



## بررسی پدیده کرنش‌های پیش‌رونده در محل‌های خوردگی با اشکال و عمق‌های متفاوت در لوله‌های زانویی شکل تحت فشار داخلی به همراه ممان‌های خمشی دوره‌ای

علی صالحی، محمد زهساز\*، فرید و کیلی تهامی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۵ خرداد ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۳۰ مرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

لوله زانویی شکل  
کرنش‌های پیش‌رونده  
ممان‌های خمشی دوره‌ای  
فولاد ضدزنگ 304LN  
ضرایب سخت‌شوندگی

**چکیده:** طراحی خطوط لوله در صنایع مختلفی از جمله: صنایع پتروشیمی، نیروگاه‌های اتمی و سایر صنایعی که خطوط لوله، تحت فشار نسبتاً زیادی قرار دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌ویژه هنگامی که این خطوط لوله، تحت بارهای خارجی به‌صورت سیکلی، همچون هنگام وقوع پدیده زلزله، قرار گیرند. در این حالت بررسی تغییر شکل‌های پیش‌رونده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ خصوصاً خطوط لوله‌ای که تحت تأثیر محیط اطراف یا سیالی که حامل آن است دچار واکنش‌های شیمیایی و درنهایت دچار خوردگی شوند.

در این مقاله کرنش‌های پیش‌رونده در نواحی خوردگی نمونه زانویی شکل به‌صورت عددی توسط کد کامپیوتری آباکوس مورد بررسی قرار گرفته شده است. خوردگی‌ها با اشکال هندسی کروی و مکعبی شکل و با دو عمق یک و دو میلی‌متری، در محل‌های حساس از لوله زانویی شکل، مانند محل‌های تقارن در نواحی قوس داخلی، میانی و خارجی اعمال شده است. درنهایت نتایج حاکی از تأثیر مخرب خوردگی و افزایش این تأثیر مخرب با افزایش عمق خوردگی و وابسته بودن آن به شکل هندسی خوردگی‌های اعمال شده است، به‌طوری که در محل‌های خوردگی با شکل هندسی مکعبی شکل نسبت به نوع کروی شکل کرنش‌های پیش‌رونده رشد بیشتری داشتند. همچنین رشد کرنش‌های پیش‌رونده در جهت محیطی بسیار بیشتر از جهت محوری، در تمام نواحی نمونه مربوطه به دست آمد.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کوشش‌های زیادی با توجه به اهمیت تغییر شکل‌های پیش‌رونده<sup>۱</sup> در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع هسته‌ای، صنایع پتروشیمی، نیروگاه‌ها و سایر صنایع مرتبط در طراحی ایمنی خطوط لوله تحت فشار صورت گرفته است. این پدیده در شرایط اعمال بارهای سیکلی به همراه بارهای ثابت مطرح می‌شود که این حالت در هنگام وقوع زلزله یا استخراج منابع نفتی از بستر دریا که امواج نقش بارهای سیکلی و فشار داخلی نقش بارهای ثابت را بازی می‌کنند و یا روشن و خاموش شدن راکتورهای هسته‌ای در نیروگاه‌های اتمی، در تجهیزات به‌کاررفته در صنایع فوق به وقوع می‌پیوندد [۱].

سازه‌ها بنا به کاربردی که دارند در صورت حضور یک سری از عوامل می‌توانند دچار واکنش‌های شیمیایی شوند. همچنین حضور یک سری از عوامل تأثیرگذار به این واکنش‌های شیمیایی، از قبیل بازی یا اسیدی بودن محیط یا سیالی که خطوط لوله حامل آن است، درصد رطوبت، شرایط دمایی و ... باعث شکل‌گیری خوردگی‌های موضعی با عمق‌های متفاوت بعد از یک زمان مشخص می‌شوند که در این صورت اهمیت بررسی و تحلیل پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده بر روی سازه مورد نظر به دلیل تمرکز تنش

ایجادشده در ناحیه خوردگی دوچندان می‌باشد. همچنین به علت کم چرخه بودن این پدیده نسبت به پدیده خستگی به علت همزمانی و بالا بودن هر دو نوع بارهای ثابت و سیکلی و کاربرد این سازه‌ها در صنایع حساس که وقوع حوادث پیامدهای هزینه‌ای در بر خواهد داشت، اهمیت این بررسی و تحلیل را بیش از پیش بالا می‌برد. به‌عنوان مثال خطوط لوله استخراج منابع نفتی از بستر دریا که در محیط آبی دریا قرار دارند و همچنین سیالاتی که از داخل خطوط لوله جریان دارند، می‌توانند باعث ایجاد خوردگی‌های موضعی در خطوط لوله شوند. در حضور بارهای ثابت به همراه سیکلی و اتفاق افتادن کرنش‌های پیش‌رونده در محل خوردگی که تمرکز تنش هم وجود دارد، احتمال پارگی موضعی در لوله مربوطه و همچنین خطرات پرهزینه و جبران‌ناپذیر وجود دارد. این نیز به نوبه خود اشاره به اهمیت فراوان بررسی و تحلیل کرنش‌های پیش‌رونده در مواضع خورده شده خطوط لوله دارد [۲]. در حالت کلی سازه‌ها می‌توانند تحت دو نوع بارگذاری ثابت و سیکلی قرار گیرند، منظور از بارهای ثابت بارهایی هستند که در آن بار وارده از مقدار صفر به‌تدریج افزایش یافته و به مقدار موردنظر رسیده و در همان جا ثابت باقی می‌ماند و دیگر باربرداری و یا افزایش بار با گذشت زمان صورت نمی‌گیرد. نوع دوم بارگذاری، بارهایی هستند که در آن، عمل بارگذاری همانند نوع اول انجام گرفته و در ادامه عمل باربرداری نیز صورت می‌گیرد و این عمل بارگذاری و باربرداری دائماً تکرار می‌شود. اگر این دو نوع بارگذاری به‌طور

1 Ratcheting

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zehsaz@tabrizu.ac.ir

تحت فشار داخلی و خمش تکراری معکوس شونده پرداخته است. شرایط ایجاد پدیده کرنش‌های پیش‌رونده طبق نظریه وی مستلزم وجود دو شرط زیر است:

الف) سازه موردنظر به‌طور همزمان تحت فشار استاتیک و بار سیکلی باشد.

ب) در نیم سیکل اول یک‌طرف لوله در محدوده پلاستیک و نیمی دیگر در محدوده الاستیک باشد.

زیندینی و همکاران<sup>[۲]</sup> اثر پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده در خطوط لوله که تحت یک‌بار محوری ثابت و یک‌بار محوری سیکلی قرار دارد را که خطوط لوله تحت آسیب خوردگی قرار دارد را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش خوردگی به صورت شکل مربعی شبیه‌سازی شده بود و نتایج حاکی از آن است که پدیده رشد کرنش‌های پیش‌رونده در محل خوردگی رشد بیشتری داشته و یک مسیر نمایی را طی می‌کند در صورتی که در نواحی سالم لوله رشد خطی پایینی دارد.

تاکنون اکثر پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته برای نمونه‌های سالم بوده و برای نمونه‌های آسیب‌دیده پژوهش‌های صورت گرفته بسیار محدود است. از طرفی از آنجایی که در هنگام وقوع پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده مقادیر بارهای اعمالی، زیاد و به‌نوعی فراتر از مقاومت تسلیم نمونه تحت بار است، لذا در هنگام وجود آسیب در نمونه موردنظر، تمرکز تنش ایجاد شده در ناحیه آسیب، باعث ایجاد ترک یا پارگی در ناحیه آسیب‌دیده نمونه موردنظر می‌شود. از طرفی از آنجایی که این پدیده، بیشتر در صنایع حساسی از قبیل: صنایع هسته‌ای، نیروگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و ... به دلیل بالا بودن دامنه بارهای اعمالی مطرح است، در صورت وقوع حوادث خسارات کلان مالی و جانی در پی خواهد داشت. لذا در این مقاله کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه‌های تحت آسیب خوردگی و در محل‌های خوردگی مورد بررسی قرار گرفته است که با استناد به نتایج این پژوهش و استفاده از آن در طراحی یا بازرسی‌های مکرر می‌توان از بروز این حوادث جلوگیری نمود.

نمونه مورد بررسی در این پژوهش لوله زانویی شکل از جنس فولاد ضدزنگ 304LN می‌باشد.

از آنجایی که برای انجام تحلیل‌های عددی نیاز به ضرایب سخت‌شوندگی جنس مذکور می‌باشد، برای همین منظور منحنی‌های هیستریز متناظر با دامنه‌های کرنش متفاوت حاصل از نتایج تجربی، برای جنس موردنظر، با مدل پلاستیسیته کالیبره شده و سهم هر یک از مؤلفه‌های سختی در پاسخ کلی مشخص گردیده است. سپس با مشخص شدن ثوابت سینماتیکی و ایزوتروپیک مربوط به جنس مربوطه از مدل ترکیبی سینماتیکی-ایزوتروپیک جهت تحلیل عددی توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

همزمان به یک سازه اعمال شود، در آن صورت پدیده شیکدان<sup>۱</sup> و یا پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده برای سازه موردنظر مطرح می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که در این حالت نباید اصلاً سازه که به‌طور همزمان تحت بارهای ثابت به همراه بارهای سیکلی قرار دارد را با سازه‌ای که فقط تحت بار سیکلی قرار دارد و فقط پدیده خستگی در آن مطرح است را مقایسه نمود. چراکه در بحث تغییر شکل‌های پیش‌رونده تعداد سیکل‌های لازم برای تمام شدن عمر سازه موردنظر بسیار کمتر از تعداد سیکل‌ها در بحث خستگی است. حال وقتی سازه‌ای تحت بارهای ثابت به همراه بارهای سیکلی قرار گیرد، ابتدا یک پاسخ گذرا از خود به نمایش گذاشته و سپس به حالت پایدار می‌رسد، پاسخ پایدار مرتبط با مکانیسم کرنش‌های پیش‌رونده می‌باشد و می‌توان پاسخ پایدار را به انواع زیر تقسیم‌بندی نمود:

- شیکدان الاستیک: در این حالت از انواع پاسخ‌های پایدار سازه همواره در ناحیه الاستیک قرار داشته و هیچ کرنش پلاستیکی برای سازه اتفاق نیفتاده و ما هیچ کرنش پیش‌رونده‌ای نخواهیم داشت.

- شیکدان پلاستیک: در این حالت از انواع پاسخ‌های پایدار سازه دچار کرنش پلاستیک می‌شود ولی بعد از گذر چند سیکل مقدار کرنش پلاستیک کل صفر می‌شود. چراکه میزان کرنش پلاستیک افزایش یافته در هر سیکل با میزان کرنش پلاستیک کاهش یافته در سیکل بعدی خنثی شده و در مجموع کرنش‌ها ثابت می‌مانند.

- تغییر شکل‌های پیش‌رونده: در این حالت از انواع پاسخ‌های پایدار در هر سیکل مقداری کرنش پلاستیک به سازه‌ای که تحت بارگذاری قرار دارد افزوده شده و کرنش‌های پلاستیک همواره در حال رشد می‌باشند [۳].

برای نخستین بار پژوهش در مورد تغییر شکل‌های پیش‌رونده در لوله زانویی در سال ۱۹۶۱ توسط ادموند و بیر<sup>[۴]</sup> مطرح شد.

همچنین تغییر شکل‌های پیش‌رونده لوله‌های مستقیم و زانویی از جنس فولاد کربنی تحت فشار و تحت خمش سیکلی به صورت تجربی و تحلیلی توسط چن<sup>۲</sup> و همکاران [۵] و گائو<sup>۴</sup> و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نشان داده شده که مدل چن-جیائو-کیم<sup>۵</sup> می‌تواند شبیه‌سازی منطقی تغییر شکل‌های پیش‌رونده را انجام دهد.

در ادامه ناکامورا و همکاران<sup>[۷]</sup> به‌طور تجربی زانویی تحت فشار با دیواره محلی نازک شده با کنترل جابه‌جایی و خمش سیکلی مورد بررسی قرار داده و مدل‌های شکست و عمر خستگی زانویی تحت این پدیده مورد بررسی قرار گرفت.

بینی<sup>[۸]</sup> نیز به بررسی کرنش‌های پیش‌رونده در یک لوله جدار نازک

- 1 Shakedown
- 2 Edmund and Beer
- 3 Chen and et al.
- 4 Gao and et al.
- 5 CJU
- 6 Nakamura and et al.
- 7 Beany

## ۲- ارزیابی صحت تحلیل عددی صورت گرفته

برای اثبات درستی و صحت تحلیل‌های عددی صورت گرفته، یک مقاله تجربی، شامل لوله زانویی شکل از جنس فولاد ضد زنگ 304LN، تحت فشار داخلی به همراه ممان‌های سیکلی داخل صفحه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته که از لحاظ بارگذاری و شرایط مرزی بسیار شبیه به نمونه مورد بررسی در این مقاله بوده و از طرفی ابعاد هندسی لوله زانویی شکل مورد بررسی در این مقاله نیز مطابق با ابعاد هندسی نمونه مورد بررسی در مقاله مرجع که برای صحت سنجی انتخاب شده است، می‌باشد.

یکی از اصلی‌ترین پارامترها در تحلیل‌های مربوط به پدیده کرنش‌های پیش‌رونده، استخراج پارامترهای سخت‌شوندگی مربوط به جنس نمونه مورد نظر است. از این‌رو قبل از انجام تحلیل‌های عددی باید خواص سخت‌شوندگی جنس مربوطه، مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب سخت‌شوندگی استخراج شود چراکه در تحلیل‌های عددی نیاز به استفاده از این ضرایب می‌باشد.

### ۲-۱- خصوصیات سخت‌شوندگی مربوط به جنس مربوطه

در حالت کلی برای تعریف سخت‌شوندگی مواد، پنج مدل اساسی وجود دارد که به شرح زیر است:

- مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک دوخطی<sup>۱</sup>
- مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی دوخطی<sup>۲</sup>
- مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی<sup>۳</sup>
- مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی غیرخطی<sup>۴</sup>

- ترکیب مدل ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیکی غیرخطی

مدل‌های غیرخطی برای رفع نواقص موجود در مدل‌های دوخطی ارائه گردیده است. در مدل‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک مانند شکل ۱ سطح تسلیم در فضای سه‌بعدی تنش تغییر حجم داده و هیچ تغییر مکانی برای این سطح تسلیم در فضای مربوطه صورت نمی‌گیرد.

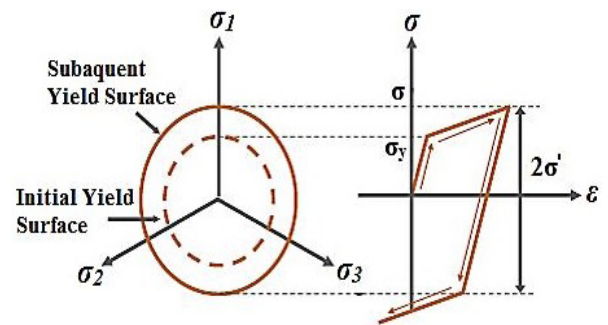


Fig. 1. Isotropic hardening model

شکل ۱: مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک [۹]

- 1 Bilinear Isotropic Hardening (Biso)
- 2 Bilinear Kinematic Hardening (Bkin)
- 3 Non linear Isotropic Hardening (Nilso)
- 4 Non linear Kinematic Hardening (Chaboche)

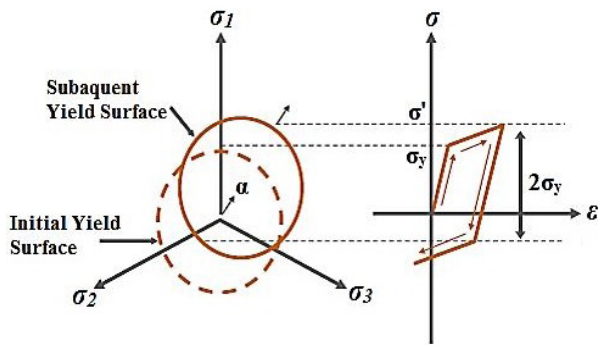


Fig. 2. Kinematic hardening model

شکل ۲: مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی [۹]

در این مدل تسلیم کششی و فشاری همواره برابر بوده و به همین دلیل این مدل نمی‌تواند اثر بوشینگر<sup>۵</sup> را در نظر بگیرد، از این‌رو برای مدل‌سازی بارهای سیکلی مناسب نمی‌باشد [۱۰].

در مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیکی عکس حالت ایزوتروپیک سطح تسلیم در فضای سه‌بعدی تنش فقط تغییر مکان داده و هیچ تغییر حجمی در آن صورت نمی‌گیرد که نحوه عملکرد این مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است.

این مدل عکس مدل قبل اثر بوشینگر را در نظر می‌گیرد، از این‌رو برای مدل‌سازی بارهای سیکلی مناسب‌تر از مدل قبل می‌باشد.

در این مقاله برای افزایش دقت تحلیل از مدل پنجم به شرح زیر استفاده شده است:

### ۲-۱-۱- تعیین پارامترهای سخت‌شوندگی ایزوتروپیک:

این ضرایب با نمادهای  $Q$ ,  $b$  در رابطه مدل پلاستیسیته مربوط به سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، به شکل رابطه (۱) قابل مشاهده هستند:

$$\sigma = \sigma_0 + Q \left( 1 - \exp \left( -b \frac{\Delta \epsilon p}{2} \right) \right) \quad (1)$$

برای به دست آوردن این ضرایب از اطلاعات تجربی مربوط به آزمون

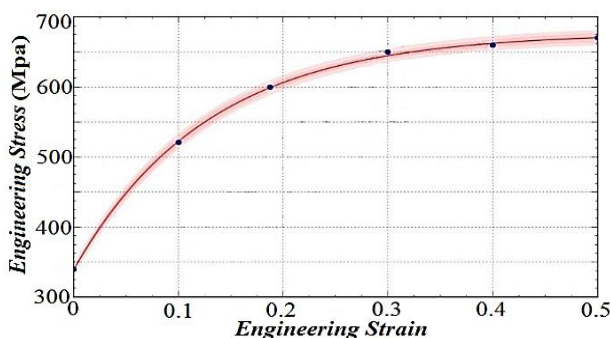


Fig. 3. Calibrated graph corresponding to the isotropic hardening parameters

شکل ۳: نمودار کالیبره شده مربوط به ضرایب سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

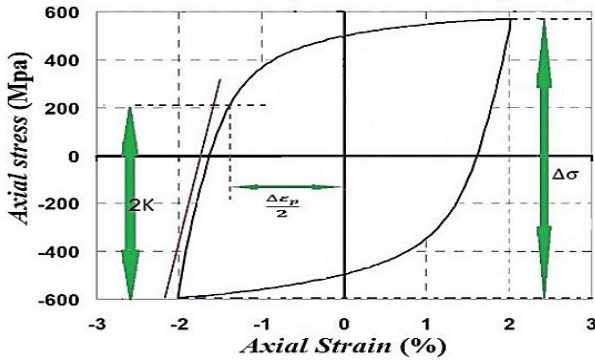


Fig. 5. Determination of parameters  $K$ ,  $\Delta\sigma/2$ , and  $\Delta\epsilon_p/2$  in the hysteresis curve

شکل ۵: نحوه به دست آوردن پارامترهای  $k$ ،  $\Delta\sigma/2$  و  $\Delta\epsilon_p/2$  در منحنی هیستریزیس

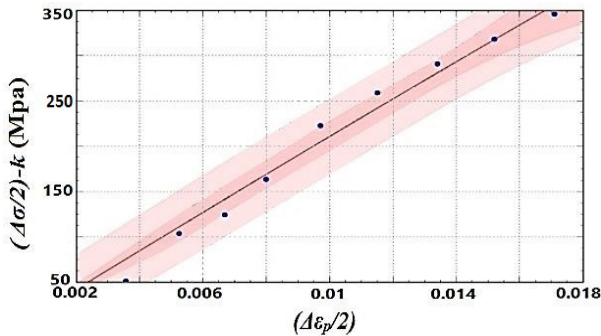


Fig. 6. Fitted graph corresponding to the kinematic hardening coefficients

شکل ۶: نمودار کالیبره شده مربوط به ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیکی

$$\frac{\Delta\sigma}{2} - k = \frac{C}{\gamma} \tanh\left(\gamma \frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right) \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $K$  معرف نصف بخش الاستیک منحنی‌های هیستریزیس می‌باشد که در شکل ۵ تمامی پارامترهای موجود در رابطه فوق نشان داده شده است.

در ادامه هر کدام از منحنی‌های هیستریزیس در فضای دوبعدی با محور عمودی  $k - \Delta\sigma/2$  و محور افقی  $\Delta\epsilon_p/2$  معرف یک نقطه می‌باشند که با کالیبره کردن معادله پلاستیسیته (معادله (۲)) حول نقطه‌های موجود ضرایب سخت‌شوندگی مربوط به جنس مورد نظر قابل دست‌یابی است [۱۱]. در شکل ۶ نمودار کالیبره شده معادله مربوطه حول نقاط مربوط به منحنی‌های هیستریزیس نمایش داده شده است.

ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیکی  $C$  و  $\gamma$  بعد از کالیبره نمودن معادله (۲) حول نقاط موجود مطابق شکل ۶ به ترتیب ۲۱۲۹۳ مگاپاسکال و ۱۴/۷ به دست آمده‌اند.

حال با در دست داشتن این چهار ضریب سخت‌شوندگی:  $C$ ،  $b$ ،  $Q$  و  $\gamma$  می‌توان تحلیل عددی مربوطه و همچنین صحت تحلیل عددی را با مقایسه با نتایج تجربی روی نمونه مورد بررسی ارزیابی نمود که در بخش بعدی همین هدف، یعنی صحت سنجی تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

کشش ساده استفاده شده است به گونه‌ای که از نقطه شروع تسلیم تا تنش نهایی چند نقطه، انتخاب و معادله فوق حول نقاط انتخاب شده کالیبره یا فیت شده و ضرایب مربوطه به دست آمده است [۱۱]. هرچه تعداد نقاط انتخابی بیشتر باشد، ضرایب به دست آمده دقیق‌تر خواهند بود.

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، در این مقاله ۶ نقطه در محدوده مذکور انتخاب شده است.

بدین ترتیب مقدار ضرایب سخت‌شوندگی  $Q$  و  $b$  به ترتیب ۳۳۷ مگاپاسکال و ۷/۸ به دست آمده‌اند.

## ۲-۱-۲- تعیین پارامترهای سخت‌شوندگی سینماتیکی

سه روش برای محاسبه ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیکی با توجه به داده‌های تجربی وجود دارد که به شرح زیر است:

- استفاده از یک نیم سیکل هیستریزیس
  - استفاده از یک سیکل کامل هیستریزیس پایدار شده
  - استفاده از چند سیکل کامل هیستریزیس پایدار شده
- که در این مقاله از مدل چند سیکل کامل پایدار شده برای محاسبه ضرایب سخت‌شوندگی مربوطه استفاده شده است.

معمولاً برای کالیبره کردن داده‌های تجربی با معادله پلاستیسیته مربوطه از سه یا چهار منحنی هیستریزیس پایدار شده استفاده می‌شود، در این مقاله برای دقت بالای ضرایب محاسبه شده از ۹ منحنی استفاده شده است. ۹ سیکل کامل هیستریزیس پایدار شده با دامنه‌های کرنشی متفاوت حاصل از داده‌های تجربی برای جنس مربوطه در شکل ۴ ارائه گردیده است.

معادله (۲) معادله پلاستیسیته مربوط به مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی می‌باشد که  $C$  و  $\gamma$  موجود در رابطه، ضرایب سخت‌شوندگی ایزوتروپیک هستند

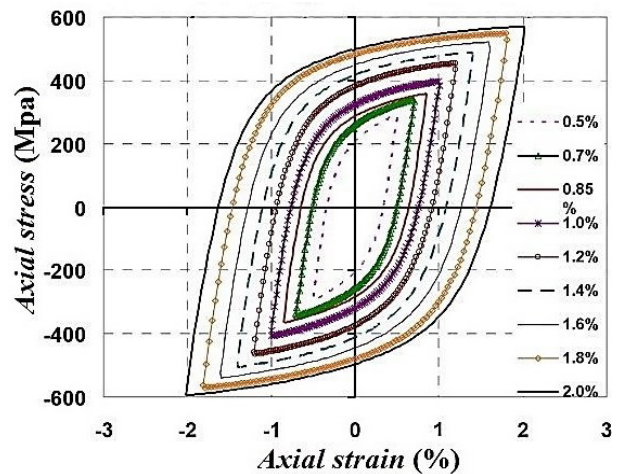


Fig. 4. Stable hysteresis curves with different strain ranges

شکل ۴: منحنی‌های هیستریزیس پایدار شده تحت دامنه‌های کرنشی متفاوت [۱۲]

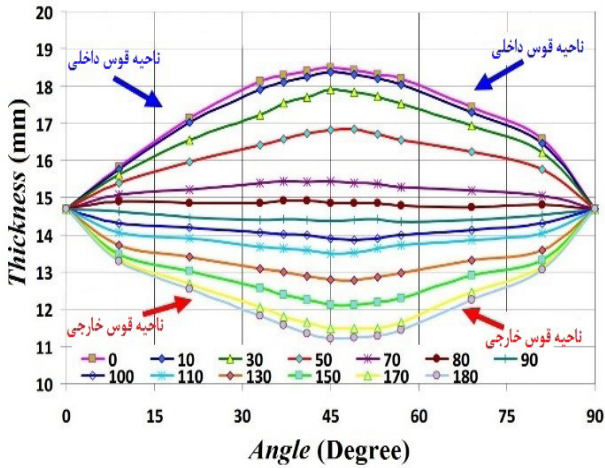


Fig. 9. Thickness differences in the axial direction and in different points of the mesh

شکل ۹: تفاوت ضخامت در جهت محوری و در محل شبکه‌ها [۱۲]

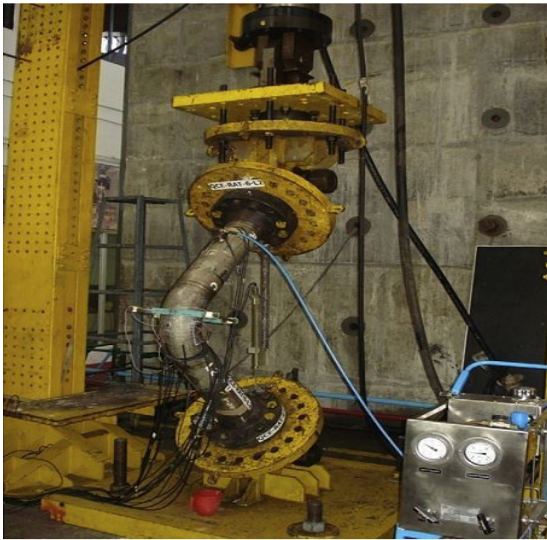


Fig. 10. Experimental test of an elbow pipe  
شکل ۱۰: آزمایش تجربی نمونه زانویی شکل [۱۴]

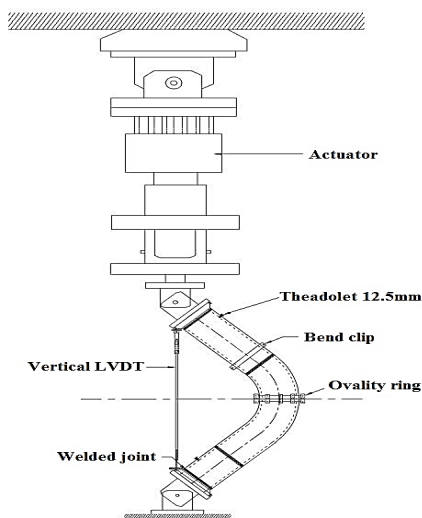


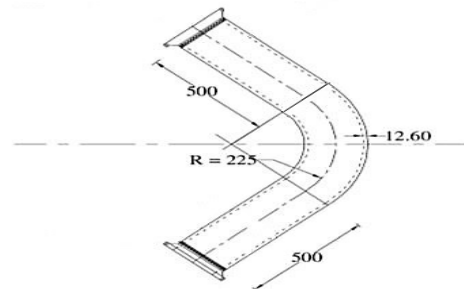
Fig. 11. Schematic representation of the used test device  
شکل ۱۱: آرایش نمای شماتیک آزمون تجربی [۱۵]

## ۲-۲- مقایسه نتایج حاصله از تحلیل عددی با نتایج تجربی

در این قسمت برای اثبات صحت تحلیل عددی یک مقاله شامل لوله زانویی شکل تحت فشار داخلی و ممان‌های سیکلی داخل صفحه‌ای که توسط ویشنواردهان [۱۳] صورت گرفته بود، به وسیله نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل عددی قرار گرفته است.

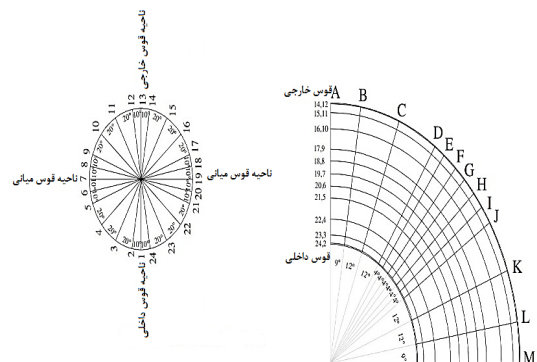
در کار تجربی انجام شده توسط ویشنواردهان فشارها و ممان‌های متفاوتی بر روی لوله زانویی شکل اعمال شده که در این مقاله، حالتی که دارای فشار ۳۷/۹ مگاپاسکال و ممان‌های ناشی از اعمال کورس‌های جابه‌جایی چرخه‌ای به اندازه +۵۱ و -۵۱ میلی‌متر و ابعاد توصیف شده مربوط به این حالت مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی و سایر شرایط انجام آزمایش تجربی در مقاله مذکور به طور کامل توصیف شده که در این مقاله نیز به صورت مختصر به آن‌ها اشاره خواهد شد. جنس نمونه تحت آزمایش نیز فولاد ضدزنگ 304LN می‌باشد.

در شکل ۷ ابعاد زانویی مورد بررسی با قطر خارجی ۱۶۸ میلی‌متر ارائه شده است. ضخامت جداره این نمونه در همه جا یکسان نبوده، به گونه‌ای که ضخامت در ناحیه قوس داخلی نمونه زانویی شکل بیشتر از ضخامت در قوس خارجی بوده که در مقاله مذکور (مقاله انتخاب شده جهت صحت‌سنجی)



All dimensions are in mm.

Fig. 7. Dimensions of elbow sample  
شکل ۷: ابعاد نمونه زانویی شکل [۱۴]



All dimensions are in mm.

Fig. 8. Sample pipe meshing to address the different regions  
شکل ۸: شبکه‌بندی نمونه برای شناسایی نواحی مختلف [۱۳]

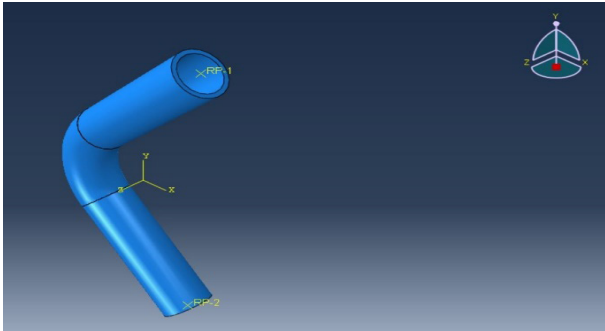


Fig. 13. Sample produced in the numerical analysis  
شکل ۱۳: نمونه ساخته شده در نرم افزار آباکوس

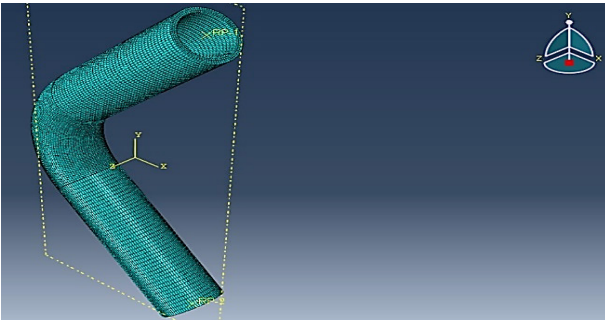


Fig. 14. Meshed elbow  
شکل ۱۴: نمونه مش بندی شده در نرم افزار آباکوس

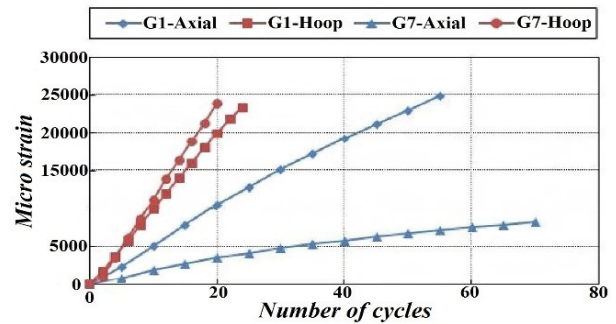


Fig. 12. Curves of ratcheting strains in the inner and central arcs regions

شکل ۱۲: منحنی کرنش های پیش رونده در نواحی قوس داخلی و قوس میانی [۱۳]

ضخامت میانگین ۱۴/۷ میلی متر بیان شده است. در شکل ۸ نحوه شبکه بندی زانویی برای آدرس دهی کرنش های پیش رونده در محل های مختلف نمونه مورد بررسی نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است خط  $G$  خط محوری زانویی را به دو قسمت متقارن تقسیم می کند و در شبکه بندی محیطی هم نودهای ۱، ۷ و ۱۳ نقاط حساس زانویی یعنی نقاط تقارن در قوس های داخلی، بیرونی و میانی هستند که مورد بررسی قرار می گیرند؛ همچنین در شکل ۹ ضخامت دقیق تمامی نواحی نمونه مربوطه نشان داده شده است.

همچنین در شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نحوه بارگذاری نمونه مربوطه در آزمایش تجربی به صورت شماتیک و واقعی نشان داده شده است. در نهایت نتایج تجربی حاصل از آزمایش های تجربی به صورت نمودارهای شکل ۱۲ ارائه شده است.

بدین ترتیب زانویی فوق در نرم افزار آباکوس با شرایط مرزی، بارگذاری و ضرایب سخت شوندگی مربوطه مدل سازی شده است، به نحوی که برای سطح مقطع بالایی و پایینی یک نقطه مینا تعریف و سطح مقطع مربوطه به آن کوپل شده و سپس با توجه به شکل ۱۱ برای سطح مقطع پایینی تمام درجه های آزادی به جز چرخش حول محور  $z$  محدود شده و برای سطح مقطع بالا نیز تمام درجه های آزادی به جز چرخش حول محور  $z$  و حرکت در راستای محور  $y$  محدود شده است. همچنین برای مش بندی زانویی مربوطه مطابق شکل ۱۱ از ۳۴۲۰۰ المان از نوع  $C3D8R$  استفاده شده است، که با افزایش تعداد المان ها تا ۶۸۴۰۰ المان نتایج در حدود ۱/۵ درصد تغییر می کرد که قابل چشم پوشی و می توان گفت که نمونه مربوطه در تعداد المان ۳۴۲۰۰ دارای استقلال از شبکه است. همچنین در این تحلیل ها از مدل سخت شوندگی ترکیبی ایزوتروپیک-سینماتیکی استفاده شده و از ضرایب  $C$ ،  $b$ ،  $\gamma$  و  $Q$  که در بخش قبل به دست آمد، استفاده شده است.

در شکل ۱۳ نمونه ساخته شده در نرم افزار آباکوس و همچنین در شکل ۱۴ نحوه مش بندی نمونه مورد نظر نمایش داده شده است.

در نهایت نتایج حاصله را با نتایج تجربی مقایسه شده که نمودارهای مربوط به مقایسه کرنش های پیش رونده برای تحلیل های عددی و نتایج تجربی را در شکل های ۱۵ و ۱۶ برای کرنش های پیش رونده در ناحیه ۱G،

به ترتیب در جهت محیطی و محوری و همچنین در شکل های ۱۷ و ۱۸ نیز همین مقایسه در ناحیه  $G7$ ، به ترتیب در جهت محیطی و محوری ارائه شده است که نشانگر تطابق خوب بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از تحلیل های عددی است.

علی رغم این که در زمینه کرنش های پیش رونده تئوری بسیار دقیق و کاملی وجود ندارد و با تمام تلاش هایی که در این زمینه صورت گرفته هنوز اختلاف بین نتایج روش های تئوری و تجربی زیاد است، با این وجود در تحلیل های عددی صورت گرفته در این مقاله، دقت نتایج عددی بسیار مناسب و مطلوب است.

همان طور که در نمودارهای فوق قابل مشاهده است، درصد خطای نمودارهای مربوط به تحلیل عددی با رشد سیکل های بارگذاری، رفته رفته کاهش پیدا کرده و در پر خط ترین نمودار که مربوط به کرنش محیطی در نود  $G$  می باشد بعد از گذر تنها ۲۰ سیکل مقدار خطا حدوداً به ۴/۵ درصد رسیده که بسیار مطلوب است و همچنین در حالتی که مقدار خطا به ۴/۵ درصد رسیده نمودارهای مربوط به حالت تجربی و عددی به نوعی، نسبت به هم موازی و هم راستا هستند، یعنی اگر عملیات بارگذاری ادامه پیدا کند خطا همچنان ۴/۵ درصد باقی مانده و یا حتی ممکن است کمتر شود که این قضیه در تمامی نمودارهای مربوط به صحت سنجی صادق است. دلیل این که در سیکل های ابتدایی مقدار خطا نسبت به سیکل های انتهایی کمی بیشتر است را این گونه می توان توجیه نمود که قاعده کلی پدیده کرنش پیش رونده به این صورت است که رشد کرنش در هر سیکل نسبت به سیکل قبلی با یک نرخ خاصی کاهش می یابد و این نرخ کاهش

به دلایلی چه در واقعیت و چه در تحلیل‌های عددی کاهش یا افزایش یابد که از دلایل آن نیز می‌توان به دشواری مدل‌سازی سخت‌شوندگی جنس مربوطه و غیرممکن بودن مدل‌سازی آن با خطای صفر در تحلیل‌های عددی اشاره نمود و همچنین در واقعیت نیز ممکن است با توجه به هندسه مدل و نحوه بارگذاری و سایر شرایط مرتبط به آزمایش این نرخ کاهش در رشد کرنش تغییر کرده و کم و زیاد شود. همچنین ذکر این نکته ضروری است که تقریباً در تمامی مدل‌های سخت‌شوندگی برای به دست آوردن ضرایب سخت‌شوندگی مربوطه از اطلاعات مربوط به آزمایش‌های استاندارد شامل: آزمون کشش ساده و آزمون کشش-فشار جهت دستیابی به منحنی‌های هیستریزس، استفاده می‌شود که هر دو آزمون به صورت تک‌محوره می‌باشند، در نتیجه منطقی است که ضرایب سخت‌شوندگی به دست آمده، در حالتی که بارگذاری به صورت چند محوره است نسبت به حالت بارگذاری تک‌محوره دقت کمتری داشته باشند.

### ۳- اعمال خوردگی به نمونه زانویی شکل موردنظر

ابعاد نمونه زانویی شکل موردنظر برای اعمال آسیب خوردگی، مشابه نمونه زانویی شکل مربوط به مقاله‌ای که برای صحت‌سنجی انتخاب شده بود، می‌باشد.

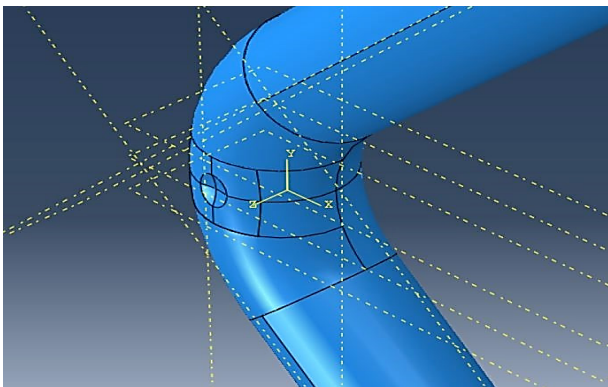


Fig. 19. Sample with spherical corrosion at the depth of 1 mm in the central arc

شکل ۱۹: نمونه دارای خوردگی کروی به عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس میانی

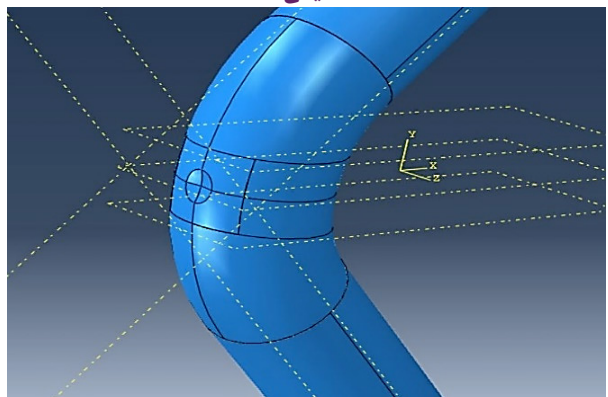


Fig. 20. Sample with spherical corrosion at the depth of 1 mm in the outer arc

شکل ۲۰: نمونه دارای خوردگی کروی به عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

آن قدر ادامه می‌یابد که در نهایت در صورتی که خود پدیده کرنش پیش‌رونده منجر به فروپاشی قطعه نگردد، به مقدار صفر میل نموده و دیگر با اعمال سیکل‌های بارگذاری رشد کرنش وجود نخواهد داشت. طبق این تئوری نرخ رشد کرنش در سیکل‌های ابتدایی بالا بوده و این نرخ رفته‌رفته کاهش پیدا می‌کند که به همین صورت نیز برای نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. نتایج عددی ما نیز صحت ادعای فوق را تأیید می‌کند. در واقعیت نیز به همین صورت است. ولی ممکن است گاه این کاهش نرخ رشد کرنش بنا

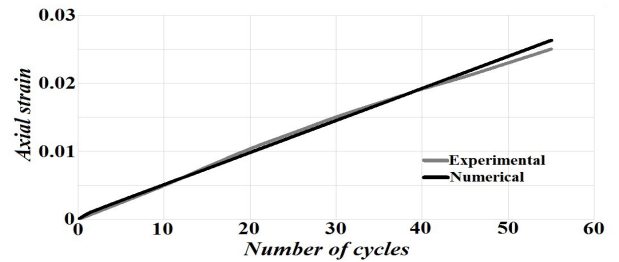


Fig. 15. Experimental and numerical comparison of the axial ratcheting strains in G1 region

شکل ۱۵: مقایسه رشد کرنش‌های پیش‌رونده محوری عددی و تجربی در ناحیه 1G

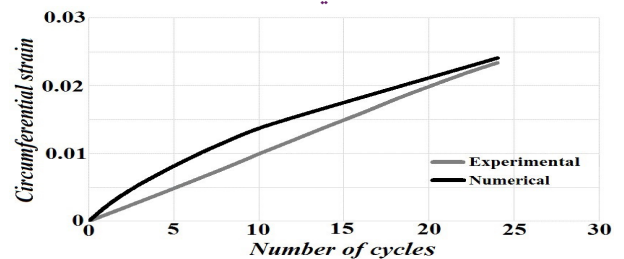


Fig. 16. Experimental and numerical comparison of the hoop ratcheting strains in G1 region

شکل ۱۶: مقایسه رشد کرنش‌های پیش‌رونده محیطی عددی و تجربی در ناحیه 1G

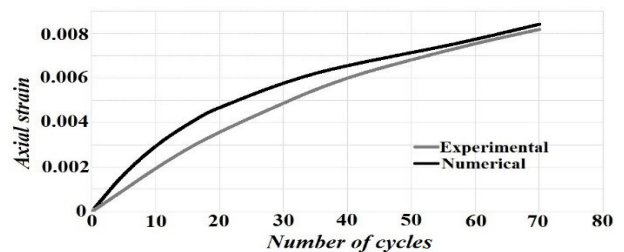


Fig. 17. Experimental and numerical comparison of the axial ratcheting strains in G7 region

شکل ۱۷: مقایسه رشد کرنش‌های پیش‌رونده محوری عددی و تجربی در ناحیه 7G

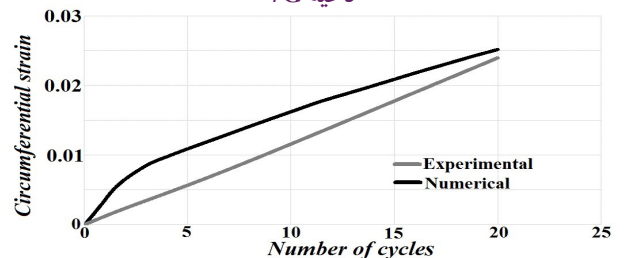


Fig. 18. Experimental and numerical comparison of the hoop ratcheting strains in G7 region

شکل ۱۸: مقایسه رشد کرنش‌های پیش‌رونده محیطی عددی و تجربی در ناحیه 7G

پیش‌رونده در محل‌های خوردگی می‌باشد، در نتیجه مدل‌سازی نمونه‌های آسیب‌دیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه ایجاد ناهماهنگی‌هایی همچون خوردگی در نمونه‌ها باعث خارج شدن نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس، از حالت استاندارد سازمان‌یافته<sup>۱</sup> و در نتیجه آن عدم مش خوردن درست و مرتب نمونه‌ها که در نهایت باعث افزایش خطای محاسباتی می‌شود. در ادامه با تکنیک‌های خاصی در نهایت تمام نمونه‌های دارای آسیب سازمان‌یافته شده و سپس مدل‌های مربوطه مش‌بندی شده‌اند. منظور از تکنیک‌های خاص، استفاده از روش‌های مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای ایجاد فرم هندسی مناسب می‌باشد که منجر به مش‌بندی با امان‌های منظم که با نسبت عرض به طول<sup>۲</sup> قابل قبول می‌شوند. با ایجاد مش مناسب طبیعتاً کاهش خطای محاسباتی خواهیم داشت. برای این منظور باید نمونه ساخته شده در نرم‌افزار، ابتدا با ایجاد مقطع<sup>۳</sup>‌های متفاوت سازمان‌یافته و از نظر کنترل صحت مش مورد قبول واقع شود. به بیان دیگر، منظور از تکنیک‌های خاص، ایجاد مقطع‌های متنوع و زیاد روی نمونه مورد نظر و در برخی مواقع جدا ساختن هر قسمت نمونه لوله زانویی شکل مربوطه (مثلاً قسمت خوردگی جدا ساخته شده و در نهایت روی نمونه زانویی شکل سوار شده است) و یا حتی استفاده از روش‌های برخورد و برش هندسه نمونه‌ها روی هم برای انطباق

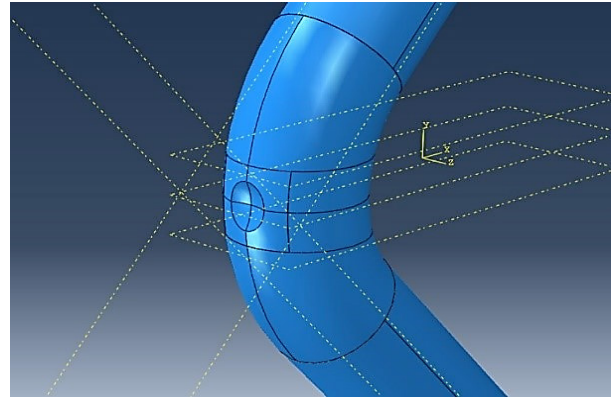


Fig. 21. spherical corrosion at the depth of 2 mm in the outer arc Sample with Sample with

شکل ۲۱: نمونه دارای خوردگی کروی به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

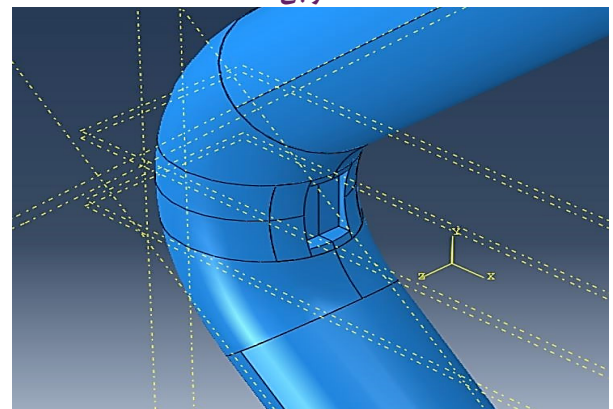


Fig. 22. cubic corrosion Sample with at the depth of 2 mm in the inner arc

شکل ۲۲: نمونه دارای خوردگی مکعبی به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

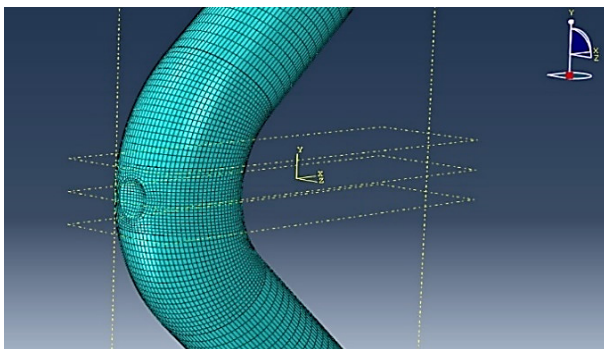


Fig. 23. A sample of meshed elbow for the case of spherical corrosion at the depth of 2mm in the outer arc

شکل ۲۳: مش‌بندی نمونه دارای خوردگی کروی به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

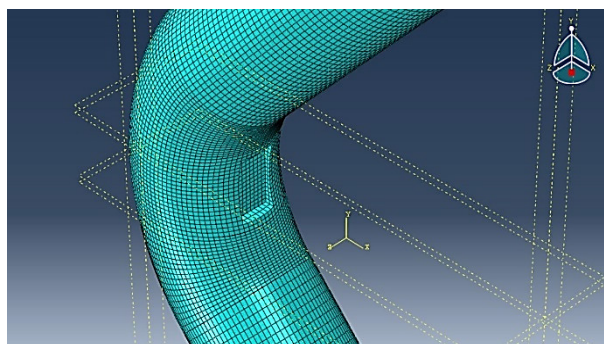


Fig. 24. A sample of meshed elbow for the case of cubical corrosion at the depth of 2mm in the inner arc

شکل ۲۴: مش‌بندی نمونه دارای خوردگی مکعبی به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

در این پژوهش آسیب خوردگی به صورت دو هندسه کروی شکل و مکعبی شکل اعمال خواهد شد و برای هر شکل دو عمق یک میلی‌متر و دو میلی‌متر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین این خوردگی‌ها در نواحی حساس نمونه زانویی شکل، همچون نواحی قوس داخلی، قوس میانی و قوس خارجی اعمال خواهد شد. تا مشخص شود که، کدام هندسه از خوردگی و در کدام ناحیه بحرانی‌ترین حالت است. در ادامه بررسی خواهد شد که افزایش عمق تا چه حدی، تأثیر در رشد کرنش‌های پیش‌رونده خواهد داشت. همچنین سایر پارامترهای دیگر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در شکل ۱۹ نمونه دارای آسیب خوردگی کروی شکل به عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس میانی نمایش داده شده است و در شکل ۲۰ نمونه دارای آسیب خوردگی کروی شکل به عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲۱ نمونه دارای آسیب خوردگی کروی شکل به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی نمایش داده شده است و در شکل ۲۲ نیز نمونه دارای آسیب خوردگی مکعبی شکل به عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی نمایش داده شده است. برای ارائه مدل‌های دارای آسیب خوردگی به ارائه همین چهار شکل بسنده شده است. از آنجایی که هدف اصلی در این مقاله بررسی پدیده کرنش‌های

- 1 Structural
- 2 Aspect ratio
- 3 Section



در نظر گرفته شده که طبق کد ASME برای محاسبه فشار طراحی از فرمول (۳) استفاده می‌شود [۱۶].

$$P_d = \frac{2S_m t}{D_o - 2yt} \quad (3)$$

در معادله (۳)  $D_o$  قطر خارجی،  $t$  ضخامت جداره،  $y$  ضریب ثابت و برابر  $S_m/4$ ، نیز تنش مجاز طراحی است که از معادله (۴) به دست می‌آید.

$$S_m = \min\left(\frac{1}{3}\sigma_u, \frac{2}{3}\sigma_y\right) \quad (4)$$

از آنجایی که نمونه مورد بررسی در این مقاله، دارای ضخامت یکنواخت نبوده و ضخامت آن در نواحی مختلف متغیر است، از این رو از کمترین ضخامت برای به دست آوردن فشار طراحی استفاده شده تا ضریب اطمینان بالاتر رود که طبق معادله‌های (۳) و (۴) فشار طراحی برای فولاد ضدزنگ 304LN با ابعاد بیان شده ۳۱/۱۵ مگاپاسکال می‌باشد.

### ۵- نتایج حاصل شده برای نمونه‌های آسیب‌دیده و سالم

پدیده کرنش‌های پیش‌رونده برای نمونه سالم تحت بارگذاری و شرایط مرزی مربوطه در جهت‌های محیطی و محوری و در نودهای حساس ۱G، ۷G و ۱۳G که به ترتیب مربوط به ناحیه قوس داخلی، میانی و خارجی می‌باشند، به ترتیب در اشکال ۲۵ تا ۲۷ نشان داده شده است.

ذکر این نکته ضروری است که نمودارهای مشکی و خاکستری رنگ در شکل ۲۵ حالت سینیوسی یا زیگزاگی داشته و به دلیل تراکم سیکل‌ها به صورت یک خط ضخیم توپر قابل مشاهده هستند که در شکل ۲۸ یکی از نمودارهای مربوط به این کرنش‌های پیش‌رونده با بزرگ‌نمایی برای نشان دادن شکل سینیوسی یا زیگزاگی کرنش‌های پیش‌رونده ارائه شده است.

در حالت کلی منحنی‌های مربوط به پدیده کرنش‌های پیش‌رونده حالت سینیوسی یا زیگزاگی همانند شکل ۲۸ داشته و معمولاً مرسوم است حد وسط این نمودارهای زیگزاگی یا سینیوسی که به صورت یک خط صاف است، همانند آنچه در شکل ۲۸ نشان داده شده است، در نمودارها ارائه می‌گردد. چراکه برای مقایسه چند نمودار در یک دستگاه مختصات اگر از حالت حد وسط که یک خط صاف است، استفاده نشود، نمودارها از کیفیت و زیبایی

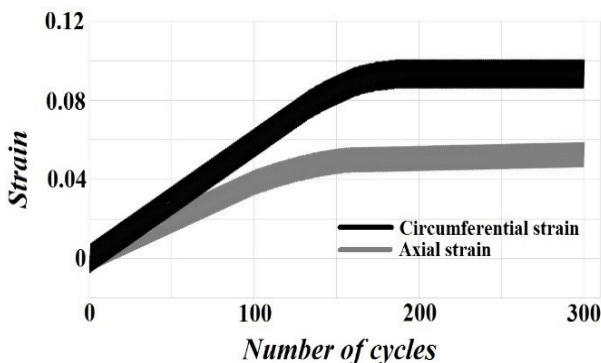


Fig. 25. Axial and hoop ratcheting strains in G1 region  
 شکل ۲۵: کرنش‌های پیش‌رونده محوری و محیطی در ناحیه G1

دقیق قطعاتی که قرار است روی هم سوار شوند، برای سازمان‌یافته شدن کل نمونه می‌باشد. در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ دو نمونه مش خورده به ترتیب برای حالت‌های خوردگی کروی‌شکل و مکعبی شکل به عمق دو میلی‌متر به ترتیب در نواحی قوس خارجی و قوس داخلی ارائه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است نمونه‌های دارای آسیب خوردگی، بسیار مطلوب مش‌بندی شده‌اند.

### ۴- نحوه بارگذاری، شرایط مرزی و جنس نمونه‌های آسیب‌دیده و سالم

ابعاد هندسی و شرایط مرزی نمونه زانویی شکل مورد تحلیل در این پژوهش دقیقاً مشابه زانویی آزمایش شده توسط ویشنوواردهان<sup>۱</sup> خواهد بود و تنها تفاوتی که وجود دارد در نحوه بارگذاری است که در این مقاله بارگذاری به صورت اعمال نیرو<sup>۲</sup> و نه اعمال جابه‌جایی<sup>۳</sup> (در مقاله کارشده توسط ویشنوواردهان در مبحث بارگذاری، جابه‌جایی اعمال شده بود که در این مقاله نیرو اعمال شده است) و در همان راستا که ویشنوواردهان جابه‌جایی اعمال کرده بود انتخاب شده است که بار به صورت سینیوسی اعمال می‌شود. دلیل این امر کاربردی بودن و به واقعیت نزدیک‌تر بودن این نوع از بارگذاری است که مقدار این بار ۱۰۰ kN انتخاب شده است که دلیل انتخاب این مقدار از بارگذاری اولاً با توجه به مقالات کارشده در این زمینه و ثانیاً انتخاب باری بیشتر از این مقدار باعث ورود به ناحیه خستگی فوق کم‌چرخه که نمونه مورد بررسی بعد از چند سیکل، به مرز فروپاشی رسیده و تحلیل متوقف می‌شود که این به نوبه خود مانع از این می‌شود که به صورت عمیق به تأثیر خوردگی در نمونه موردنظر در بازه وسیعی از سیکل‌های بارگذاری پرداخته شود. از طرفی نیز در نمونه‌ای که مورد بررسی قرار گرفته، فروپاشی بعد از گذشت تنها چند سیکل از بارگذاری به نوعی به دور از واقعیت است. از طرفی انتخاب باری کمتر از مقدار در نظر گرفته شده، باعث به تأخیر افتادن ناحیه‌ای از پدیده کرنش‌های پیش‌رونده می‌شود، که در آن با اعمال بارهای سیکلی دیگر رشد کرنش وجود نخواهد داشت که به ناحیه پایدار شده معروف است؛ که یکی از مهم‌ترین نواحی پدیده کرنش‌های پیش‌رونده و همچنین از مهم‌ترین فاکتورها برای بیان تأثیر خوردگی نمونه‌های آسیب‌دیده نسبت به نمونه سالم و همچنین مقایسه نمونه‌های آسیب‌دیده با عمق‌های متفاوت خوردگی و به تبع آن اشکال متفاوت خوردگی می‌باشد. به تأخیر افتادن این ناحیه در تحلیل‌های عددی به دلیل حجم بالای محاسبات نیازمند سیستم‌های کامپیوتری بسیار نیرومند می‌باشد، از طرفی تقدم و تأخیر این ناحیه هیچ نکته مثبتی در کیفیت کار نخواهد داشت.

از این رو پس از بررسی مقالات مختلف کارشده در این زمینه و همچنین با انجام تحلیل‌های عددی آزمایشی مقدار بار اعمالی ۱۰۰ kN انتخاب شده است. همچنین فشار داخلی لوله زانویی شکل موردنظر نیز برابر فشار طراحی

- 1 Vishnuvardhan
- 2 Load control
- 3 Displacement control

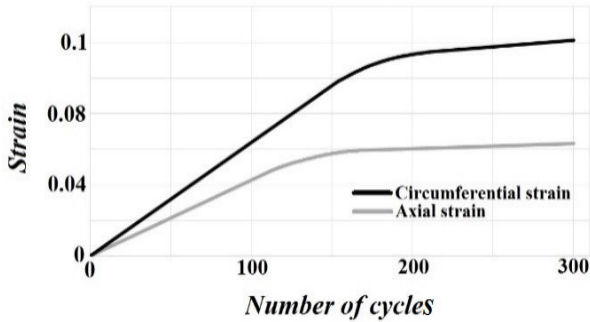


Fig. 29. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 1mm in the inner arc

شکل ۲۹: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کروی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

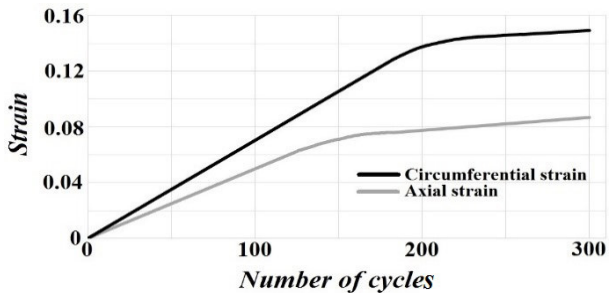


Fig. 30. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 2mm in the inner arc

شکل ۳۰: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کروی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

به ناحیه قوس داخلی اعمال شده و نتایج مربوط به کرنش‌های پیش‌رونده در نواحی خوردگی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است.

نمودار مربوط به کرنش‌های پیش‌رونده مربوط به خوردگی کروی شکل با عمق‌های یک و دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی به ترتیب در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده است، همچنین ناگفته نماند که تمامی نمودارهای مربوط به این بخش، حد وسط نمودارهای کرنش‌های پیش‌رونده می‌باشند. همچنین نمودار مربوط به کرنش‌های پیش‌رونده مربوط به خوردگی مکعبی شکل با عمق‌های یک و دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی به ترتیب در شکل ۳۱ و شکل ۳۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که قابل مشاهده است با حضور پدیده خوردگی نرخ رشد کرنش‌های پیش‌رونده در نواحی مربوطه رشد بیشتری یافته و در نهایت در تعداد سیکل‌های برابر نسبت به نمونه سالم به مقدار کرنش بیشتری می‌رسند. همچنین قابل مشاهده است که خوردگی‌ها از نوع مکعبی آثار مخرب‌تری نسبت به خوردگی‌های کروی شکل از لحاظ رشد کرنش‌های پیش‌رونده دارند و در هر نوع از شکل خوردگی افزایش عمق خوردگی باعث افزایش رشد کرنش‌های پیش‌رونده می‌شود.

به‌عنوان مثال در خوردگی کروی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی، رشد کرنش‌های محیطی و محوری به ترتیب ۲۹ و ۲۱ درصد نسبت به نمونه سالم رشد داشتند، ولی در خوردگی به شکل مکعبی با همان

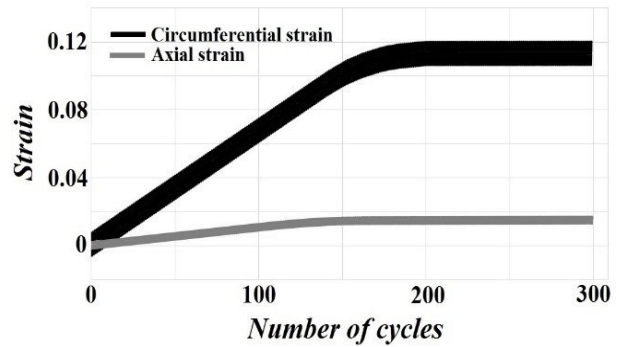


Fig. 26. Axial and hoop ratcheting strains in G7 region  
شکل ۲۶: کرنش‌های پیش‌رونده محوری و محیطی در ناحیه G7

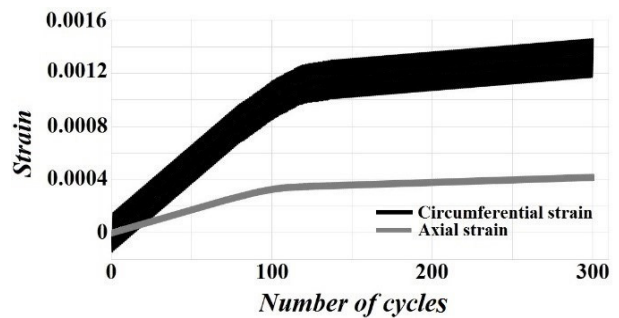


Fig. 27. Axial and hoop ratcheting strains in G13 region  
شکل ۲۷: کرنش‌های پیش‌رونده محوری و محیطی در ناحیه G13

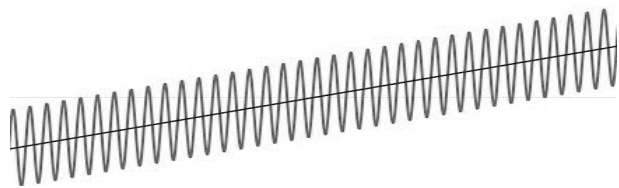


Fig. 28. Magnified ratcheting strain  
شکل ۲۸: منحنی کرنش پیش‌رونده بزرگ‌نمایی شده و حد وسط آن

مطلوبی، به دلیل شلوغی شکل و در هم رفتن نمودارها به علت اشغال فضای زیاد نمودارهای زیگزاگی یا سینوسی، بنا به ضخامت زیاد این نوع از نمودارها، برخوردار نخواهند بود.

همچنین در بخش صحت‌سنجی نیز از نمودارهای به فرم، حد وسط که یک خط صاف است، به‌جای نمودارهای سینوسی یا زیگزاگی، برای مقایسه بهتر نمودارهای مربوط به حالت تجربی و عددی، استفاده شده بود.

همان‌طور که از نتایج مربوط به نمونه سالم مشخص است، بیشترین رشد کرنش محیطی مربوط به ناحیه قوس میانی و همچنین بیشترین رشد کرنش محوری مربوط به ناحیه قوس داخلی است. در قوس خارجی نیز مقدار رشد کرنش‌های محیطی و محوری در مقایسه با نواحی قوس داخلی و قوس میانی بسیار کمتر است و همچنین در تمامی نواحی کرنش‌های پیش‌رونده محیطی نسبت به کرنش‌های پیش‌رونده محوری رشد بیشتری دارند.

در ادامه به بررسی نمونه‌های دارای آسیب خوردگی پرداخته شده است. ابتدا ناحیه قوس داخلی مورد بررسی قرار گرفته و انواع خوردگی‌های کروی با عمق یک و دو میلی‌متر و همچنین خوردگی‌های مکعبی نیز با اعماق مشابه

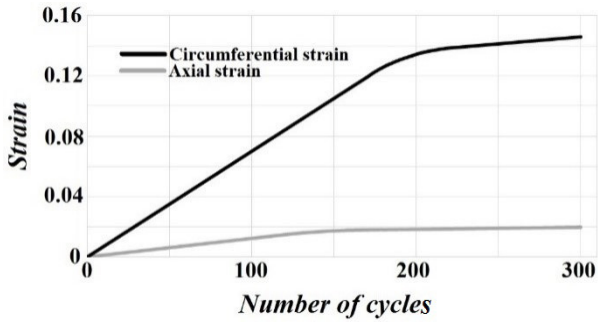


Fig. 33. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 1mm in the central arc

شکل ۳۳: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کروی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس میانی

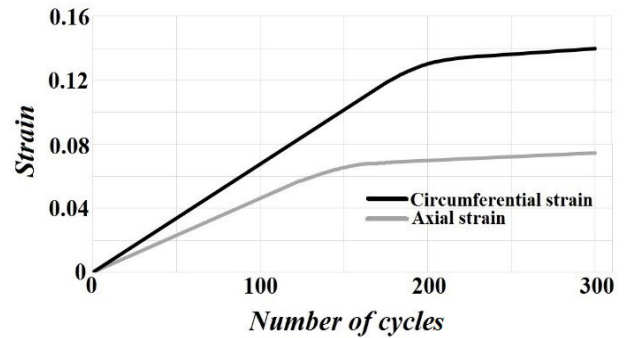


Fig. 31. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 1mm in the inner arc

شکل ۳۱: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

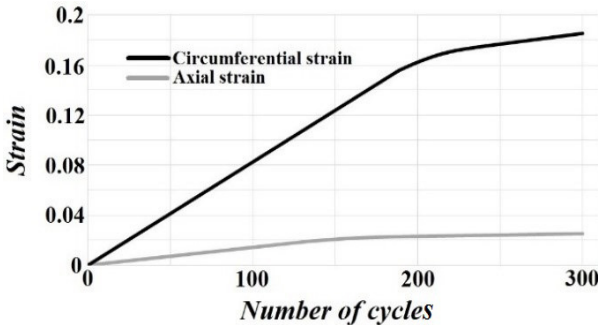


Fig. 34. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 2mm in the central arc

شکل ۳۴: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کروی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس میانی

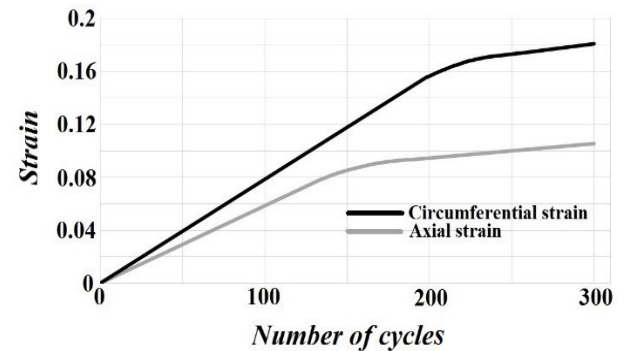


Fig. 32. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 2mm in the inner arc

شکل ۳۲: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی

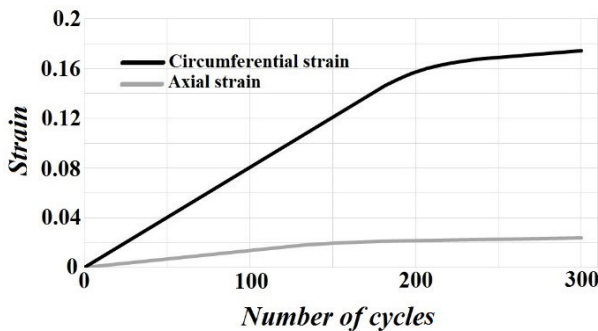


Fig. 35. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 1mm in the central arc

شکل ۳۵: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس میانی

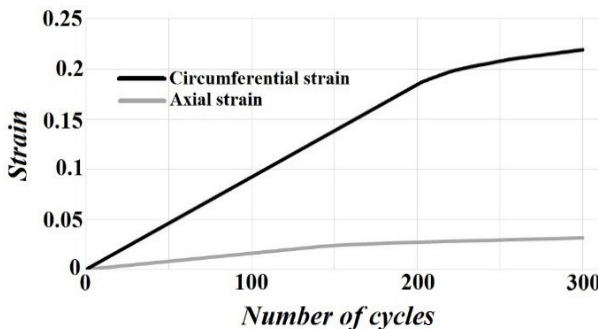


Fig. 36. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 2mm in the central arc

شکل ۳۶: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس میانی

عمق یک میلی‌متر به ترتیب ۴۹ و ۴۱ درصد می‌باشد. در عمق دو میلی‌متر نیز این درصدها به ترتیب در جهت‌های محیطی و محوری برای نوع کروی شکل ۵۹ و ۵۵ درصد و برای نوع مکعبی شکل به ترتیب ۹۳ و ۱۰۰ درصد می‌باشد. یعنی با افزایش عمق خوردگی تأثیر مخرب خوردگی‌های مکعبی شکل بیشتر خود را نشان می‌دهد.

سپس در بررسی و تحلیل کرنش‌های پیش‌رونده در ناحیه قوس میانی در محل‌های خوردگی، منحنی‌های کرنش‌های پیش‌رونده در محل‌های خوردگی کروی شکل به عمق یک و دو میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۳۳ و ۳۴ نشان داده شده است.

همچنین نمودار مربوط به کرنش‌های پیش‌رونده مربوط به خوردگی مکعبی شکل با عمق‌های یک و دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی به ترتیب در شکل‌های ۳۵ و ۳۶ نشان داده شده است.

در ناحیه قوس میانی نیز در خوردگی کروی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی، رشد کرنش‌های محیطی و محوری به ترتیب ۳۰ و ۳۱ درصد نسبت به نمونه سالم رشد داشتند، ولی در خوردگی به شکل مکعبی با همان عمق یک میلی‌متر به ترتیب ۵۴ و ۵۶ درصد می‌باشد. در عمق دو میلی‌متر نیز این درصدها به ترتیب در جهت‌های محیطی و محوری برای نوع کروی شکل ۶۳ و ۶۶ درصد و برای نوع مکعبی شکل به ترتیب ۹۶ و

۱۰۲ درصد می‌باشد.

همان‌طور که در مطالب فوق نیز اشاره شد، در نمونه مربوطه ماکسیمم رشد کرنش محیطی، در ناحیه قوس میانی و ماکسیمم رشد کرنش محوری، نیز در ناحیه داخلی می‌باشد. در نتیجه هنگامی که گفته می‌شود مقدار رشد کرنش محوری در ناحیه قوس داخلی، در خوردگی کرومی شکل و در عمق یک میلی‌متری نسبت به نمونه سالم ۲۱ درصد ولی در همین شکل و عمق از خوردگی و در همین جهت محوری رشد کرنش نسبت به نمونه سالم در ناحیه قوس میانی ۳۱ درصد است؛ دلیل بر رشد زیاد این کرنش در این ناحیه نمی‌باشد. چراکه مقدار رشد کرنش محوری در ناحیه قوس میانی در نمونه سالم بسیار کمتر از ناحیه قوس داخلی است و به تبع آن ۳۱ درصد آن نیز کوچک‌تر از ۲۱ درصد رشد، در ناحیه قوس داخلی خواهد بود.

در نهایت در بررسی و تحلیل کرنش‌های پیش‌رونده در ناحیه قوس خارجی در محل‌های خوردگی، منحنی‌های کرنش‌های پیش‌رونده در محل‌های خوردگی کرومی شکل به عمق یک و دو میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۳۷ و ۳۸ نشان داده شده است. همچنین نمودار مربوط به کرنش‌های پیش‌رونده مربوط به خوردگی مکعبی شکل با عمق‌های یک و دو میلی‌متر در ناحیه قوس داخلی به ترتیب در شکل‌های ۳۹ و ۴۰ نشان داده شده است.

در کل می‌توان امن‌ترین ناحیه را از لحاظ خطر مقدار رشد کرنش‌های پیش‌رونده، ناحیه قوس خارجی را معرفی کرد، چراکه میزان رشد کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری چه در نمونه سالم و چه در نمونه‌های آسیب‌دیده بسیار کمتر از دیگر نواحی نمونه زانویی شکل مربوطه است. در نهایت نتایج ارائه شده در نمودارهای فوق، در جداول زیر نیز برای مقایسه بهتر کرنش‌های پیش‌رونده، برای حالت‌های مختلف ارائه شده است. در جدول ۱ نتایج مربوط به نمونه‌های سالم بعد از گذر ۳۰۰ سیکل بارگذاری ارائه شده است.

جدول ۱: کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه سالم در نواحی و در جهت‌های مختلف بعد از گذر ۳۰۰ سیکل

Table 1. Ratcheting strain in intact samples on different area and direction after 300 cycles

ناحیه	قوس داخلی	قوس میانی	قوس خارجی
کرنش محوری	۰/۰۵۲۵۷۸	۰/۰۱۵۰۶۲	۰/۰۰۰۴۱۹
کرنش محیطی	۰/۰۹۳۴۶۲	۰/۱۱۳۴۴	۰/۰۰۱۳۱۷

جدول ۲: کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه‌های آسیب‌دیده در نواحی مختلف و در جهت محوری بعد از گذر ۳۰۰ سیکل

Table 2. Ratcheting strain in Damaged samples on different area and direction after 300 cycles

ناحیه	قوس داخلی	قوس میانی	قوس خارجی
کروی (۱ میلی‌متر)	۰/۰۶۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۴۵
مکعبی (۱ میلی‌متر)	۰/۰۷۴	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۵
کروی (۲ میلی‌متر)	۰/۰۸۶	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰۵۱
مکعبی (۲ میلی‌متر)	۰/۱۰	۰/۰۳۱	۰/۰۰۰۵۵

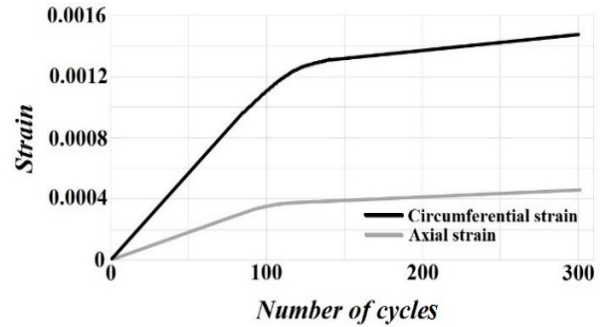


Fig. 37. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 1mm in the outer arc

شکل ۳۷: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کرومی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

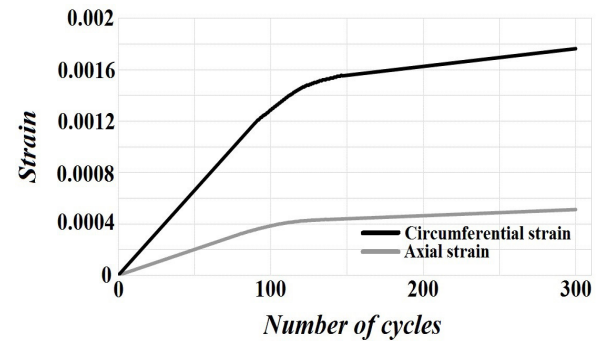


Fig. 38. Hoop and axial ratcheting strains at the spherical corrosion site with the depth of 2mm in the outer arc

شکل ۳۸: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی کرومی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

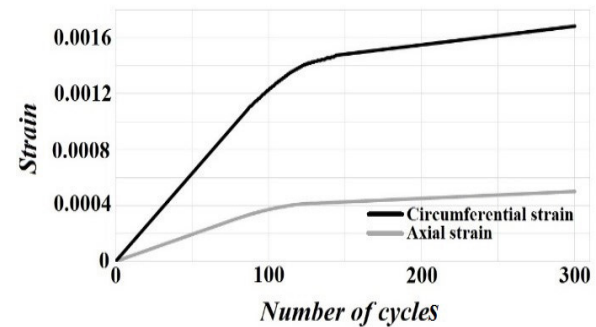


Fig. 39. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 1mm in the outer arc

شکل ۳۹: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق یک میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

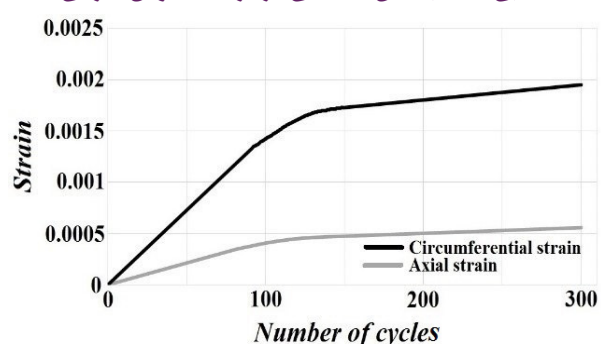


Fig. 40. Hoop and axial ratcheting strains at the cubical corrosion site with the depth of 2mm in the outer arc

شکل ۴۰: کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در محل خوردگی مکعبی شکل با عمق دو میلی‌متر در ناحیه قوس خارجی

بحرانی‌ترین حالت در محل خوردگی و در انتهای سیکل‌های مشخص مورد تحلیل، دارای مقادیر بسیار کوچکی بوده و در کل می‌توان گفت که حضور خوردگی در ناحیه قوس خارجی، به نسبت دیگر نواحی از تأثیر مخرب بسیار کمتری برخوردار است.

### مراجع

- [1] Rider, R., S. Harvey, and I. Charles, Ratchetting in pressurised pipes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1994. 17(4) (497-500).
- [2] Zeinodini, M., et al., Ratcheting behaviour of corroded steel tubes under uniaxial cycling: an experimental investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015. 113: (234-246).
- [3] Abdel-Karim, M., Shakedown of complex structures according to various hardening rules. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005. 82(6):(427-458).
- [4] Edmunds, H. G.; Beer F. J. "Notes on incremental collapse in pressure vessels", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1961. 3(3), (187-199), .
- [5] Chen, X., B. Gao, and G. Chen, Ratcheting study of pressurized elbows subjected to reversed in-plane bending. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2006. 128(4), (525-532).
- [6] Gao, B., X. Chen, and G. Chen, Ratchetting and ratchetting boundary study of pressurized straight low carbon steel pipe under reversed bending. *International journal of pressure vessels and piping*, 2006. 83(2)(96-106).
- [7] Nakamura, I., A. Otani, and M. Shiratori. Failure behavior of elbows with local wall thinning under cyclic load. in ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference. 2004. *American Society of Mechanical Engineers*.
- [8] Beaney, E., Response of Pipes to Seismic Excitation—Effect of Pipe Diameter/Wall Thickness Ratio and Material Properties. *Central Electricity Generating Board, Berkeley Nuclear Laboratories, Report TPRD/B/0637 N*, 1985. 85.
- [9] Limam, A., et al., Inelastic wrinkling and collapse of tubes under combined bending and internal pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010. 52(5):(637-647).
- [10] Chang, K.-H. and W.-F. Pan, Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. 46(2) (254-270).
- [11] Imaoka, S., *Chaboche nonlinear kinematic hardening model*. ANSYS Release, 2008. 12(1).

### جدول ۳: کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه‌های آسیب‌دیده در نواحی مختلف و در جهت محوری بعد از گذر ۳۰۰ سیکل

Table 1. Damaged samples

ناحیه	قوس داخلی	قوس میانی	قوس خارجی
کروی (۱ میلی‌متر)	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۰۰۱۴
مکعبی (۱ میلی‌متر)	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۰۰۱۶
کروی (۲ میلی‌متر)	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۰۰۱۷
مکعبی (۲ میلی‌متر)	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۰۰۱۹

همچنین در جدول ۲ نتایج مربوط به نمونه‌های آسیب‌دیده، در جهت محوری ارائه شده است. در این جدول و جدول بعدی برای بیان نوع خوردگی (کروی شکل یا مکعبی شکل) و همچنین برای بیان عمق خوردگی (یک میلی‌متری یا دو میلی‌متری)، فقط از کلمه شکل خوردگی در کنار عدد مربوط به عمق خوردگی در داخل پرانتز استفاده شده است، به فرض مثال خوردگی کروی شکل به عمق ۲ میلی‌متری به صورت، کروی (۲ میلی‌متر) نشان داده شده است

در نهایت در جدول ۳ نتایج مربوط به نمونه‌های آسیب‌دیده، در جهت محیطی ارائه شده است.

### ۶- نتیجه‌گیری

۱- در نمونه‌های زانویی شکل مورد بررسی با ابعاد و شرایط بارگذاری مشخص بیشترین رشد کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری به ترتیب در ناحیه‌های قوس میانی و قوس داخلی اتفاق می‌افتد، همچنین کمترین مقادیر مربوط به رشد کرنش‌های پیش‌رونده محیطی و محوری در ناحیه قوس خارجی می‌باشد.

۲- با افزایش عمق آسیب خوردگی چه در خوردگی‌های کروی شکل و چه در خوردگی‌های مکعبی شکل رشد کرنش‌های پیش‌رونده افزایش یافت. به‌نحوی که برای بحرانی‌ترین کرنش‌های محیطی و محوری، افزایش عمق خوردگی از یک میلی‌متر به دو میلی‌متر در خوردگی مکعبی شکل به ترتیب باعث افزایش ۲۲ و ۲۸ رشد کرنش‌های پیش‌رونده شده است.

۳- در نمونه‌های آسیب‌دیده در شرایطی که شکل خوردگی به صورت مکعبی در نظر گرفته شد به نسبت تأثیر مخرب‌تری نسبت به حالتی که خوردگی‌ها شکل کروی داشتند، از لحاظ رشد کرنش‌های پیش‌رونده، نتیجه شد. به‌عنوان مثال بحرانی‌ترین کرنش‌های پیش‌رونده محیطی برای عمق دو میلی‌متری آسیب خوردگی در خوردگی مکعبی شکل ۲۸ درصد رشد کرنش بیشتر از خوردگی کروی شکل با عمق مشابه داشته و در جهت محوری نیز این مقدار ۱۶ درصد است.

۴- از آنجایی که در نمونه سالم پدیده کرنش‌های پیش‌رونده در ناحیه قوس خارجی مقدار بسیار کوچکی نسبت به دیگر نواحی دارد، با وجود رشد حدود ۴۴ و ۴۰ درصدی به ترتیب در جهت محیطی و محوری در

- bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2013. 105 (79-89).
- [15] Vishnuvardhan, S., et al., Ratcheting studies on type 304LN stainless steel elbows subjected to combined internal pressure and in-plane bending moment. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012. 134(4) (041203).
- [16] ASME, *Boiler and pressure vessel code*. Section III, Subsection NB, 1998
- [12] Goyal, S., et al., *Cyclic Plasticity And Fatigue-Ratcheting Behaviour Of Ss304ln Stainless Steel Material*, in Proceedings of SMIRT 21, New Delhi. 2011.
- [13] Vishnuvardhan, S., et al., Ratcheting Strain Assessment in Pressurised Stainless Steel Elbows Subjected to In-Plane Bending. *Procedia Engineering*, 2013. 55 (666-670).
- [14] Vishnuvardhan, S., et al., Ratcheting failure of pressurised straight pipes and elbows under reversed

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Salehi, M. Zehsaz, F. Vakili-Tahami, Investigation of ratcheting on corroded places with different shape and depths in elbow pipe under internal pressure and cyclic bending moment, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(1) (2018) 19-32.

DOI: 10.22060/mej.2017.12552.5382

