به منظور حل این مشکل از دستگاه (CMM) استفاده شده است. این دستگاه با دقتی برابر با صدم میلی‌متر با استفاده از بخش متحرک این دستگاه که قابلیت حرکت در ۳ راستای z، y و x را دارد، هندسه و نیم‌رخ موجود را به داده‌های دیجیتال تبدیل و در یک فایل اتوکد ذخیره می‌کند. نتایج به دست آمده از دستگاه CMM مربوط به ۵ نمونه‌ی آزمایش ارائه شده است. (جدول ۲)

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، زاویه‌ی محیطی خوردگی بیشینه‌ی خطایی برابر ۱/۱۹٪ نسبت به مقدار نظری دارد، همچنین با بررسی نتایج CMM بیشترین خطا در عمق خوردگی ۰/۹٪ نسبت به ضخامت نظری است. در راستای طولی نیز در این ناحیه خطایی مشاهده می‌شود. شکل خاص متی دستگاه CNC موجب ایجاد انحنایی در نقاط انتهایی نمونه، نسبت به ابعاد نظری که گونیا هستند، می‌شود.

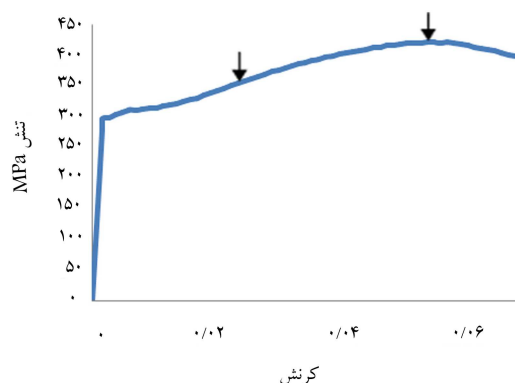
۴.۳. سیستم‌های اندازه‌گیری و تجهیزات اعمال بار

به منظور ثبت داده و اطلاعات مربوط به کرنش‌های موضعی نمونه‌ها، از کرنش‌سنج به فاصله‌ی ۹۰ درجه در بخش میانی نمونه استفاده شده است. این کرنش‌سنج‌ها علاوه بر ثبت کرنش‌های موضعی، میزان خروج از محوریت احتمالی بار محوری را نیز ثبت می‌کند. ثبت موضعی کرنش خصوصاً از روی نمونه‌های دارای خوردگی

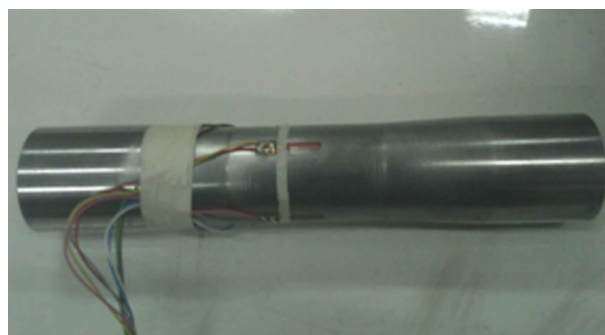
۴. نتایج آزمایشگاهی - بارگذاری یک سویه‌ی محوری

فشاری ۱.۴. نمونه‌ی سالم

شکل ۶، نمودار تنش - کرنش کلی مربوط به نمونه‌ی سالم تحت بار یک سویه‌ی به دست آمده از دستگاه Instron را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در محدوده‌ی کرنش (کلی ۲٪)، چین‌خوردگی‌های اولیه در نمونه ایجاد می‌شود. در ابتدا دامنه‌ی این چین‌خوردگی‌ها در راستای شعاعی لوله ثابت و کم است. با ادامه‌ی بارگذاری و رشد کرنش کلی نمونه تا نقطه‌ی تنش بیشینه (تنش نهایی)، که کرنشی در حدود ۵٪ دارد، دامنه‌ی چین‌خوردگی‌ها پس از نقطه‌ی تنش نهایی همراه با کاهش تنش افزایش می‌یابد. افزایش دامنه‌ی شعاعی چین‌خوردگی‌ها منجر کاهش سختی محوری می‌شود (شکل ۷). با افزایش روند رشد دامنه‌ی چین‌خوردگی‌ها،



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی سالم (محل ایجاد چین‌خوردگی‌های اولیه و تشدید این چین‌خوردگی‌ها).

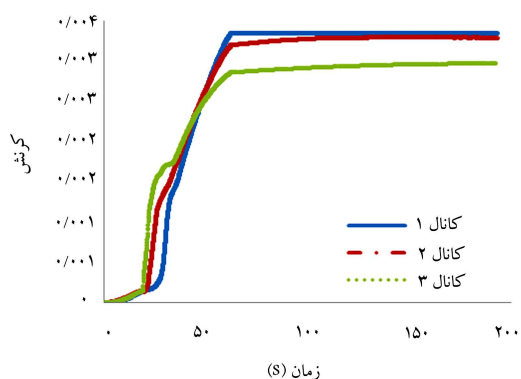


شکل ۷. نمونه‌ی سالم مورد آزمایش قبل و بعد از اعمال بار محوری (چین‌خوردگی‌های ایجاد شده).

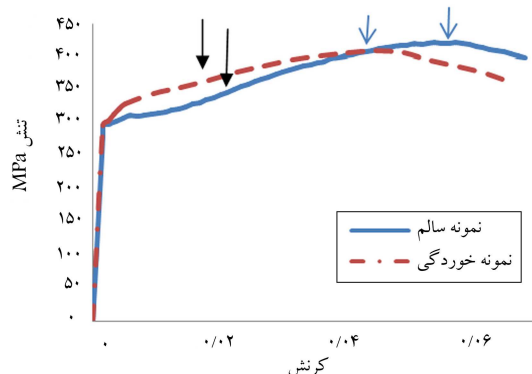
در سازه‌ی کماتش موضعی کلی و در نهایت خرابی رخ می‌دهد. براساس کرنش‌های ثبت شده از کرنش‌سنج‌ها می‌توان تاریخچه‌ی زمانی کرنش موضعی نمونه را ترسیم کرد (شکل ۸). این نمودارها نشان‌دهنده‌ی اعمال بار به شکل نسبتاً محوری بر روی نمونه‌هاست.

۲.۴. نمونه‌ی دارای خوردگی

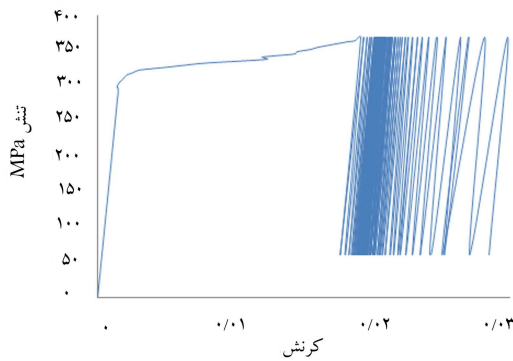
یک آزمایش با بارگذاری محوری یک سویه‌ی فشاری به منظور بررسی رفتار نمونه‌ی دارای خوردگی و مقایسه‌ی آن با رفتار نمونه‌ی سالم به صورت جابه‌جایی - کنترل انجام شده است. نمونه‌ی مورد نظر دارای خوردگی با زاویه‌ی محیطی ۶۰ درجه و عمق ۱ میلی‌متر است. به علت وجود خوردگی، وقوع چین‌خوردگی اولیه، نسبت به نمونه‌ی سالم، سریع‌تر انجام می‌شود. چین‌خوردگی موضعی اولیه مطابق نمودار تاریخچه‌ی زمانی کرنش در حدود کرنش ۱۵٪ در ناحیه‌ی دارای خوردگی ایجاد می‌شود (شکل ۹). با توجه به اینکه چین‌خوردگی‌های اولیه ابتدا در ناحیه‌ی دارای خوردگی ایجاد و سپس به بخش سالم توسعه پیدا می‌کنند، در نتیجه امکان خرابی در ناحیه‌ی خورده شده تشدید خواهد شد (شکل ۱۰). براساس نمودار تاریخچه‌ی زمانی کرنش (شکل ۱۱)، ابتدا کرنش در ناحیه‌ی دارای خوردگی، سپس در ناحیه‌ی میانی، و در نهایت در ناحیه‌ی سالم وارد بخش غیرخطی شده است.



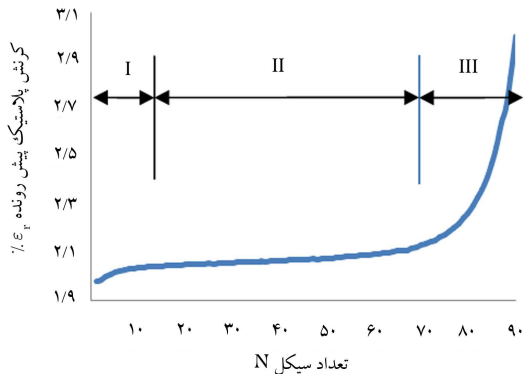
شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی کرنش‌های ثبت شده در نمونه‌ی IM تحت بار محوری یک سویه.



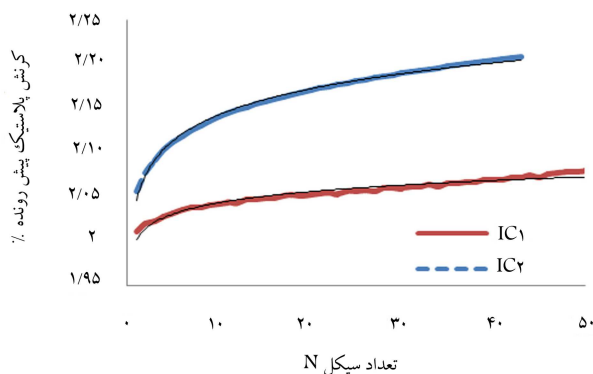
شکل ۹. مقایسه‌ی دو نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی دارای خوردگی (CM1) و نمونه‌ی سالم.



شکل ۱۲. تنش-کرنش موضعی (نمونه‌ی IC۱).



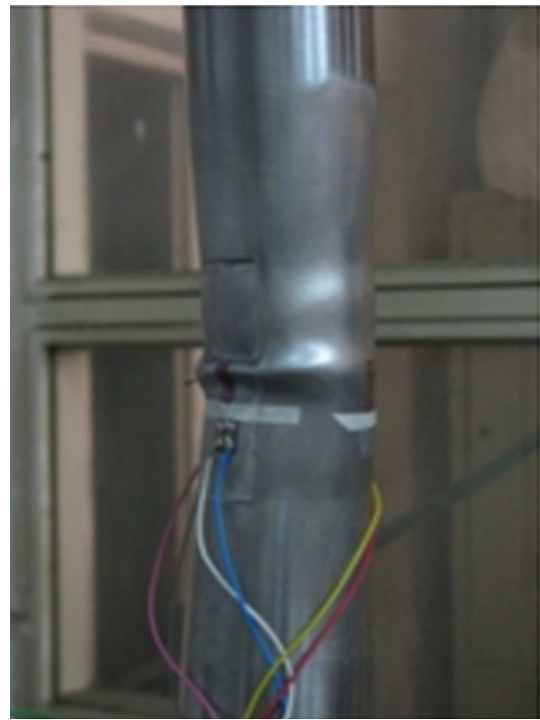
شکل ۱۳. نمودار رشد کرنش غیرخطی پیش‌رونده براساس تعداد تناوب‌های رخ داده‌شده (نمونه‌ی IC۱).



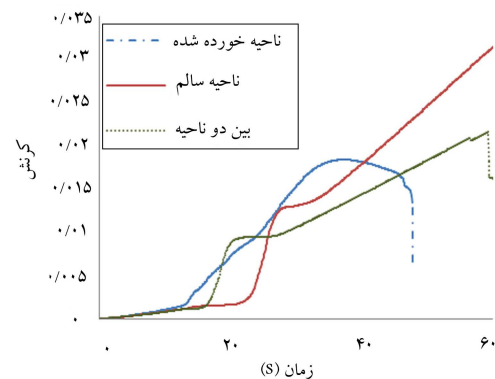
شکل ۱۴. نرخ رشد کرنش ۲ نمونه‌ی IC۱ و IC۲.

جزئیات آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های سالم، در جدول ۳ ارائه شده است. در این بخش مجموعاً ۴ آزمایش تحت بارگذاری محوری متناوب انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر افزایش دامنه‌ی بارگذاری در نرخ رشد کرنش خمیری پیش‌رونده، ۲ آزمایش بر روی ۲ نمونه‌ی IC۱ و IC۲ با کرنش اولیه‌ی یکسان و دامنه‌ی بارگذاری متغیر انجام شده است. نرخ رشد کرنش غیرخطی ۲ نمونه‌ی IC۱ و IC۲ در شکل ۱۴ نشان داده شده است، براساس این نمودار با افزایش دامنه‌ی بارگذاری تناوبی نرخ رشد کرنش پیش‌رونده افزایش می‌یابد. این ۲ نمونه دارای روند رشد مشابه هستند و تفاوت اساسی آنها در ناحیه‌ی خطی رشد کرنش پیش‌رونده است.

به منظور بررسی تأثیر تنش متوسط بر روی نرخ رشد کرنش پیش‌رونده، ۲



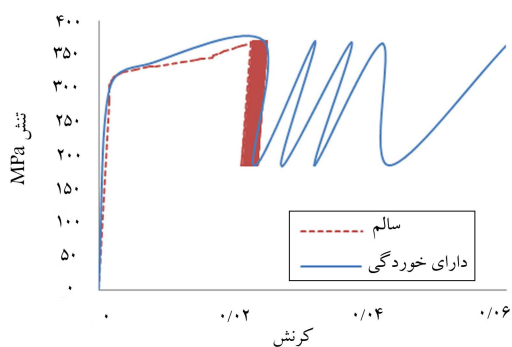
شکل ۱۰. آزمایش یک سوپه‌ی نمایش نمونه‌ی IC۱ بعد از خرابی.



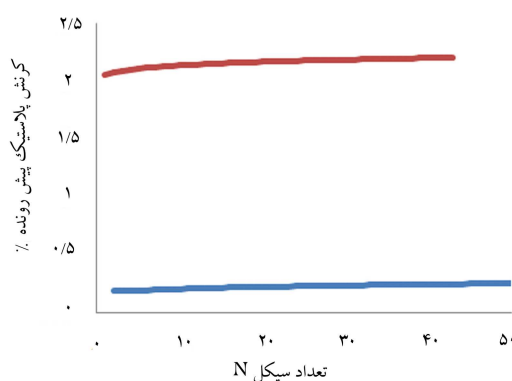
شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی کرنش به‌دست‌آمده از سه کرنش سنج نصب‌شده روی نمونه‌ی IC۱.

۵. نتایج آزمایشگاهی بارگذاری محوری متناوب ۱.۵. نمونه‌های سالم

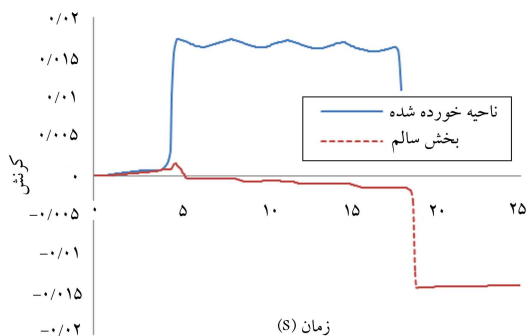
شکل ۱۲ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی IC۱ را نمایش می‌دهد. این لوله تا کرنش معادل ۲٪ به‌صورت جابه‌جایی کنترل بارگذاری و سپس باربرداری شده است (بارگذاری محوری متناوب). بارگذاری بیشینه‌ی متناوب برابر ۳۷۰ MPa بوده است. تنش میانگین اعمالی در این نمونه برابر ۲۱۵ MPa و دامنه‌ی تنش محوری تناوبی برابر ۱۵۴ MPa بوده است. تحت این شرایط بعد از اعمال تناوب‌های بارگذاری چین‌خوردگی‌ها بر روی سطح نمونه ظاهر شده است. براساس نمودار رشد کرنش پیش‌رونده برحسب تعداد تناوب اعمالی (شکل ۱۳)، با عبور از حالت گذرا که حدود ۱۳ تناوب طول می‌کشد؛ نرخ رشد کرنش غیرخطی به میزان ثابت و پایدار می‌رسد و بعد از اعمال حدود ۷۰ دوره‌ی تناوب، این رشد به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و تا خرابی لوله ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی ۲ نمونه‌ی سالم و دارای خوردگی با دامنه‌ی تنش و بیشینه‌ی تنش برابر.



شکل ۱۵. نرخ رشد کرنش ۲ نمونه‌ی IC۳ و IC۲.



شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی کرنش (نمونه‌ی CC۱).

متناوب ثابت نگه داشته شده و بارگذاری تناوبی با دامنه‌ی تنش اعمال شده به لوله‌ی سالم انجام شده است. این به آن مفهوم است که مقدار بار و دامنه‌ی آن، متناسب با کاهش سطح مقطع لوله کاهش داده شده است. این لوله تا کرنش معادل ۲٪ به صورت جابه‌جایی کنترل بارگذاری و سپس به صورت بارکنترل تحت بارگذاری تناوبی قرار داده شده است. بیشینه‌ی تنش تناوبی اعمال شده در این آزمایش برابر ۳۵۰ MPa، میانگین تنش تناوبی برابر ۲۳۸ MPa، و دامنه‌ی تنش محوری تناوبی برابر ۱۱۰ MPa بوده است. این رژیم بارگذاری کاملاً مشابه موارد اعمال شده بر روی نمونه‌ی سالم IC۲ است.

در شکل ۹ مشاهده شد که ظرفیت باربری یک سویه و همچنین درصد تنش کلی بیشینه‌ی لوله‌های دارای خوردگی نسبت به لوله‌ی سالم حدود ۳٪ کاهش داشته است. تحت بارهای متناوب محوری لوله دارای خوردگی رفتار به شدت ضعیفی از خود نشان داده است و نرخ رشد کرنش از ۰.۳۵٪ به ۰.۰۹٪ (برابر افزایش یافته و نمونه بعد از ۴ تناوب دچار خرابی شده است. مطابق شکل ۱۷، نمونه دارای خوردگی در ابتدا در ناحیه‌ی سالم خود دچار کشش شده و کرنش کششی در این ناحیه در حین بارگذاری تناوبی تدریجاً افزایش یافته است.

به منظور مقایسه رفتار نمونه دارای خوردگی و سالم آزمایشی بر روی نمونه‌ی CC۲ انجام شده است در این آزمایش، کرنش آغازین و سطوح تنش تناوبی مشابه نمونه‌ی IC۳ در نظر گرفته شده است. در نتیجه، دامنه‌ی بارگذاری ثابت و برابر ۱۱۰ MPa اعمال شده است. در این آزمایش تنش معادل کرنش آغازین ۰.۳٪ برابر ۳۰۰ MPa است. با توجه به شکل ۱۸، نرخ رشد کرنش در ناحیه‌ی خورده شده ۰.۴۵٪ است، در صورتی که این نرخ در نمونه‌ی سالم برابر ۰.۰۶٪ است. این بدین معناست که نرخ رشد کرنش نمونه‌ی دارای خوردگی، حدوداً ۷ برابر سریع‌تر از نمونه‌ی سالم است. اشاره به این نکته ضروری است که این نرخ رشد تا گام ۸ام

آزمایش بر روی نمونه‌های IC۲ و IC۳ انجام شده است. براساس شکل ۱۵، نرخ رشد کرنش غیرخطی پیش رونده با افزایش تنش میانگین بارگذاری افزایش می‌یابد. همچنین به منظور بررسی تأثیر کرنش آغازین یک آزمایش بر روی نمونه‌ی IC۴ انجام شده است. مطابق نتایج میزان کرنش آغازین تأثیر به سزایی در نرخ رشد کرنش پیش رونده و خرابی نمونه‌ها دارد. با افزایش کرنش آغازین، دامنه‌ی چین خوردگی‌ها افزایش می‌یابد و از میزان سختی محوری کاسته می‌شود. در این آزمایش بعد از اعمال ۴ تناوب، نمونه دچار خرابی و کمانش موضعی شده است.

۲.۵. نمونه‌های دارای خوردگی

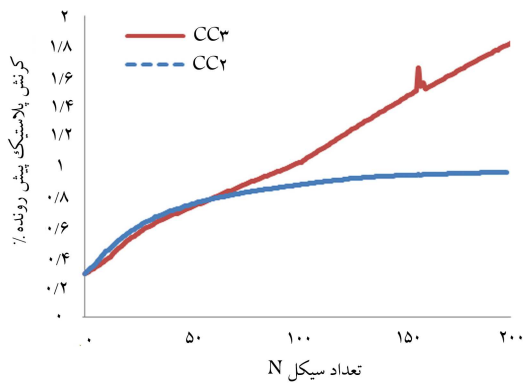
در این بخش به بررسی رفتار نمونه‌های دارای خوردگی به عمق ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی محیطی ۶۰ درجه تحت بارگذاری محوری متناوب پرداخته می‌شود. مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است.

لازم به یادآوری است که در این مطالعه در نمونه‌های دارای خوردگی، آسیب خوردگی به صورت مصنوعی و با برداشت مکانیکی بخشی از جداره در یک سمت لوله (سمت خارجی آن) به لوله اعمال شده است. طبقاً در این مدل فیزیکی یک جابجایی در میان صفحه‌ی لوله، در ناحیه‌ی دارای خوردگی، رخ خواهد داد. اگر لوله‌ی واقعی از دو سمت داخل و خارج دچار خوردگی شده باشد، چنین تغییری در میان صفحه بروز نخواهد کرد. از این نظر، وضعیت لوله‌ی واقعی با مدل فیزیکی حاضر متفاوت خواهد بود. در حقیقت این مدل با وضعیتی مشابهت خواهد داشت که خوردگی فقط از سمت خارج لوله رخ دهد.

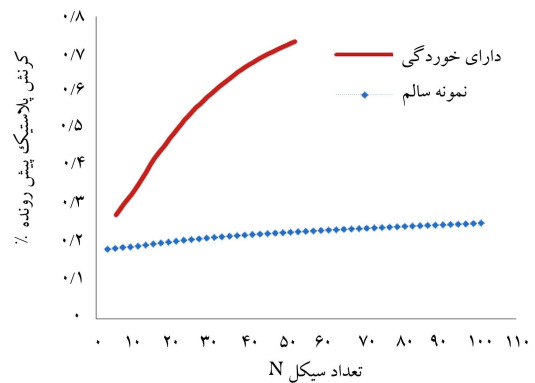
شکل ۱۶ نمودار تنش - کرنش نمونه‌های CC۱ و IC۲ را نشان می‌دهد. در آزمایش CC۱ با کاهش سطح مقطع لوله، (به دلیل خوردگی) مقدار تنش محوری

جدول ۴. مشخصات کلی آزمایش‌های متناوب انجام شده بر روی نمونه‌های دارای خوردگی.

شماره‌ی نمونه	کرنش آغازین (%)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	نرخ رشد کرنش (%)	تعداد تناوب
CC۱	۲٫۴	۱۱۰	۲۳۸	۰٫۹	۴
CC۲	۰٫۲۴	۱۱۰	۱۹۲	۰٫۳۴	۲۰۴
CC۳	۰٫۳	۱۱۰	۲۰۶	۰٫۷	۳۰۰



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نرخ رشد کرنش غیرخطی پیش‌رونده میان دو نمونه‌ی CC۲ و CC۳.

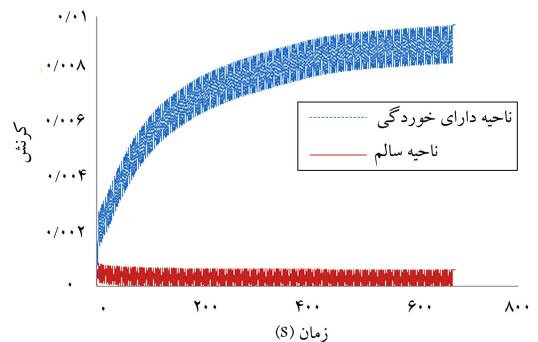


شکل ۱۸. مقایسه‌ی نرخ رشد کرنش غیرخطی در ۲ نمونه‌ی سالم IC۲ و نمونه‌ی دارای خوردگی (نمونه‌ی CC۲).

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار موضوع کماتش موضعی و پدیده‌ی خرابی خمیری پیش‌رونده در لوله‌های خورده‌شده‌ی فراساحلی تحت بارگذاری محوری متناوب ناشی از کشش و فشار به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی ۲ نوع نمونه‌ی سالم و دارای آسیب خوردگی تحت بارگذاری محوری یک سوپه و تناوبی انجام شده است. براساس نتایج آزمایش‌های یک سوپه، کرنش متناظر با ایجاد چین‌خوردگی اولیه در نمونه‌های سالم و دارای خوردگی قابل تعیین است. ملاحظه شده است که این مقادیر به ترتیب در لوله‌های دارای خوردگی و سالم حدوداً برابر ۱/۵ و ۲ درصد بوده‌اند. در نمونه‌های دارای آسیب خوردگی چین‌خوردگی از محل خورده‌شده و در کرنشی کمتر نسبت به نمونه‌ی سالم ایجاد شده است. در آزمایش‌های تناوبی بارگذاری اولیه به شکل یک سوپه جابه‌جایی - کنترل تا ایجاد چین‌خوردگی اولیه در نمونه انجام شده و سپس بارگذاری تناوبی به شکل بار - کنترل حول یک دامنه‌ی مشخص از تنش ادامه یافته است.

مشاهده شده است که مقدار کرنش آغازین (که پس از آن بار تناوبی به نمونه اعمال شده است) اهمیت زیادی در رفتار نمونه‌ها دارد. هرچه این کرنش بزرگ‌تر باشد، دامنه‌ی چین‌خوردگی‌های اولیه بزرگ‌تر است؛ در نتیجه سرعت رشد کرنش غیرخطی افزایش می‌یابد. براساس نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مقایسه‌ی نرخ رشد کرنش پیش‌رونده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی بارگذاری و افزایش تنش میانگین نرخ رشد کرنش پیش‌رونده افزایش می‌یابد. همچنین با کرنش آغازین یکسان و ثابت نگه‌داشتن تنش متوسط با افزایش دامنه‌ی تنش تناوبی نرخ رشد کرنش پیش‌رونده افزایش یافته است. با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به بارگذاری محوری یک سوپه و تناوبی و انطباق این نمودارها، می‌توان به این مطلب اشاره کرد که ناحیه‌ی رشد خطی کرنش غیرخطی منطبق با محدوده‌ی نرم‌شوندگی ماده و ناحیه‌ی مربوط به رشد نمایی این کرنش منطبق با محدوده‌ی نرم‌شوندگی ماده بوده است. در آزمایش‌های تناوبی با ثابت نگه‌داشتن دامنه و میانگین تنش اعمالی، نمونه‌های دارای آسیب خوردگی در مقایسه با نمونه‌های سالم، نرخ رشد کرنش پیش‌رونده‌ی چشمگیری داشته است. در نمونه‌های دارای آسیب خوردگی، رشد کرنش پیش‌رونده در محل خورده‌شده نسبت به ناحیه‌ی سالم و کل نمونه رشد بیشتری داشته است، در نتیجه چین‌خوردگی‌ها از محل آسیب خوردگی به‌صورت موضعی ایجاد و به کل نمونه توسعه پیدا می‌کنند. با توجه به ایجاد این چین‌خوردگی‌های موضعی در محل خورده‌شده، بررسی و در نظر گرفتن فشار داخلی اهمیت بسیار بالایی دارد.



شکل ۱۹. تاریخچه‌ی تناوبی کرنش - زمان در ناحیه‌ی خورده‌شده و سالم (نمونه‌ی CC۲).

ادامه دارد و بعد از آن کاهش می‌یابد. در نمودارهای کرنش ترسیم‌شده، برای ناحیه‌ی خورده‌شده، پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده به شکل واضح و آشکار مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹، نمودار تاریخچه‌ی زمانی کرنش نمونه‌ی CC۲ نشان داده شده است، مطابق شکل در ناحیه‌ی سالم، کرنش پیش‌رونده دارای یک نرخ رشد منفی است و با ادامه‌ی بارگذاری، این نرخ رشد منفی باعث تغییر جهت کرنش از فشار به کشش می‌شود. این امر در مراحل نزدیک به کماتش کلی و خرابی نمونه اتفاق می‌افتد. در آزمایش انجام‌شده بر روی نمونه‌ی CC۳ با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی بارگذاری تناوبی، کرنش آغازین ۰/۳٪ و سطح میانگین بار نسبت به نمونه‌ی CC۲، ۵ کیلو نیوتن افزایش داده شد. فرض دامنه‌ی ثابت با میانگین بار متغیر گویای این مطلب است که در نتیجه قطع و وصل مجدد دامنه‌ی بار ثابت است، در صورتی که مقدار بار اولیه براساس طراحی قابلیت تغییر را دارد. برای مثال ایجاد کشش اولیه در خط لوله به هنگام نصب، این میزان از سطح تنش را کاهش می‌دهد. مطابق نمودار شکل ۲۰ با افزایش ۰/۳٪ کرنش آغازین و افزایش ۵ kN میانگین بار اعمالی، نرخ رشد کرنش غیرخطی نسبت به نمونه‌ی CC۲ دو برابر شده است. توجه شود که رشد کرنش پیش‌رونده‌ی نمونه‌ی CC۳ تقریباً خطی است. کرنش غیرخطی نمونه‌های CC۲ و CC۳ تا تناوب ۸۰° بر یکدیگر منطبق‌اند و بعد از آن در نمونه‌ی CC۳ با همان نرخ افزایش می‌یابد، در صورتی که این نرخ در نمونه‌ی CC۲ کاهش می‌یابد و با نرخ بسیار آهسته‌تر ادامه پیدا می‌کند. بررسی اثر فشار داخلی همراه با موارد ذکر شده دارای اهمیت بالایی است. زیرا به نظر می‌رسد حضور فشار داخلی امکان خرابی از محل ایجاد کماتش موضعی را تشدید می‌کند.

پانوشتها

1. coordinate measuring management
2. Data Logger
3. System Servo-Hydraulic Dynamic Testing

منابع (References)

1. Jiao, R. and Kyriakides, S. "Ratcheting, wrinkling and collapse of tubes under axial cycling", *International Journal of Solids and Structures*, **46**(14-15), pp. 2856-2870 (2009).
2. Limam, A., Lee, L.-H., Corona, E. and Kyriakides, S. "Inelastic wrinkling and collapse of tubes under combined bending and internal pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, **52**(5), pp. 637-647 (2010).
3. Chang, K.H. and Pan, W.F. "Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending", *International Journal of Solids and Structures*, **46**(2), pp. 254-270 (2008).
4. Paquette, J.A. and Kyriakides, S. "Plastic buckling of tubes under axial compression and internal pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**(8), pp. 855-867 (2006).
5. Bardi, F.C. and Kyriakides, S. "Plastic buckling of circular tubes under axial compression-part I: Experiments", *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**(8), pp. 830-841 (2006).
6. Netto, T.A. "A simple procedure for the prediction of the collapse pressure of pipelines with narrow and long corrosion defects. Correlation with new experimental data", *Applied Ocean Research*, **32**(1), pp. 132-134 (2010).
7. Sakakibara, N. and Corona, E. Kyriakides. "Collapse of partially corroded or worn pipe under external pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, **50**(12), pp. 1586-1597 (2008).
8. Netto, T.A., Ferraz, U.S. and Botto, A. "On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines", Ocean Engineering Department, COPPE-Federal University of Rio de Janeiro, 21949900 Rio de Janeiro, RJ, Brazil (2007).
9. Xue, J. and Hoo Fat, M. "Symmetric and anti-symmetric buckle propagation modes in subsea corroded pipelines", *Marine Structures*, **18**(1), pp. 43-61 (2005).
10. Xue, J. "A non-linear finite-element analysis of buckle propagation in subsea corroded pipelines", *Finite Elements in Analysis and Design*, **42**(14-15), pp. 1211-1219 (2006).
11. Zeng, M., et al "Modified expression for estimating the limit bending moment of local corroded pipeline", School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China (2004).

EXPERIMENTAL MODELING OF LOCAL BUCKLING OF CORRODED OFFSHORE PIPELINES UNDER AXIAL CYCLIC LOADINGS

M. Peykanu(corresponding author)

mpeykanu@yahoo.com

M. Zeinodini

zeinoddini@kntu.ac.ir

M. Motamedi

m_motamedi@sina.kntu.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

K.N.Toosi University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 17-24, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 May 2011; received in revised form 2 May 2012; accepted 10 September 2012.

Abstract

Repetition of start-up/shutdown and temperature changes in an offshore pipeline will generate cycles of compression/relaxation in the line. This might lead to wrinkling and local or plastic buckling in the line. On the other hand, offshore pipelines are commonly exposed to corrosion attacks from sea water and chemically corrosive fluids inside the pipe.

In the current study, the effect of corrosion defects on the tubes ratcheting response under cyclic axial loadings is investigated. The experimental modeling was aimed at providing comparisons between the behavior of intact and corroded tubes under small amplitude wrinkles and subsequent persistent cycles of axial stress ranges. The specimens were all first subjected to monotonic axial compressions to attain an initial pre-defined non-linear axial strain. The subsequent cyclic axial load was introduced to the specimen in a load control mode. The mean and amplitude values for the cyclic stress remained constant in each test but varied with different tests. The physical shape caused by the metal loss in a corroded tube is irregular in depth and in surface.

Results obtained from specimens IC1(I) and IC2(I) indicated that the increase in the cyclic stress amplitude had a major effect on the ratcheting response. Ratcheting strain responses suggested that the shape of the initial non-linear path, the constant ratcheting rate (or the slope of the linear part of the response and the num-

ber of cycles to the failure) were substantially affected by variations in the amplitude of the cyclic stress.

It was observed that surface imperfections had more detrimental effects on the axial ratcheting response of the defected tubes, as compared to the corresponding monotonic responses. It was noticed that the ratcheting problem, or the possibility of progressive plastic failure, was substantially exacerbated by the presence of corrosion defects.

Key Words: Ratcheting, cyclic loading, corroded pipe, wrinkling, circular tubes.