



ارزیابی مدل‌های مختلف سختی در بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده اتصالات سهراهی با نسبت قطر به ضخامت مختلف

سید جاوید زکوی^{1*}، بابک ملک زاده²، الیاس شایسته‌نیا²، بهزاد شیرعلی وند²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

*zakavi@uma.ac.ir، صندوق پستی 179

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آبان 1396

پذیرش: 18 دی 1396

ارائه در سایت: 05 بهمن 1396

کلید واژگان:

تغییر شکل‌های پیش‌رونده

لوله‌های سهراهی

مدل سخت‌شوندگی

فولاد کربنی ساده

چکیده

در این تحقیق، رفتار کرنش‌های پیش‌رونده در اتصالات سهراهی تحت اثر ممان‌های دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌های سختی سینماتیکی غیرخطی چابوشی و ترکیبی آرمسترانگ- فردریک همراه با قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای بررسی رفتار پلاستیک لوله‌های سهراهی به کار برده شده است. با استفاده از روش عددی و مدل‌سازی سه‌راهی‌های مورد نظر، نتایج روش عددی با نتایج تجربی و نتایج عددی آرمسترانگ-فردریک مقایسه شده‌اند. پارامترهای ثابت مدل سخت‌شوندگی و داده‌های تنش-کرنش با استفاده از سیکل‌های پایدار شده نمونه‌های تحت آزمون کرنش متقارن به روش تجربی بدست آمده‌اند. هر دو نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که مقدار حداکثر کرنش تغییر شکل‌های پیش‌رونده در محل اتصال لوله‌های سهراهی در جهت محیطی رخ می‌دهد. با بالا رفتن مقدار ممان‌های اعمال شده، میزان انتقال کرنش‌های پیش‌رونده نیز بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده در ابتدا کم و با افزایش سیکل‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه BMS1 نتایج عددی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی چابوشی در مقایسه با دو مدل سختی آرمسترانگ- فردریک و مدل ترکیبی به نتایج تجربی نزدیک می‌باشد. در نمونه‌های BMS2 و BMS3 نتایج حاصل از هر دو مدل سختی شابوشی و ترکیبی در مقایسه با مدل سختی آرمسترانگ- فردریک پیش‌بینی مناسب و تا حدودی مشابه هم نسبت به نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند. در واقع نرخ انباشتگی کرنش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل آرمسترانگ-فردریک در همه نمونه‌ها در مقایسه با نتایج تجربی فراتر از حد می‌باشد.

Evaluation of several hardening models in the ratcheting behavior of piping branch with Different diameter/thickness ratios

Seyed Javid Zakavi*, Babak Malekzadeh, Eliyas Shayestehnia, Behzad Shiralivand

Department of Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, zakavi@uma.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 13 November 2017

Accepted 08 January 2018

Available Online 25 January 2018

Keywords:

Ratcheting

Piping branch

Hardening model

Carbon steel

ABSTRACT

In this study, the strain ratcheting behavior of piping branch under the influence dynamic bending moments are evaluated. The Chaboche nonlinear kinematic hardening model and combined Armstrong-Fredrick model with isotropic rule are used to predict the plastic behavior of the piping branches. The results of FE method by using the hardening models have been compared with the results of the experimental method and Armstrong-Fredrick kinematic hardening results. The constant parameters of the hardening model and stress-strain data have been obtained from several stabilized cycles of specimens that are subjected to simulated seismic bending cycles. Both the FE and experimental results showed that the maximum strain ratcheting occurred on the flanks in the piping branch hoop stress direction just above the junction. The ratcheting strain rate increases with increase of the dynamic moment levels. The FE results show that initial rate of ratcheting is large and then it decreases with the increasing of loading cycles. In BMS1 sample, the FE hoop strain ratcheting data by using chaboche nonlinear kinematic hardening model comparing with the other hardening models to be near that found experimentally values. In BMS2 and BMS3 components, the FE hoop strain ratcheting data by using chaboche nonlinear kinematic hardening model and combined hardening model comparing with the A-F hardening model to be near that found experimentally values. The hoop strain ratcheting rate by Armstrong-Fredrick model gives overestimated values comparing with the experimental data.

1- مقدمه

تزیق و نوردکاری بررسی می‌شود که در آن‌ها تغییر شکل‌های پلاستیکی به مقدار زیادی مشاهده می‌شود. برای این نوع مسائل می‌توان از کرنش‌های الاستیکی صرف‌نظر کرد و رفتار فلز به‌صورت پلاستیک کامل فرض می‌شود. درقسمتی دیگر دسته‌ای از مسائل قرار می‌گیرند که مقدار کرنش‌های

کرنش پلاستیک تنها هنگامی روی می‌دهد که ناحیه الاستیک پشت سر گذاشته شود. نظریه کرنش پلاستیک را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد؛ در یک قسمت عملیات تغییر فرم دادن فلزات مانند چکش‌کاری، حدیده‌کاری،

Please cite this article using:

S. J. Zakavi, B. Malekzadeh, E. Shayestehnia, B. Shiralivand, Evaluation of several hardening models in the ratcheting behavior of piping branch with Different diameter/thickness ratios, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 201-208, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل‌های پلاستیسته سیکلیک را برای شبیه‌سازی پاسخ انباشتگی کرنش لوله‌های مستقیم تحت خمش سیکلیک و فشار داخلی ثابت بررسی کردند [8]. در سال 2013 چن‌ژی و همکارانش به بررسی مروری در سال‌های اخیر در زمینه تغییر شکل‌های پیش‌رونده تجربی و عددی در لوله‌های مستقیم، زانویی‌ها و اتصالات سه‌راهی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی پرداختند. روش‌های عددی شامل استفاده از چندین مدل سختی مناسب در کدهای انسیس و آباکوس می‌باشد. براساس یافته‌های تجربی و عددی مرز تغییر شکل‌های پیش‌رونده و نهایتاً ارزیابی و طراحی ایمن سازه‌ها تعیین شده است. که در این راستا برخی پیشنهادها ارزشمند در بررسی و مطالعه این پدیده ارائه شده است [9]. در سال 2013 ویشنوواردهان و همکارانش برای اندازه‌گیری کرنش‌های پیش‌رونده به صورت تجربی یک زانویی تحت فشار داخلی و بارگذاری سیکلیک را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج تست حاکی از آن بود که برای نمونه‌ها تحت این بارگذاری ناحیه بحرانی در قسمت پهلویی رخ داده و منجر به کاهش سطح مقطع و یا به صورت بالون‌دار شدن در این ناحیه شده و نهایتاً از این قسمت دچار واماندگی می‌گردد [10]. فروتن و همکارانش در سال 2018 به بررسی پاسخ تغییر شکل‌های پیش‌رونده در لوله‌های زانویی ساخته شده از سه فولاد آلیاژی در معرض خمش خارجی تحت شرایط کنترل بار براساس قانون سختی احمدزاده - وروانی A-V پرداختند. مدل آنها توانایی پیش‌بینی نزدیک رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده عددی با نتیجه تجربی را دارد [11]. چن و همکارانش در سال 2016 تغییر شکل‌های پیش‌رونده عددی بر روی لوله‌های مستقیم از جنس فولاد ضد زنگ Z2CND18.12 N با دیواره محلی نازک در معرض فشار داخلی و خمش تناوبی انجام دادند. تحلیل الاستیک - پلاستیک سه بعدی با انسیس براساس مدل CJK برای بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های پیش‌رونده در جهت محیطی بوده و تغییر شکل‌های محوری نسبتاً کوچک می‌باشد [12]. مارو و همکارانش در سال 2016 به بررسی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارهای سیکلیک براساس خستگی و تغییر شکل‌های پیش‌رونده پرداخت. در این کار توسعه مدل عددی از روی پارامترهای سختی شاپوشی و از روی داده‌های منحنی تنش-کرنش تهیه شده از آزمون مواد ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود این مدل عددی برای لوله ای زانویی در معرض فشار داخلی و بارهای سیکلیک قابل استفاده می‌باشد [13]. در مطالعه حاضر رفتار لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده تحت فشار داخلی و ممان‌های سیکلیک در ضخامت‌های مختلف با دو مدل سخت‌شوندگی شاپوشی و ترکیبی آرمسترانگ- فردریک همراه با قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتخاب نمونه‌ها با نسبت قطر به ضخامت مختلف به لحاظ تاثیر ابعاد در بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌باشد که بسیار مهم است. همچنین مدل‌های سختی سینماتیکی همراه و یا بدون قانون ایزوتروپیک در بررسی پدیده تغییر شکل‌های نشان‌دهنده تاثیر قانون سختی ایزوتروپیک در بررسی پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌باشد که این مورد مهم و در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتر بوده است. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از مدل سخت‌شوندگی AF و نتایج تجربی مقایسه خواهد شد.

2- هندسه لوله‌های سه‌راهی و مواد

جنس لوله‌های سه‌راهی از فولاد کربنی ساده مورد استفاده در اجزای تأسیسات نیروگاهی می‌باشد. جدول 1 مشخصات هندسه سه‌راهی و مشخصات آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین خواص مواد به دست آمده از

پلاستیکی در مقابل کرنش‌های الاستیکی خیلی کم است این قسمت برای طراحان ماشین‌ها و محاسبان سازه‌ها در درجه اول خیلی مهم است. با توجه به اینکه بیشتر سازه‌ها در معرض بارهای سیکلیک پیچیده‌ای قرار دارند، چنانچه تنش به کار گرفته شده به قدر کافی بزرگ باشد (اطمینان از اینکه تسلیم رخ داده باشد) انباشتگی کرنش پلاستیک سیکلیک رخ خواهد داد که به این پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده یا رچتینگ می‌گویند.

در بسیاری از مواقع تغییر شکل‌های غیر الاستیک که در قطعات رخ می‌دهد باعث شکست سازه و یا خستگی قطعه بعد از چندین سیکل بارگذاری (پلاستیسته متناوب) همراه با تغییر شکل و فروپاشی قطعه می‌شود. بنابراین بایستی قطعه را طوری طراحی کرد که تغییر شکل پیش‌رونده رخ ندهد، یا اگر رخ داد مقدار انباشت کرنش کمتر از حد مجاز مورد انتظار در عمر کاری قطعات باشد. در بسیاری از کاربردهای مواد، ساختار و اجزا بایستی مقاومت لازم در برابر بارهای سیکلیک را داشته باشد. از جمله این سازه‌ها می‌توان به سازه‌هایی دریایی، رادیواکتیوی، صنایع پتروشیمی، مخازن تحت فشار و سازه‌هایی که در مقابل تغییرات آب‌وهوایی قرار دارند، مثل دکل‌ها اشاره کرد. در سال 1961، نخستین بار ادموند و بیر برای بررسی تغییر شکل‌های پیش‌رونده تحقیقاتی را انجام داده‌اند [1]. تحقیقات آن‌ها در بازه‌ای از حالت‌های انباشتگی کرنش به صورت کاملاً تجربی بررسی شده، به طوری که اکثر آزمایش‌های تجربی انجام گرفته شده توسط این افراد با کنترل دامنه کرنش بوده و بارگذاری‌های کشش، فشار در قالب چرخه‌های کاملاً معکوس شونده اعمال شده است. به طوری که در دامنه‌های کرنش ثابت، نمونه تحت بارگذاری محوری معکوس شونده قرار می‌گرفت. البته در این حالت به واسطه محدود بودن دامنه کرنش، بعد از چند سیکل بارگذاری حلقه‌های تنش، کرنش روی همدیگر منطبق می‌شدند، بنابراین امکان بررسی انتقال تغییر شکل‌های پیش‌رونده بعد از کرنش محدود شده میسر نبود. پدیده کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خمش سیکلیک معکوس شونده توسط بنی نیز بررسی شده است [2]. بر اساس این نظریه، کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های زمانی رخ می‌دهد که سازه تحت هر دو بارگذاری سیکلیک و فشار یکنواخت قرار می‌گیرد. در رابطه با پدیده انباشتگی کرنش، در سال 1991 شاپوشی و همکارانش مدلی را پیشنهاد دادند که مدل آن‌ها بر پایه تجزیه قانون سخت‌شوندگی سینماتیکی غیرخطی آرمسترانگ و فردریک بود. این تجزیه به طور قابل توجهی در توصیف سه قسمت از منحنی هیستریزس پایدار شده می‌باشد [3]. در سال 1993 مورتون تغییر شکل‌های پیش‌رونده یک سیلندر تحت فشار داخلی و تغییر شکل محوری متناوب را مورد بررسی قرار داد. او در این تحقیق برای یک ماده با رفتار الاستیک-پلاستیک، نرخ تغییر شکل پیش‌رونده و مرز آن را مورد بررسی قرار داد [4]. در سال 1996 یاهیوای و همکارانش پاسخ انباشتگی کرنش لوله‌های زانویی تحت فشار زیر ممان‌های خمشی داخل صفحه‌ای را به صورت تجربی بررسی نمودند که در آن 8 جفت فولاد از جنس فولاد کربنی ساده و فولاد ضدزنگ مورد آزمون قرار گرفت [5]. در سال 2000 یوشیدا رفتار انباشتگی کرنش ناشی از خستگی را در یک زانویی که تحت بارگذاری تناوبی می‌باشد، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روشی ساده برای محاسبه کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های زانویی تحت فشار در اثر بارهای تناوبی را مورد بررسی قرار دادند [6]. در سال 2006 چن کرنش‌های پیش‌رونده را در روی لوله زانویی از جنس فولاد کم کربن تحت فشار داخلی، اندازه‌گیری کرده و نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های لازم را ارائه نمودند [7]. در سال 2008 رحمان و همکارانش

4- روش عددی

برای بررسی تغییرشکل‌های پیش‌رونده در اجزای تأسیساتی تحت خمش دینامیکی همراه با فشار داخلی، مطالعات عددی انجام شده است [15-17]. به‌عنوان نمونه، دگراسی و همکارانش [18] تجزیه و تحلیل غیرخطی دستگاه‌های تأسیسات لوله‌کشی را با استفاده از مدل‌های دوخطی مستقیم، چندین خطی و چابوشی اجرا و نشان دادند که بهترین شبیه‌سازی را می‌توان با مدل پلاستیسیته چابوشی در انسیس به دست آورد. حسن و همکارانش [19] نشان دادند که برنامه انسیس در خصوص برنامه المان محدود انسیس، نمی‌تواند انباشتگی کرنش را به دلیل کامل نبودن مدل‌های پلاستیسیته سیکلی شبیه‌سازی کند. همچنین نشان دادند که با ترکیب مدل‌های ساختاری بهبودیافته در برنامه‌های المان محدود، شبیه‌سازی کرنش پیش‌رونده آن‌ها را می‌توان بهبود بخشید. کولکازنی و همکارانش [20] پاسخ‌های ساختاری لوله‌های تحت فشار داخلی ثابت و خمش سیکلی را شبیه‌سازی نموده و در این مطالعه، تنها کرنش پیش‌رونده محیطی در نقاطی از لوله با حداکثر دامنه کرنش مشاهده می‌شود. در این تحقیق ما برای مدل‌سازی سه‌بعدی لوله سهراهی، لوله انشعاب دار با قطر خارجی D_o و ضخامت t تحت فشار داخلی و ممان سیکلی داخل صفحه در نرم‌افزار آباکوس ایجاد کردیم. مطابق با شکل 2 که نمای شماتیک از مدل ایجاد شده می‌باشد. مدل از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اصلی در وسط سهراهی و دو بخش جانبی، لوله‌های مستقیم می‌باشند. برای مدل‌سازی سهراهی با 12499 المان، از نوع C3D4 مش بندی شده است. پس از اعمال فشار، در مرحله بعدی برای ایجاد ممان خمشی متناوب در انتهای بخش مستقیم لوله بار تناوبی اعمال می‌شود. بار اعمال شده به‌صورت سینوسی بوده و با فرکانسی برابر با فرکانس روش تجربی در نظر گرفته شده است.

5- نظریه‌های سخت‌شوندگی

معمولاً وقتی که فلزات در دمای محیط تحت تغییرشکل پلاستیک قرار می‌گیرند مقاومت آن‌ها در مقابل تغییرشکل افزایش می‌یابد که به این فرایند کرنش سختی یا کار سختی گفته می‌شود. در مواردی که کار سختی وجود ندارد سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند. در مقابل، خاصیت کار سختی در ماده باعث تغییر تابع تسلیم می‌گردد. نظریات مختلفی برای پیش‌بینی این تغییرات در مواد مختلف ارائه شده است که عمده‌ترین آن‌ها عبارتند از: سخت‌شوندگی

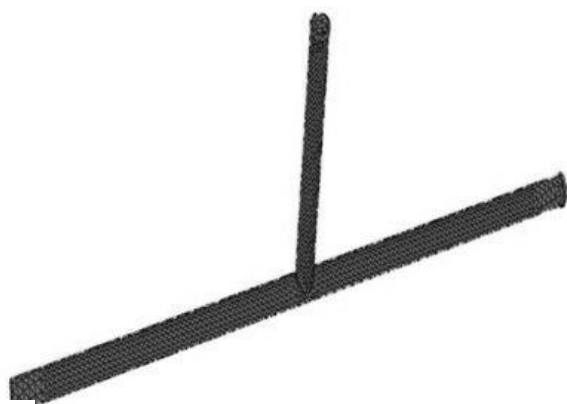


Fig. 2 Branch simulation in ABAQUS software

شکل 2 مدل سه‌بعدی لوله سهراهی در آباکوس

آزمون کشش ساده در جدول 2 ارائه شده است. موقعیت‌های دستگاه آزمون، برای نمونه سهراهی در شکل 1 نشان داده شده است [14].

3- آزمایش و آزمون تجربی

در انجام آزمایش تجربی [14] خمش دینامیکی بر ساقه لوله اعمال شده است. آزمون‌های تجربی تحت بارگذاری سینوسی با فرکانسی نزدیک به فرکانس تشدید لوله‌های سهراهی انجام شده است. جمع‌آوری داده‌های کرنش به‌وسیله یک کرنش‌سنج 24 کاناله در فرکانس حدود 7 هرتز انجام شده است. اندازه‌گیری گشتاورها به‌وسیله گیج‌هایی با قابلیت کنترل از راه دور انجام شده است. گشتاور خمشی دینامیکی آزمایش در این مرحله یادداشت می‌شود. فشار اعمال شده برابر با فشار مجاز طراحی (P_d) طبق کد ASME و از معادله (1) محاسبه می‌شود.

$$P_d = \frac{2S_m t}{D_o - 2yt} \quad (1)$$

در رابطه (1)، P_d فشار مجاز طراحی (مگا پاسکال)، S_m تنش مجاز طراحی (مگا پاسکال)، D_o قطر خارجی لوله (میلی‌متر)، y ضریب ثابت برابر 0.4 و t ضخامت لوله (میلی‌متر) می‌باشد.

نحوه آزمایش تجربی به‌طور کامل در مرجع [14] آمده است. در جدول 2 نتایج آزمون کشش برای فولاد کربنی ساده نیز قابل مشاهده است.

جدول 1 مشخصات هندسه سهراهی و مشخصات آزمون [14]

Table 1 Branches geometry and test specifications

مشخصه سهراهی	ضخامت (mm)	قطر خارجی (mm)	فشار آزمون (MPa)	فرکانس آزمون (Hz)
BMS1	4.24	70	18.58	7.5
BMS2	3.2	70	13.85	7.3
BMS3	2.75	70	11.84	7.1

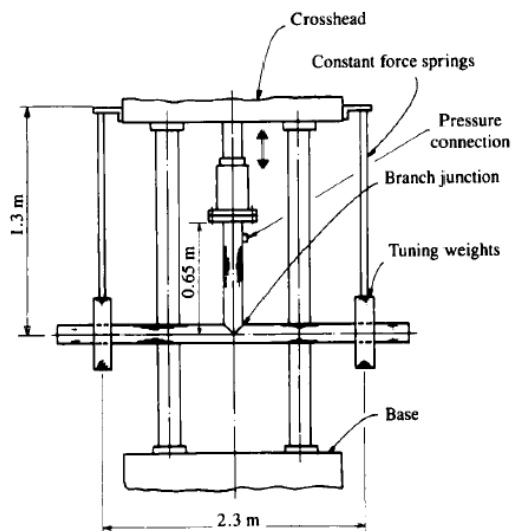


Fig. 1 Schematic representation of test set-up

شکل 1 دستگاه آزمون سهراهی تحت خمش صفحه‌ای [14]

جدول 2 نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش [14]

Table 2 Tensile test results

مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	تنش مجاز طراحی (MPa)	نسبت بواسون
214	328	475	158	0.292

$$dX = \frac{2}{3}Cd\varepsilon^p - \gamma Xd\varepsilon_p \quad (3)$$

در رابطه (3)، γ ثابت مدل سخت‌شوندگی غیرخطی (بی‌بعد) و ε_p کرنش پلاستیک معادل است.

قانون سختی شونددگی چابوش، ترکیبی از چندین قانون سختی آرمسترانگ- فردریک می‌باشد که هر یک از این قوانین، هدف ویژه‌ای را دنبال می‌کنند [24]. مدل سخت‌شوندگی تجزیه‌شده چابوش به صورت معادلات (4) و (5) تعریف می‌شود:

$$X = \sum_{i=1}^m X_i \quad (4)$$

$$dX_i = \frac{2}{3}C_i d\varepsilon^p - \gamma_i X_i d\varepsilon_p \quad (5)$$

ثابت‌های فوق از طریق آزمایش به دست می‌آیند. همچنین کرنش تجمعی پلاستیک از معادله (6) بدست می‌آید.

$$dp = \frac{2}{3}(d\varepsilon^p : d\varepsilon^p)^2 = d\lambda \quad (6)$$

5-2- سختی سینماتیک غیرخطی ترکیبی

با استفاده از بارگذاری سیکلی کشش- فشار بر روی چند نمونه، از روی منحنی‌های پایدار شده از آزمون‌های تجربی با کنترل دامنه کرنش در محدوده‌های مختلف، مقادیر محدوده تنش $\Delta\sigma$ و مقدار تنش تسلیم K و همچنین محدوده کرنش پلاستیک $\Delta\varepsilon^p$ برای هر مورد از آزمایش‌ها را به دست آورده است (برای مثال آزمون بارگذاری سیکلیک در شکل 5 برای دامنه کرنش ± 0.75 ، برای فولاد کربنی ساده ارائه شده است). سپس مقادیر $K - \Delta\sigma/2$ را در برابر $\Delta\varepsilon^p/2$ برای آزمون‌های مختلف رسم و با انطباق معادله (7) به نقاط منحنی فوق ضرایب ثابت ماده C و γ با استفاده از مدل سختی آرمسترانگ- فردریک محاسبه شده است.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} - K = \frac{C}{\gamma} \tanh\left(\gamma \frac{\Delta\varepsilon^p}{2}\right) \quad (7)$$

ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی آرمسترانگ- فردریک برای فولاد کربنی ساده $C=2763.69\text{MPa}$ و $\gamma=17.66$ به دست آمده است. برای اعمال قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایش نیم سیکل ساده و با استفاده از معادله (8) ضرایب ثابت ماده m و n تعیین می‌شوند:

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}_p}{m}\right)^n \quad (8)$$

در معادله (8)، $\bar{\sigma}$ تنش معادل، σ_y تنش تسلیم اولیه در حالت تک محوره می‌باشد. مؤلفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک σ^0 ، بعنوان تابعی از کرنش پلاستیک بوسیله معادله (9) بیان می‌شود:

$$\sigma^0 = (\bar{\varepsilon}_p) = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p) - \bar{X}(\bar{\varepsilon}_p) \quad (9)$$

که در آن \bar{X} تنش برگشتی معادل است. معادله قانون سختی ایزوتروپیک به صورت معادله (10) تعریف می‌شود:

$$\sigma^0 = K + Q[1 - \exp(-b\varepsilon_p)] \quad (10)$$

پارامترهای ایزوتروپیک مواد Q و b با استفاده از نقاط حاصل از معادله (9) و انطباق آن با معادله (10) با استفاده از رگرسیون غیرخطی کمترین مربعات بدست می‌آید. ضرایب سختی ایزوتروپیک بدست آمده برای فولاد کربنی ساده $Q=135.9\text{MPa}$ و $b=4.76$ می‌باشد.

6- ثابت‌های مدل سخت‌شوندگی سینماتیک چابوشی

در تحقیق حاضر به علت استفاده از مدل تجزیه‌شده چابوشی [25] از رابطه (11) جهت به دست آوردن ثابت‌های ماده استفاده می‌شود. در این حالت از

ایزوتروپیک، سخت‌شوندگی سینماتیک خطی و غیرخطی مدل آرمسترانگ- فردریک، مدل سخت‌شوندگی چابوش نمونه‌هایی از مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی می‌باشد. در اثر پدیده سخت‌شوندگی، سطح تسلیم می‌تواند به صورت یکنواخت بزرگ‌تر شود (سخت‌شوندگی ایزوتروپیک- شکل 3) یا مرکز آن در فضای تنش جابجا گردد (سخت‌شوندگی سینماتیک- شکل 4) و یا درحالی‌که سطح تسلیم بزرگ‌تر می‌شود مرکز آن نیز جابجا شود که ترکیب دو نوع سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک است. قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در شرایطی که تحت بارگذاری سیکلیک هستند استفاده نمی‌شود، چراکه در آن اثر بوشینگر در نظر گرفته نشده است. قانون سخت‌شوندگی سینماتیک اجازه می‌دهد که سطح تسلیم بدون تغییر شکل جابجا شود [21].

5-1- سختی سینماتیک غیرخطی چابوشی

اولین مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی توسط پراگر [22] و مطابق معادله (2) ارائه شد که در آن تغییرات کرنش‌های پلاستیک با تنش‌های بازگشتی یک رابطه خطی دارد:

$$dX = \frac{2}{3}Cd\varepsilon^p \quad (2)$$

در رابطه (2)، X تانسور تنش برگشتی، C ثابت ماده در سخت‌شوندگی سینماتیک (مگا پاسکال) و ε^p تانسور کرنش پلاستیک است.

مطابق معادله (3)، آرمسترانگ- فردریک [23] با افزودن یک جمله که تنش‌های بازگشتی را به کرنش‌های پلاستیک مربوط می‌سازد، مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی پراگر را به مدلی غیرخطی تبدیل کردند.

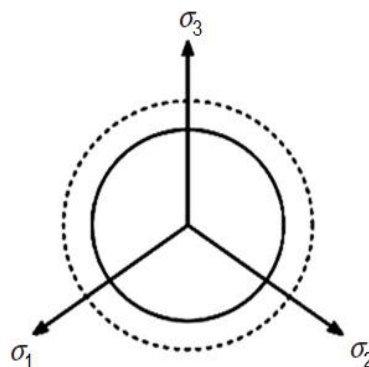


Fig. 3 Isotropic hardening model

شکل 3 مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

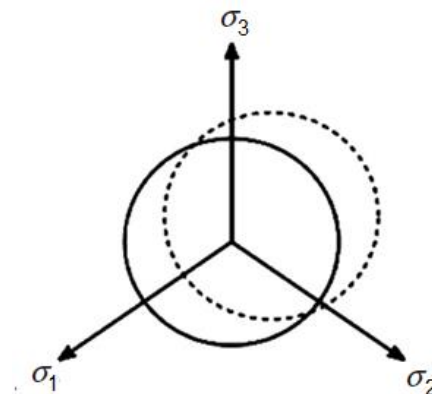


Fig. 4 Kinematic hardening model

شکل 4 مدل سخت‌شوندگی سینماتیک

سه منحنی برای انطباق نقاط استفاده می‌شود.

$$dX_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^p - \gamma_i X_i dp \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

در این مرحله با استفاده از نقاط به دست آمده از آزمون‌های تجربی در بخش 3-4 و نیز با استفاده از رابطه سخت‌شوندگی چابوشی و با انطباق رابطه آن بر نقاط محاسبه شده، سه منحنی بر داده‌های وارد شده انطباق گشته و در نهایت پارامترهای سخت‌شوندگی ماده استخراج می‌شود. به این صورت که یک منحنی برای ناحیه اول بعد از شروع تسلیم با مدول بالا ($i=1$) در رابطه (11)، منحنی دوم به ناحیه مدول ثابت قسمت غیرخطی در کرنش بالاتر ($i=2$) در رابطه (11) و منحنی سوم به ناحیه ماقبل گلوبی قسمت خطی ($i=3$) در رابطه (11) در نظر گرفته می‌شود، (شکل 6). نهایتاً ضرایب ثابت ماده C_1 و γ_1 ، C_2 و γ_2 و C_3 و γ_3 می‌شود، (جدول 3).

7- بحث در نتایج عددی و تجربی

با استفاده از روش عددی و با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی با استفاده از کد آباکوس، مدل‌سازی سه‌راهی‌های ذکر شده تحلیل و نتایج

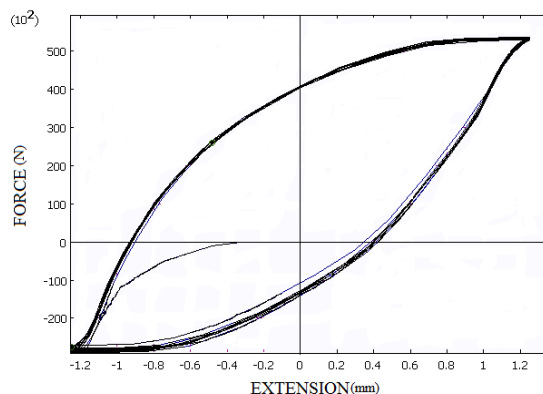


Fig. 5 Stabilized cyclic loading for carbon steel

شکل 5 بارگذاری سیکلیک پایدار شده با دامنه کرنش ± 1.2 برای فولاد کربنی ساده

جدول 3 نتایج حاصل از انطباق برای فولاد کربنی ساده

Table 3 Adaptation results for carbon steel

C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2	C_3 (MPa)	γ_3
4278.68	64.16	3254.60	22.25	1336.84	1.44

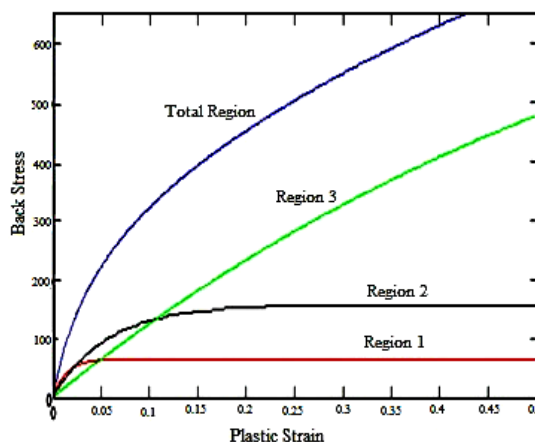


Fig. 6 Schematic view of chaboche hardening model for carbon steel

شکل 6 نمای شماتیک از سه قسمت تجزیه‌شده مدل چابوش و مجموع آن‌ها برای فولاد کربنی ساده

حاصل از روش عددی با نتایج حاصل از روش تجربی، مقایسه شده‌اند. یاهییوای و همکارانش مجموعه‌ای از 30 آزمایش انجام داده که در آن فرکانس آزمون‌ها حدوداً 7 هرتز بوده و آزمون در 90 سیکل انجام شده است. آنها ملاحظه نمودند که با توجه به اعمال ممان‌های سیکلی همراه با فشار داخلی بر روی لوله‌های سه‌راهی تحت آزمون، معمولاً پدیده تغییر شکل‌های پیش-رونده در ممان‌های بالا مشاهده می‌شود. در ممان‌های کم، انتقال کرنش‌های پیش‌رونده دارای مقدار بسیار پایین و نزدیک به صفر است، درحالی‌که با بالا رفتن مقدار ممان‌های اعمال‌شده، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها میزان انتقال کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه اسمی لوله سه‌راهی، مقدار ممان خمشی لازم برای شروع تغییر شکل‌های پیش‌رونده افزایش می‌یابد همچنین در هراندازه اسمی مشخص با افزایش مقدار نسبت قطر میانگین به ضخامت، نرخ و میزان تغییر شکل‌های پیش‌رونده افزایش می‌یابد.

شکل 7 محل انباشتگی کرنش را در المان‌های نمونه BMS1 تحت تأثیر ممان 3700 (N.M) نشان می‌دهد. شکل‌های 8 تا 10 مقایسه کرنش‌های پیش‌رونده تجربی و عددی حاصل از سه مدل سختی را در برابر ممان‌های اعمالی نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود که با بالا رفتن مقدار ممان‌های اعمال‌شده، میزان انتقال کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در نمونه BMS1 نتایج عددی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی چابوشی در مقایسه با دو مدل سختی آرمسترانگ-فردریک و مدل ترکیبی به نتایج تجربی نزدیک می‌باشد. در نمونه‌های BMS2 و BMS3 نتایج حاصل از هر دو مدل سختی شابوشی و ترکیبی در مقایسه با مدل سختی آرمسترانگ - فردریک پیش بینی مناسب و تا حدودی مشابه هم نسبت به نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند.

شکل‌های 11 تا 13 مقایسه کرنش‌های پیش‌رونده تجربی و عددی حاصل از سه مدل سختی را در برابر نسبت ممان‌های اعمالی M/M_L نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که برای نمونه‌های تحت آزمون، کرنش‌های پیش-رونده عددی در محدوده ممان‌های $1.1 M_L$ شروع می‌شود، که نشانگر هم‌خوانی خوب با نتایج تجربی $1.1 M_L$ می‌باشد. البته شروع کرنش‌های پیش‌رونده عددی در نمونه BMS1 در حدود $M/M_L=0.9$ اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت قطر به ضخامت در نمونه‌های سه‌راهی ملاحظه می‌شود که شروع کرنش‌های پیش‌رونده در نسبت ممان کم اتفاق می‌افتد.

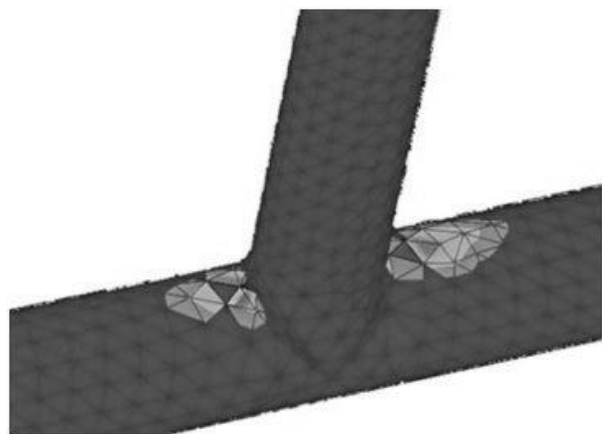


Fig. 7 Accumulated strain in BMS1 specimen elements

شکل 7 انباشتگی کرنش در المان‌های نمونه BMS1

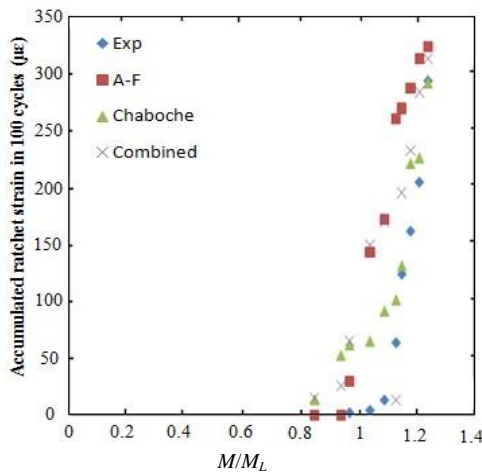


Fig. 11 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS1 specimen in terms of M/M_L

شکل 11 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS1 برحسب نسبت M/M_L

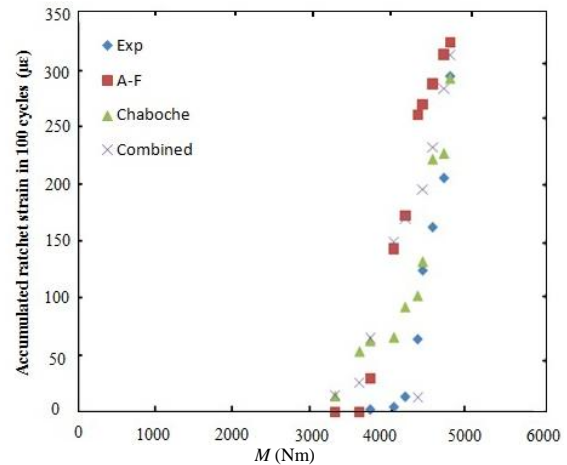


Fig. 8 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS1 specimen in terms of torque

شکل 8 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS1 برحسب گشتاور

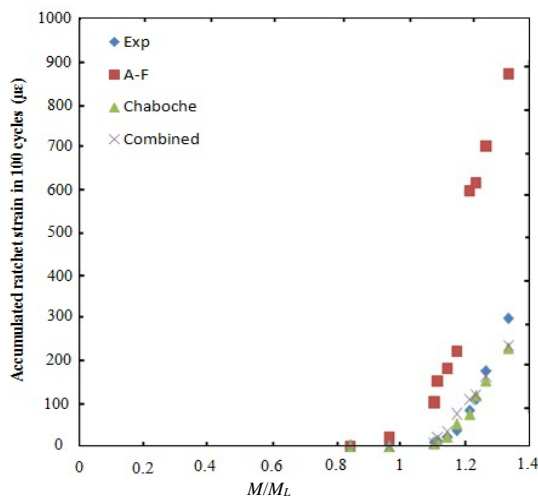


Fig. 12 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS2 specimen in terms of M/M_L

شکل 12 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS2 برحسب نسبت M/M_L

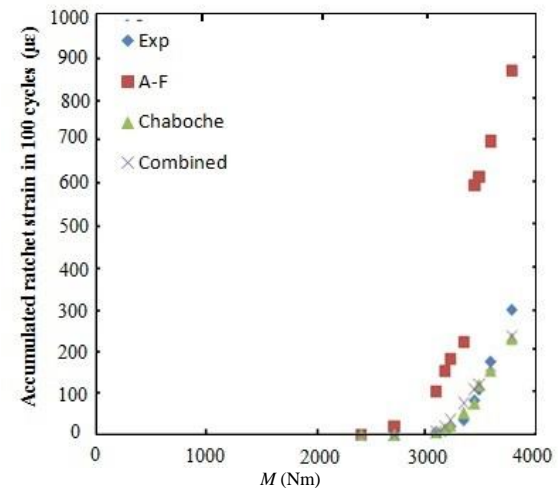


Fig. 9 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS2 specimen in terms of torque

شکل 9 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS2 برحسب گشتاور

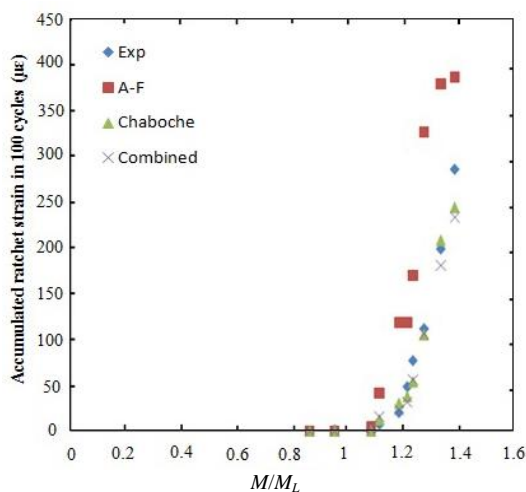


Fig. 13 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS3 specimen in terms of M/M_L

شکل 13 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS3 برحسب نسبت M/M_L

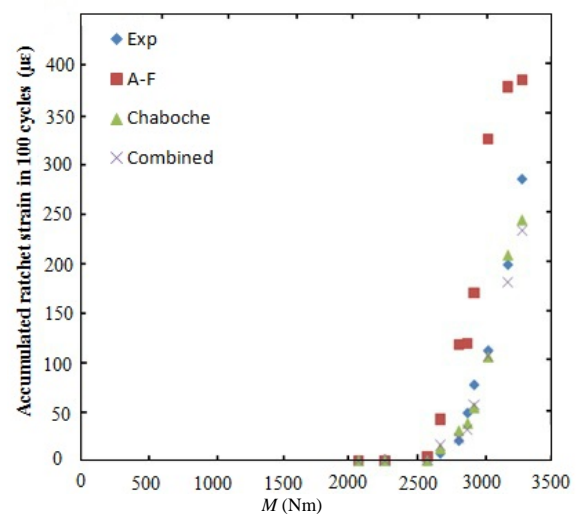


Fig. 10 Accumulated strain results from simulation and experimental test for BMS3 specimen in terms of torque

شکل 10 تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BMS3 برحسب گشتاور

جدول 4 نتایج عددی و تجربی برای نمونه تحت آزمون BMS2

Table 4 Experimental and simulation results for BMS2 specimen

مقدار ممان دینامیکی (Nm)	M/M_L	تعداد سیکل بارگذاری	نتایج کرنش پیش‌رونده از		نتایج کرنش پیش‌رونده از	
			آزمون تجربی ($\mu\epsilon$)	مدل سختی آرمسترانگ - فردریک ($\mu\epsilon$)	مدل سختی ترکیبی ($\mu\epsilon$)	مدل سختی چابوشی ($\mu\epsilon$)
2400	0.84	90	0.86	0	0	0
2696	0.96	90	2.15	19.23	0	0
3072	1.1	90	7.74	102.42	6.78	6.59
3152	1.11	90	10.76	151.82	20.42	13.77
3200	1.14	90	19.36	181.54	35.13	22.27
3320	1.17	90	35.72	221.11	75.5	52.42
3416	1.21	90	82.63	595.94	109	75.05
3456	1.23	90	108.89	614.94	120.72	118.5
3560	1.26	90	175.17	700.07	163.92	153.55
3752	1.33	90	298.7	868.14	234.72	229.08

کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش خواهد یافت. نرخ تغییرشکل‌های پیش‌رونده پیش‌بینی شده توسط روش عددی بر اساس مدل سختی چابوشی و تا حدودی مدل ترکیبی با نتایج تجربی توافق خوب و قابل قبولی را در مقایسه با نتایج عددی بر پایه مدل آرمسترانگ- فردریک نشان می‌دهد.

9- فهرست علائم

E	مدول یانگ (Nm^{-2})
K	اندازه اولیه سطح تسلیم
M	گشتاور خمشی دینامیکی (Nm)
M_y	گشتاور تسلیم (Nm)
M_l	گشتاور حد نهایی (Nm)
p_d	فشار مجاز طراحی (Nm^{-2})
s_m	شدت تنش مجاز طراحی (Nm^{-2})
X	تانسور تنش برگشتی (Nm^{-2})
علائم یونانی	
σ_y	تنش تسلیم (Nm^{-2})
ϵ_p	کرنش پلاستیک معادل
ϵ^p	تانسور کرنش پلاستیک
γ	پارامتر ثابت مدل سختی چابوش

10- مراجع

- [1] H. Edmunds, F. Beer, Notes on incremental collapse in pressure vessel. *International Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 187-193, 1961.
- [2] E. M. Beany, Measurement of dynamic response and failure at pipe work, *Strain*, Vol. 27, No. 3, pp. 89-94, 1991.
- [3] J. L. Chaboche, On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects, *International Journal of Plasticity*, Vol. 7, No. 7, pp. 661-678, 1991.
- [4] D. N. Moreton, The ratcheting of a cylinder subjected to internal pressure and alternating axial deformation, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 28, No. 4, pp. 277-282, 1993.
- [5] K. Yahiaoui, D. G. Moffat, D. N. Moreton, Response and cyclic strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic in-plane bending, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 31, No. 2, pp. 135-151, 1996.
- [6] F. L. Yoshida, A constitutive model of cyclic plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, No. 3-4, pp. 359-380, 2000.
- [7] Xu. Chen, B. Gao, G. Chen, Ratcheting study of pressurized elbows subjected to reversed in-plane bending, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, No. 4, pp. 525-532, 2006.

دلیل اختلاف در ممان‌های دینامیکی بالا، این است که در روش تجربی از روش افزایش مقدار ممان استفاده شده است. در این روش به خاطر وجود سابقه بارگذاری و در نتیجه سخت شدن قطعه، به‌طور مؤثر موجب اختلاف در مقدار تغییرشکل‌های پیش‌رونده می‌شود درحالی‌که در روش عددی در هر مرحله، یک نمونه جدید تحت بارگذاری قرار گرفته و تحلیل می‌شود.

همچنین جدول 4 مقایسه نتایج تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی غیرخطی بویژه مدل چابوشی، ترکیبی و آرمسترانگ- فردریک را برای نمونه BMS2 نشان می‌دهد که در آن مدل چابوشی به نتایج تجربی نزدیک‌تر بوده و پیش‌بینی قابل‌قبول‌تری را ارائه می‌دهد.

8- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیرات فشار داخلی و ممان‌های سیکلی در کرنش‌های تغییرشکل‌های پیش‌رونده روی سهراهی‌های فولاد کربنی ساده مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیکی غیرخطی چابوشی، آرمسترانگ-فردریک و مدل ترکیبی آرمسترانگ- فردریک همراه با قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای تحلیل رفتار لوله سهراهی آزمون شده تحت شرایط بارگذاری سیکلی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار حداکثر کرنش تغییرشکل‌های پیش‌رونده در محل اتصال لوله‌های سهراهی در جهت محیطی رخ می‌دهد. نرخ کرنش تغییرشکل‌های پیش‌رونده با افزایش ممان دینامیکی در فشار داخلی ثابت افزایش می‌یابد که نتایج عددی نیز همین مورد را به‌وضوح نشان می‌دهد. با افزایش مقدار فشار داخلی مقدار کرنش تغییرشکل‌های پیش‌رونده افزایش خواهد یافت که این موضوع در نتایج عددی نیز به‌وضوح دیده می‌شود.

در روش تجربی برای آزمایش قطعات و اعمال ممان‌های سیکلی بر روی آن‌ها از روش افزایش مقدار ممان استفاده شده است، که در این روش برای یک نمونه نصب شده روی دستگاه، ابتدا ممان با دامنه پایین و در ادامه ممان با دامنه بالاتر بر نمونه اعمال می‌گردد. اگر قطعه دارای سابقه بارگذاری باشد، وارد شدن ممان با دامنه پایین در مرحله اولیه آزمایش موجب سخت شدن قطعه شده و در مرحله بعدی آزمایش تحت ممان بالاتر، به‌طور مؤثر موجب اختلاف در مقدار کرنش‌های پیش‌رونده می‌شود. درحالی‌که در روش عددی در هر مرحله، یک نمونه جدید تحت بارگذاری قرار گرفته و تحلیل می‌شود. هر چه مقدار ضخامت لوله‌ها بیشتر باشد مقدار گشتاور لازم برای شروع

- [17] H. Tasnim, S. Kyriakides, Ratcheting in cyclic Plasticity, part I: uniaxial behavior, *International Journal of Plasticity*, Vol. 8, No. 1, pp. 91–116, 1992.
- [18] G. DeGrassi, C. Hofmayer, A. Murphy, K. Suzuki, Y. Namita, non-linear pre-test seismic analysis for the NUPEC ultimate strength piping test program, *SMIRT 17*, Prague, Czech Republic, 2003.
- [19] T. Hassan, Y. Zhu, V. C. Matzen, Improved ratcheting analysis of piping components, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 8, pp. 643–652, 1998.
- [20] S. C. Kulkarni, Y. M. Desai, T. Kant, G. R. Reddy, Y. Parulekar, K. K. Vaze, Uniaxial and biaxial ratcheting studies of SA 333 Gr. 6 at room temperature, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, No. 3, pp. 179–185, 2003.
- [21] J. L. Chaboche, D. Nouailhas, Constitutive modeling of ratcheting effects-part I: Experimental facts and properties of the classical models, *Journal of Engineering Material and Technology-transactions of The Asme*, Vol. 111, pp. 384, 1998.
- [22] W. Prager, A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 23, pp. 493–496, 1956.
- [23] P. J. Armstrong, C. O. Frederick, A mathematical representation of the multi axial Bauschinger effect, CEGB Report RD/B/N 731, Central Electricity Generating Board, *Materials at High Temperatures*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-26, 2007.
- [24] J. L. Chaboche, A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 10, pp. 1642-1693, 2008.
- [25] S. J. Zakavi, V. Golshan, The effect of dynamic bending moments on the ratcheting behavior of stainless steel pressurized piping elbows, *International Journal of Mechanical Engineering and Application*, Vol. 2, No. 2, pp. 31–37, 2014.
- [8] M. Rahman, T. Hassan, E. Corona, Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 10, pp. 1756–1791, 2008.
- [9] Xi. Chen, Xu. Chen, D. Yu, B. Gao, Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting in pressurized piping, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 101, pp. 113-142, 2013.
- [10] S. Vishnuvardhan, G. Raghava, P. Gandhi, M. Saravanan, Ratcheting failure of pressurized straight pipes and elbows under reversed bending, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 105-106, pp. 79–89, 2013.
- [11] M. Foroutan, G. R. Ahmadzadeh, A. Varvani-Farahani, Axial and hoop ratcheting assessment in pressurized steel elbow pipes subjected to bending cycles, *Thin-Walled Structures*, Vol. 123, pp. 317-323, 2018
- [12] X. Chen, Xu Chen, Study on ratcheting effect of pressurized straight pipe with local wall thinning using finite element analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 139–140, pp 69-76, 2016
- [13] M. D. Palma, Modelling of cyclic plasticity for austenitic stainless steels 304L, 316L, 316L(N)-IG, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 109–111, Part A, pp. 20-25, 2016
- [14] K. Yahiaoui, D. G. Moffat, D. N. Moreton, Single frequency seismic loading tests on pressurized branch pipe intersections machined from solid, *Journal of Strain Analysis*, Vol. 28, No. 3, pp. 197-207, 1993.
- [15] X. Lu, *Influence of Residual Stress on Fatigue Failure of Welded Joints*, PhD Thesis, North Carolina State University, 2003.
- [16] S. J. Zakavi, M. Zehsaz, M. R. Eslami, The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 4, pp. 726-737, 2010.