

شبیه‌سازی عددی کمانش موضعی اعضای لوله‌ای دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های تناوبی کشش و فشار

محمد پیکانو^۱، مصطفی زین‌الدینی^{۲*}، محمد دقیق^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- استادیار - شرکت نفت و گاز پارس

zeinoddini@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۹

چکیده - قطع و وصل پیاپی جریان در خطوط لوله فولادی انتقال نفت و گاز فراساحلی، دوره‌های محوری کشش و فشار در خط ایجاد می‌کند که می‌تواند سبب چین‌خوردگی، کمانش غیرخطی موضعی یا خرابی خمیری پیش‌رونده در این خطوط شوند. این نوع کاهش مقاومت موضعی، بیشتر به‌وسیله ناراستی‌های اولیه و خرابی‌های موجود در خط لوله تشدید می‌شود. یکی دیگر از مسائل مؤثر بر روی مقاومت خطوط لوله دریایی، پدیده خوردگی است. این نوع آسیب به علت استقرار خط در محیط خوردنده دریا و عبور سیال خوردنده از داخل خط لوله ایجاد می‌شود. به طور کلی آسیب خوردگی که در عمق و اندازه از داخل و خارج سطح خطوط ایجاد می‌شود، می‌تواند بر مقاومت این خطوط تأثیر به‌سزایی داشته باشد. در این پژوهش پدیده خرابی پیش‌رونده در خطوط لوله‌های خورده شده تحت بارگذاری دوره‌ای محوری بررسی شده است. یک روش عددی برای بررسی این پدیده استفاده می‌شود. خواص غیرخطی مواد، به همراه رفتار سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/کینماتیک برای نمونه بررسی شده در نظر گرفته شده است. درستی داده‌های مربوط به پارامترهای سخت‌شوندگی برای مدل‌سازی پدیده خرابی پیش‌رونده اهمیت زیادی دارد. این نتایج با استفاده از یک سری آزمایش روی نمونه‌هایی که در معرض دوره‌های زیاد کرنش متقارن قرار گرفته به‌دست می‌آید. مدل اجزای محدود استفاده شده در ابتدا با استفاده از نتایج به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های یک‌سویه و دوره‌ای صحت‌سنجی شده است.

در این پژوهش، اثر دامنه و تنش میانگین در بارگذاری دوره‌ای و تأثیر خوردگی بر نرخ رشد کرنش غیرخطی بررسی شده است.

کلیدواژه‌گان: خرابی پیش‌رونده، بارگذاری تناوبی، لوله‌های دارای خوردگی، چین و چروک

۱ - مقدمه

آب‌های دور از ساحل، معمولاً لوله غیرمدفون اجرا می‌شود. در قسمت‌هایی از خط به‌خاطر انباشتگی اصطکاک لوله روی بستر دریا، حرکت طولی لوله متوقف خواهد شد. در حد فاصل این قسمت‌ها (Feed in Length) به‌خاطر

برای بهره‌برداری و استخراج منابع نفت و گاز در آب‌های دور از ساحل، نیاز به استفاده از خطوط لوله نفت و گاز که در دما و فشار زیاد فعالیت می‌کنند، افزایش یافته است. در

دوره‌های حرارت و فشار، نیروی محوری در لوله ایجاد می‌شود. وجود انحنای اولیه در خط لوله باعث ایجاد کمانش‌های موضعی، کمانش کلی عرضی و یا کمانش کلی رو به بالا یا پایین خواهد شد. در یک طراحی متداول برای مدل‌سازی رفتار خط لوله در دوره‌های فشار/حرارت، حدود ۱۰۰ دوره طی عمر خط در نظر گرفته می‌شود (Jiao and Kyriakides, 2009). بنابراین پیش‌بینی رفتار و مدل‌سازی مناسب برای ارزیابی مقاومت لوله در قبال دوره‌های نیروی محوری اهمیت دارد. از طرف دیگر به دلیل خوردگی محیط دریا و نیز سیال داخل لوله، با افزایش زمان بهره‌برداری لوله، امکان بروز خوردگی در لوله افزایش می‌یابد. این خوردگی می‌تواند دارای عمق و شکل‌های متفاوت و نامتقارن باشد و روی سطح بیرونی و یا درونی خط لوله ایجاد شود.

مسئله کمانش موضعی لوله‌های استوانه‌ای که در معرض بارگذاری محوری قرار دارند مدت‌هاست که مورد توجه است. Limam و همکاران در سال ۲۰۱۰، پدیده ایجاد چین‌خوردگی‌های محلی را در عضو لوله‌ای که در معرض بارگذاری دوره‌ای خمشی در حضور فشار داخلی قرار گرفته است، بررسی کردند. Jiao و Kyriakides در سال ۲۰۰۹ بحث کمانش خمیری و خرابی موضعی لوله تحت دوره‌های حرارت و فشار را که سرانجام به ایجاد چین‌خوردگی و تغییر شکل‌های خمیری پیش‌رونده منجر می‌شود مطالعه کردند در این پژوهش تاثیر دامنه و میانگین تنش اعمالی، بر نرخ رشد کرنش غیرخطی با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی قابل ملاحظه، مشاهده شده است. Paquette و Kyriakides در سال ۲۰۰۷ علاوه بر نیروی محوری خالص، تاثیر نیروی محوری همراه فشار داخلی را به شکل آزمایشگاهی بررسی کردند. همان‌گونه که در این پژوهش اشاره شده است، فشار داخلی باعث تشدید پدیده

خرابی پیش‌رونده در اعضای لوله‌ای شکل خواهد شد. Bardi و Kyriakides در سال ۲۰۰۶ پدیده خرابی پیش‌رونده و ایجاد اعوجاج و سرانجام، خرابی کلی در یک بارگذاری یک سویه را بررسی کردند. در این پژوهش مانند سایر پژوهش‌های اشاره‌شده، ابتدا نتایج با آزمایش استخراج و در ادامه، درستی نتایج با پارامترهای تحلیلی بررسی شده است. علاوه بر مسئله کمانش موضعی و خرابی پیش‌رونده، بحث مقاومت در لوله‌های دارای خوردگی به شکل گسترده‌ای بررسی شده است. در سال ۲۰۰۹ Netto فشار خرابی روی خطوط لوله‌ای که دچار خوردگی از نوع باریک و بلند شده را بررسی کردند. در سال ۲۰۰۸ Sakakibara و همکاران به مطالعه‌ی فشار خرابی لوله‌های خورده‌شده که در معرض فشار خارجی قرار گرفته است، پرداختند. در سال ۲۰۰۷ Netto و همکاران در مقاله‌ای اثر خوردگی بر فشار خرابی لوله را بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های انجام‌شده، رابطه‌ای بر اساس نوع ماده و اثر خوردگی و فشار وارد شده ارائه شده است. در سال ۲۰۰۵ Xue در مقاله‌ای کمانش پیش‌رونده در لوله‌های واقع در کف دریا را که در اثر فشار هیدرواستاتیک خارجی دچار خوردگی شده است، با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی بررسی کرد. این پژوهش نحوه کاهش مقاومت این لوله‌ها تحت فشار هیدرواستاتیکی با تغییر زاویه و عمق خوردگی را توضیح می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه شد، موضوع خرابی پیش‌رونده در لوله‌های خورده‌شده که در معرض بار محوری دوره‌ای قرار می‌گیرند در تحقیقات گذشته محققین مورد توجه قرار نگرفته است. این مقاله به بررسی این موضوع به روش عددی می‌پردازد.

۲- روش انجام کار

ایزوتروپیک نیز تغییرات اندازه سطح تسلیم در فضای تنش را نمایش می‌دهد، این پارامترها در واقع نشان‌دهنده قسمت غیرخطی رفتار سخت‌شوندگی است (Lee و همکاران سال ۲۰۰۷).

در این مقاله از نرم‌افزار اجزای محدود، ABAQUS، برای مدل‌سازی رفتار خرابی پیش‌رونده لوله‌های خورده‌شده کربن‌استیل که در معرض بارگذاری دوره‌ای قرار گرفته، استفاده شده است. با یک مدل عددی که بر اساس مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک-کینماتیک کالیبره شده است، تعدادی از آزمایش‌های انجام‌شده به‌وسیله نویسندگان، شبیه‌سازی شده است. در ادامه با استفاده از این مدل، پارامترهای مختلف و مؤثر بر نرخ خرابی پیش‌رونده بررسی شده است.

۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی از لوله بدون درز جنس کربن‌استیل رده X42/B، دارای قطر خارجی اسمی ۵۹/۴ میلی‌متر و ضخامت اسمی اولیه ۵ میلی‌متر ساخته شده است. نمایی از ابعاد هندسی نمونه در شکل ۱ ارائه شده است. ابعاد اندازه‌های نمونه مشابه کار Jiao و Kyriakides در سال ۲۰۰۹ انتخاب شده است. لازم به توضیح است که در پژوهش افراد نامبرده، خوردگی در نظر گرفته نشده است. این نمونه به سه بخش جدا از هم تقسیم می‌شود:

- دو بخش انتهایی که ضخامتی معادل ضخامت لوله مادر دارد (طولی برابر ۵۲ میلی‌متر)؛
 - بخش میانی که وسط نمونه مورد نظر قرار داشته و ضخامتی برابر با ۲ میلی‌متر دارد (طولی برابر ۷۶ میلی‌متر).
 - دو بخش واسط که دو بخش انتهایی را با یک شیب ثابت به بخش میانی متصل می‌نماید (طولی برابر ۵۰ میلی‌متر).
- بخش خطی که در واقع دو بخش میانی و انتهایی لوله را به یکدیگر متصل می‌کند، یک اتصال تنش ملایم میان دو ناحیه برقرار کرده و از آثار تمرکز تنش جلوگیری خواهد کرد.

برای ایجاد خوردگی در نمونه‌های ساخته‌شده، از دستگاه CNC استفاده شده است. عمق خوردگی برابر ۱ میلی‌متر است و زاویه محیطی خوردگی ۶۰ درجه انتخاب و خوردگی در کل طول ۷۶ میلی‌متر ایجاد شده است.

۳- مدل‌های سخت‌شوندگی

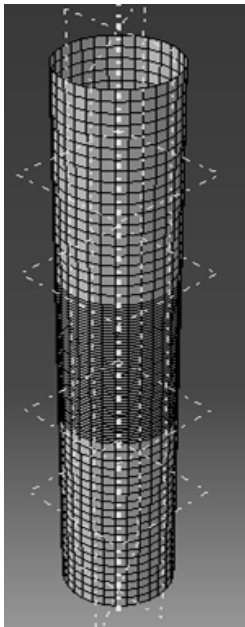
برای شبیه‌سازی رفتار غیرالاستیک فلزات تحت بارهای دوره‌ای باید مدل‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک استفاده کنیم. مدل سخت‌شوندگی Armstrong-Fredrick (۱۹۵۶) برای مواد با سخت‌شوندگی کرنشی غیرخطی استفاده می‌شود. بر اساس قانون سخت‌شوندگی غیرخطی Armstrong-Fredrick، تعدادی مدل ترکیبی ساخته شده تا خرابی پیش‌رونده تک‌محوری و چندمحوری که در اثر رفتار سخت‌شدگی دوره‌ای یا رفتار پایدار دوره‌ای ایجاد شده است را شبیه‌سازی کنند. نتایج حاصل از این مدل‌ها در مراجع مختلفی تحت بارهای دوره‌ای موجود است (Zakavi و همکاران ۲۰۰۹).

یک مدل سخت‌شوندگی کینماتیک و یا مدل ترکیبی سخت‌شوندگی/ایزوتروپیک غیرخطی را می‌توان برای مدل‌سازی رفتار موادی که در معرض بارگذاری دوره‌ای قرار گرفته است، استفاده کرد. قوانین مربوط به تغییر شکل در این مدل‌ها شامل یک جزء سخت‌شدگی کینماتیک است که جابه‌جایی سطح گسیختگی در فضای تنش را بیان می‌کند. جزء

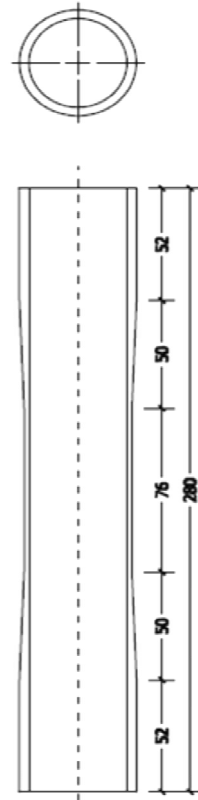
۵- مبانی مدل عددی

از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS برای شبیه‌سازی کارهای آزمایشگاهی توضیح داده شده در بخش ۴ و نیز بررسی عددی خرابی پیش‌رونده در لوله‌های سالم و دارای خوردگی استفاده شده است. نمونه مورد نظر با استفاده از المان پوسته‌ای S4R، مدل‌سازی شده است. مدل شنبندی شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. اعمال کرنش ابتدایی، مانند آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های آزمایشگاهی، به شکل جابه‌جایی کنترل انجام شده است. پس از آن بارگذاری دوره‌ای به شکل بار کنترل به مدل اعمال شده است. هر گروه بارگذاری دوره‌ای با مقادیر تنش میانگین و دامنه تنش تناوبی مشخص می‌شود.

مشخصات مصالح در مدل عددی مانند حد الاستیک، مدول الاستیسیته، پارامترهای سخت‌شوندگی کینماتیکی C, γ و پارامترهای سخت‌شوندگی ایزوتروپیک b و Q مطابق آنچه از آزمایش‌های خواص مواد به دست آمده بود (بخش ۴) اختیار شده است.



شکل (۲) مش بندی نمونه مدل سازی شده



شکل (۱) ابعاد هندسی نمونه ساخته شده (میلی متر)

کرنش‌های موضعی نمونه‌ها با استفاده از کرنش‌سنج‌هایی که روی بخش میانی قرار دارد اندازه‌گیری شده است. اعمال بارهای محوری یک‌سویه و دوره‌ای به نمونه‌ها بادستگاه Instron نوع (Servo-Hydraulic Dynamic Testing System) انجام شده است. بار و جابه‌جایی محوری کلی نمونه با دستگاه Instron گزارش شده است.

مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد با انجام آزمایش کشش یک‌سویه استاندارد کوپن، از شاخه لوله موجود، استخراج شده است. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی لوله اصلی ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی ماده

کرنش گسیختگی	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	جنس لوله	نوع مصالح
۳۸٪	۴۵۰	۲۹۷	کربن‌استیل	نوع ۱

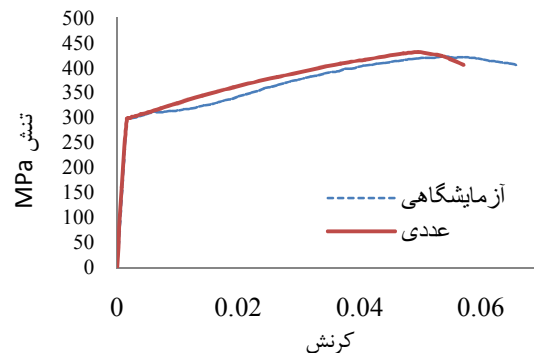
۶- نتایج شبیه‌سازی کارهای آزمایشگاهی

با استفاده از مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار اجزای محدود، با ABAQUS تعدادی از آزمایش‌های انجام‌شده، شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی شامل شبیه‌سازی مدل‌های سالم و دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های یک‌سویه و دوره‌ای است.

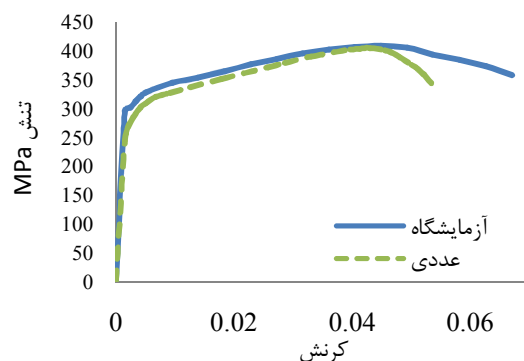
۶-۱- شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی تحت بارگذاری

یک سویه (نمونه‌های سالم و دارای خوردگی)

شکل‌های ۳ و ۴ نتایج شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی نمونه سالم و دارای خوردگی تحت بارگذاری یک‌سویه را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها نمودار تنش-کرنش دو نمونه عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل ۳ و ۴ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل عددی قادر بوده است رفتار یک‌سویه نمونه مورد نظر را با دقت نسبتاً خوبی شبیه‌سازی کند.



شکل (۳) شبیه‌سازی رفتار یک‌سویه مدل سالم

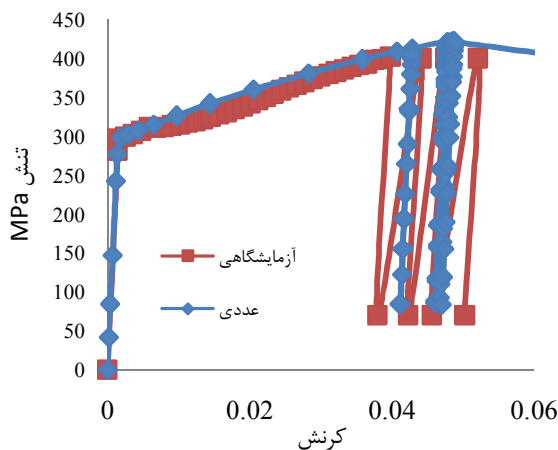


شکل (۴) شبیه‌سازی رفتار یک‌سویه مدل دارای خوردگی

۶-۲- شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی تحت بار

دوره‌ای (نمونه‌های سالم و دارای خوردگی)

برای شبیه‌سازی رفتار دوره‌ای و خرابی پیش‌رونده در نمونه سالم و دارای خوردگی از پارامترهای سخت‌شوندگی ایزوتروپیک/کینماتیک، استفاده شده است. همه‌ی مقادیر کرنش آغازین، دامنه دوره‌ای تنش اعمالی و میانگین تنش اعمال‌شده در کارهای آزمایشگاهی، عیناً در مدل عددی منظور و نتایج مورد نظر در جداول ۲ و ۳ گزارش شده است. یک نمونه از منحنی‌های تنش-کرنش محوری حاصل از مدل عددی و مدل متناظر آزمایشگاهی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵) شبیه‌سازی رفتار دوره‌ای مدل سالم (نمونه ۳)

جدول (۲) شبیه‌سازی نمونه‌های سالم با استفاده از مدل عددی

شماره نمونه	تعداد دوره		کرنش آغازین	رشد کرنش عددی	رشد کرنش آزمایشگاهی
	عددی	آزمایشگاهی			
۱	۱۵۰	۱۵۰	%/۰.۰۲	%/۰.۰۳۴	%/۰.۰۰۴
۲	۱۰۰	۱۰۰	%/۰.۰۰۳	%/۰.۰۰۴	%/۰.۰۰۴
۳	۷	۴	%/۰.۰۴	%/۰.۱	%/۰.۳۲

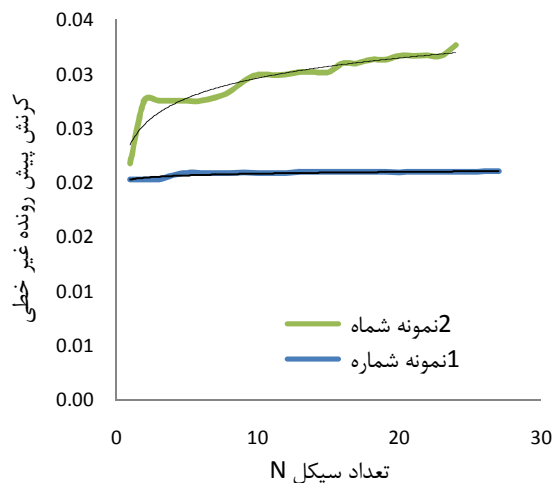
جدول (۳) شبیه‌سازی نمونه‌های دارای خوردگی با استفاده از مدل عددی

شماره نمونه	تعداد دوره		کرنش آغازین	رشد کرنش عددی	رشد کرنش آزمایشگاهی
	عددی	آزمایشگاهی			
۱	۷	۴	%/۰.۰۲	%/۰.۱۵	%/۰.۲۲
۲	۲۰۰	۲۰۰	%/۰.۰۰۳	%/۰.۰۲	%/۰.۰۲۵

بارگذاری، نرخ رشد کرنش پیش‌رونده، رشد چشم‌گیری داشته است و امکان دارد روند این رشد تغییر کرده و از حالت خطی و ملایم به نمایی و سریع تبدیل شود. تعداد دوره‌های قابل تحمل در جدول ۴ نیز به خوبی بیانگر نحوه تاثیر افزایش دامنه بارگذاری بر تسریع روند خرابی پیش‌رونده است.

جدول (۴) بررسی تأثیر تغییر دامنه بارگذاری

شماره مدل	کرنش ابتدایی	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	نرخ رشد کرنش	تعداد تناوب قابل تحمل
۱	٪۲	۱۷۵	۱۵۷	٪۰/۰۰۱	۳۵۰۰
۲	٪۲	۱۷۵	۱۷۵	٪۰/۰۰۹	۴۰۰



شکل (۶) مقایسه نرخ رشد کرنش پیش‌رونده دو مدل شماره ۱ و ۲ با در نظر گرفتن افزایش دامنه تنش دوره‌ای

۷-۲- تأثیر تنش میانگین

در این بخش تأثیر تغییر تنش میانگین بارگذاری بر نرخ رشد کرنش پیش‌رونده، با ثابت بودن دامنه تنش بارگذاری دوره‌ای، بررسی شده است. خلاصه نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تنش میانگین و ثابت نگه‌داشتن دامنه بارگذاری دوره‌ای، نرخ رشد کرنش پیش‌رونده افزایش یافته است.

در جداول ۲ و ۳ با توجه به تعداد دوره‌های قابل تحمل در مدل عددی در مقایسه با آزمایش‌های انجام‌شده و مقایسه نرخ رشد کرنش پیش‌رونده در این دو حالت انطباق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

۷- ارزیابی عددی پارامترهای مؤثر بر خرابی پیش‌رونده

در این بخش با استفاده از مدل اجزای محدود، برخی پارامترهای مؤثر بر خرابی پیش‌رونده بررسی شده است. لازم به توضیح است که هندسه، شرایط مرزی و مشخصات مصالح این مدل عددی کاملاً منطبق با مدل عددی است که در بخش‌های ۵ و ۶ ذکر شده است. در هر مورد تغییراتی در یک پارامتر مؤثر داده شده و مشخصات دیگر مدل حفظ شده است. موارد زیر بررسی شده است:

- تأثیر دامنه بارگذاری دوره‌ای بر نرخ رشد کرنش پیش‌رونده غیرخطی
- تأثیر افزایش تنش میانگین بر نرخ رشد کرنش پیش‌رونده غیرخطی
- تأثیر خوردگی

۷-۱- تأثیر دامنه بارگذاری دوره‌ای

با افزایش دامنه بارگذاری تناوبی در مدل‌های مختلف و ثابت نگه‌داشتن تنش میانگین و کرنش آغازین، تاثیر این افزایش بر نرخ رشد کرنش پیش‌رونده بررسی شده است. نمودار نرخ رشد کرنش پیش‌رونده در برابر تعداد دوره‌ای بارگذاری برای دو مدل شماره ۱ و ۲ (جدول ۴ را ببینید) در شکل ۶ ارائه شده است. دامنه بارگذاری دوره‌ای در این دو مدل حدود ۱۰٪ تفاوت دارد. خلاصه نتایج تحلیل‌های مربوط به تاثیر دامنه بارگذاری در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۶ و جدول ۴ گویای آن است که با افزایش دامنه

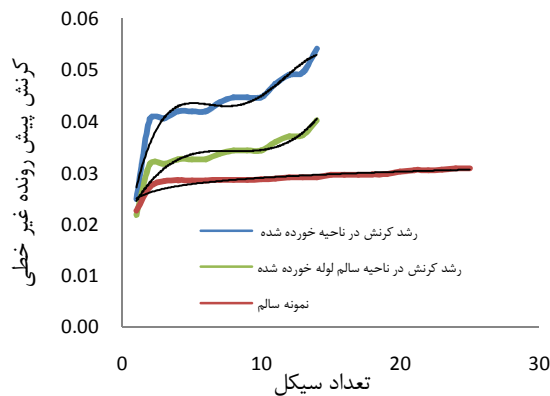
کمانش موضعی سپس به بخش سالم هم منتقل شده و سرانجام سبب خرابی مدل خواهد شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این رشد در مدل سالم روندی خطی و آهسته دارد در حالی که در مدل دارای خوردگی به روندی نمایی و سریع تغییر پیدا کرده است.

جدول (۵) تأثیر تغییر تنش میانگین

شماره مدل	کرنش آغازین	تنش میانگین σ_s (MPa)	دامنه تنش σ_t (MPa)	نرخ رشد کرنش	تعداد تناوب قابل تحمل
۱	٪۲	۱۲۵	۲۲۵	٪۰/۰۲	۱۸۰
۲	٪۱۷	۱۲۰	۲۲۵	٪۰/۰۰۹	۴۰۰
۳	٪۱.۵	۱۱۴	۲۲۵	٪۰/۰۰۱	۳۶۰۰

جدول (۶) بررسی تأثیر خوردگی

شماره مدل	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	نرخ رشد کرنش ناحیه سالم	نرخ رشد کرنش ناحیه خورده شده	نرخ رشد مدل سالم با تنش متناظر برابر
فشار - صفر	۱۷۵	۱۷۵	٪۰/۰۰۱۴	٪۰/۰۲۲	٪۰/۰۰۹



شکل (۷) مقایسه میان نرخ رشد کرنش پیش رونده مدل سالم و خورده شده با دامنه و تنش بارگذاری برابر (فشار-فشار)

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، موضوع کمانش موضعی و خرابی پیش رونده در لوله‌های خورده شده فراساحلی در برابر دوره‌های بارگذاری ناشی از کشش و فشار به روش عددی بررسی شده است. از مدل عددی ساخته شده به کمک نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. برای شبیه سازی عددی پدیده خرابی پیش رونده، تعریف دقیق پارامترهای سخت شونده گی کینماتیکی-ایزوتروپیک غیرخطی

۷-۳- تأثیر ابعاد خوردگی

در این بخش تأثیر حضور خوردگی بر پدیده خرابی پیش رونده بررسی شده است. نتایج بارگذاری دوره‌ای روی مدل سالم و مدل دارای خوردگی مقایسه شده است. خوردگی مدل شده، زاویه ۶۰ درجه و عمق خوردگی ۱ میلی متر دارد. برای فراهم کردن امکان مقایسه نتایج، بارهای اولیه و دوره‌ای وارد شده به مدل دارای خوردگی به گونه‌ای تغییر و کاهش داده شده که میانگین تنش‌های اولیه و دوره‌ای وارد شده به بخش میانی مدل‌های سالم و دارای خوردگی یکسان باشد. در جدول ۶ خلاصه نتایج به دست آمده از مقایسه مدل سالم و مدل دارای خوردگی ارائه شده است. در شکل ۷ نمودارهای رشد کرنش پیش رونده در دو ناحیه سالم و دارای خوردگی نمونه خورده شده و نمونه سالم مقایسه شده است. رژیم بارگذاری در این بررسی به صورت فشار-فشار بوده است. همان‌گونه که در شکل ۷ و جدول ۶ مشاهده می‌شود با وجود ثابت بودن سطح تنش اعمالی در مدل سالم و دارای خوردگی، نرخ رشد کرنش خمیری پیش رونده در مدل دارای خوردگی نسبت به مدل سالم بسیار بیشتر است. در نمونه دارای خوردگی، رشد کرنش خمیری پیش رونده در ناحیه خورده شده مدل نسبت به ناحیه سالم آن نرخ رشد بیشتری دارد. در مجموع می‌توان گفت که با توجه به نرخ رشد سریع تر کرنش غیرخطی در ناحیه خورده شده مدل‌های دارای خوردگی، امکان کمانش موضعی از این ناحیه تشدید می‌شود. این

- Central Electricity Generating Board. The report is reproduced as a paper: 2007. Materials at High Temperatures 24(1), 1-26.
- [2] Bardi, F.C, Kyriakides, S, 2006, Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: Experiments. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 48, Issue 8, August 2006, Pages 830-841.
- [3] Bardi, F.C, Kyriakides, S, 2006, Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part II: Analysis. Experiments. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 48, Issue 8, August 2006.
- [4] Jiao, R, Kyriakides, S, 2009, Ratcheting, wrinkling and collapse of tubes under axial cycling. International Journal of Solids and Structures, Volume 46, Issues 14-15, July 2009, Pages 2856-2870.
- [5] Limam, A, Lee, L.-H, Corona, E, Kyriakides, S., 2010, Inelastic wrinkling and collapse of tubes under combined bending and internal pressure, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 52, Issue 5, May 2010, Pages 637-647.
- [6] Lee, J.H, et al, 2007, A numerical simulation model of cyclic hardening behavior of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 22, Issue 6, , Pages 889-896
- [7] Netto, T.A, 2010, 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, Volume 32, Issue 1, February 2010, Pages 132-134
- [8] Netto, T.A, 2009, On the effect of narrow and long corrosion defects on the collapse pressure of pipelines, Applied Ocean Research, Volume 32, Issue 1, February 2010, Pages 132-134.
- [9] Netto, T.A, Ferraz, U.S, Botto, A, 2007, 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.
- [10] Paquette, J.A, Kyriakides, S, 2006, Plastic buckling of tubes under axial compression and internal pressure. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 48, Issue 8, August 2006, Pages 830-841.
- مصالح بسیار مهم است. ضرایب سخت‌شوندگی کینماتیکی - ایزوتروپیک غیرخطی مصالح با انجام آزمایش‌های (دوره‌ی متقارن) کرنش به دست آمده است. با کمک مدل عددی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های انجام شده به‌وسیله‌ی محققین برای بررسی کماتش موضعی و خرابی پیش‌رونده در لوله‌های سالم و خورده‌شده در برابر دوره‌های بارگذاری، شبیه‌سازی شده است. ملاحظه شد که مدل عددی رفتارهای یک‌سویه و دوره‌ای را در دو حالت دارای خوردگی و سالم با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. با استفاده از مدل عددی، تأثیر دامنه بارگذاری دوره‌ای و تغییر میزان تنش میانگین بر نرخ رشد کرنش غیرخطی در نمونه‌های سالم بررسی شده است. در نهایت نمونه‌های دارای خوردگی و سالم مقایسه شد. تأثیر این خوردگی به شکل موضعی در نمونه‌های دارای خوردگی در دو قسمت سالم و خورده‌شده و همچنین با نمونه سالم مقایسه شده است. از مقایسه نمونه‌های سالم و بررسی تأثیر دامنه، این نکته به‌دست آمد که با افزایش دامنه تنش بارگذاری و تنش میانگین بارگذاری، نرخ رشد کرنش پیش‌رونده افزایش می‌یابد. در نمونه‌های دارای خوردگی، نرخ رشد کرنش پیش‌رونده در دو قسمت سالم و خورده‌شده نمونه مقایسه شده است. با توجه به نرخ بیشتر رشد کرنش پیش‌رونده در ناحیه خورده‌شده، امکان رخداد کماتش موضعی از این ناحیه و گسترش این کماتش به کل نمونه وجود دارد که باعث خرابی سراسری لوله خواهد شد. با مقایسه نمونه دارای خوردگی و نمونه سالم، لوله دارای خوردگی تعداد دوره‌ی بسیار کمتری نسبت به لوله سالم می‌تواند تحمل کند.

۱۰- مراجع

- [1] Armstrong, P.J., Frederick, C.O., 1966. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. CEGB Report RD/B/N 731,

- [14] Xue, J, 2006, Non-linear finite-element analysis of buckle propagation in subsea corroded pipelines. *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 42, Issues 14-15, October 2006, Pages 1211-1219.
- [15] Zakavi, S.J, Zehsaz, M, Eslami M.R., 2009, The ratchetting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 240, Issue 4, April 2010, Pages 726-737.
- [11] Sakibara, N, Corona, E, Kyriakides, 2008, Collapse of partially corroded or worn pipe under external pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 50, Issue 12, December 2008, Pages 1586-1597.
- [12] SIMULA, 2006. User's Manual Version 6.8. ABAQUS, Inc.
- [13] Xue, J, Hoo Fat, M, 2005, Symmetric and anti-symmetric buckle propagation modes in subsea corroded pipelines. *Marine Structures*, Volume 18, Issue 1, January 2005, Pages 43-61.

«Research Note»

Local Buckling of Corroded Tubular under Cyclic Compression & Tension Loadings

M. Peykanu¹, M. Zeinodini^{2*}, M. Daghigh³

1-Department of Civil and Environmental Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2-Department of Civil and Environmental Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3-Pars Oil and Gas Company, Tehran, Iran

zeinodini@kntu.ac.ir

Abstract:

Plastic axial strain, local buckling, wrinkling and plastic buckling of pipeline are caused by cyclic compression and tension loadings. This kind of local buckling is amplified by initial defect, heat affected zone and circular welding. Progressive plastic failure or ratcheting is caused by frequent periods of cyclic loading. On the other hand, life time of the offshore pipelines is decreased by the corrosion effect caused by fluids inside the pipeline and the sea Environment. This kind of corrosion can be found with variable size and depth in the inner or/and the outer surface of the pipeline. Corrosion can effect on the strength of pipeline.

In the current study, an advanced finite element program has been used to simulate the ratcheting response of carbon steel tubes. The numerical model has been applied to reproduce a series of laboratory tests on small-scale tubes. These tests were carried out by the authors on intact and defected tubes, in which wrinkling and ratcheting behaviour of tubes under axial monotonic and cyclic loads were studied. A nonlinear isotropic/kinematic hardening model has been employed to represent the cyclic behaviour of the material. The verified model has then been used for a parametric study on ratcheting behaviour of the defected tubes under cyclic axial loading. Several stabilized cycles of specimens that are tested experimentally under symmetric strain cycles are used to obtain stress-strain data and hardening parameters of the material.

The numerical model has then been used to investigate the effect of mean stress, stress amplitude and geometrical defects on the ratcheting response of steel tubes. It has been noticed that:

- a) The ratcheting strain rate was governed by (a) the initial non-linear strain in the tube, (b) by the stress amplitude and (3) by the mean stress, respectively.
- b) The ratcheting strains in the defected tubes had significantly higher rates in comparison to those in the intact tubes and very rapidly turned exponential.
- c) In defected tubes the local wrinkling first initiated from the damaged part. This local buckling then gradually proceeded to the entire circumference. The ratcheting strains in the defected area very rapidly turned exponential, while the ratcheting strains in the perfect zone still remained linear trajectory.
- d) It showed that surface corrosion imperfections had a very pronounced effect on the ratcheting response of the defected tubes, as compared to their monotonic response.
- e) The wrinkles in the defected tubes were non-axisymmetric and initiated from the damaged part of the tube

Keywords: (Ratcheting, cyclic loading, corroded pipe, wrinkling, circular tubes)