Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9):2193-2201

Study of Ratcheting Behavior of 304L Stainless Steel Branch Pipes by Using Chaboche and Combined Hardening Models

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Zakavi S.J.*[1] *PhD,*
Mohammadi Asl H.[1] *MSc,*
Babaee D.[1] *MSc*

How to cite this article
Zakavi S.J, Mohammadi Asl H, Babaee D. Study of Ratcheting Behavior of 304L Stainless Steel Branch Pipes by Using Chaboche and Combined Hardening Models. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2193-2201.

[1]Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Daneshgah Street, Ardabil, Iran. Postal code: 5619911367
Phone: +98 (45) 31505012
Fax: -
zakavi@uma.ac.ir

Article History
Received: July 26, 2018
Accepted: February 7, 2019
ePublished: September 01, 2019

ABSTRACT

In this paper, finite element analysis with combined (nonlinear isotropic/AF kinematic hardening model) and chaboche hardening models are employed to investigate ratcheting behavior in stainless steel branch pipes under dynamic moments and internal pressure. Obtained results show that the maximum value of ratcheting strain takes place in the junction of branch pipes in the hoop stress direction. In this case, the rate of progressive strains increases with the increase of the bending moment levels in constant internal pressure. Furthermore, this study reveals that the geometry and dimensions of branch pipes have a significant impact on the rate of progressive strains. The bending moment levels to initiate strain accumulation phenomena will be increased with the increase of the dimensions of branch pipes. In the BSS1 sample, comparison between results obtained using progressive strains with combined and chaboche hardening models are much better than those of Armstrong-Fredrick hardening model and are near to the experimental data. Of course, in BSS2 sample, the behavior of ratcheting with combined hardening model is near the experimental results. For the BSS3 sample, the prediction of ratcheting with the chaboche hardening model is better than using the other strain hardening models and are near to the experimental data. Like the carbon steel samples studied in the recent paper, compared to the Armstrong-Frederick hardening model, the chaboche and combined hardening models exhibit an appropriate prediction and similar to experimental results in stainless steel samples.

Keywords Stainless Steel Branch; Ratcheting Behavior; Combined Hardening Model; Chaboche Hardening Model; Bending Loading

CITATION LINKS

[1] Notes on incremental collapse in pressure ... [2] Measurement of dynamic response and failure of ... [3] On the Ohno-Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon ... [4] Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity ... [5] Cyclic strain accumulation of plain stainless steel pressurized cylinders subjected to dynamic ... [6] The ratchetting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined ... [7] Study on strain accumulation of carbon steel pressurized piping elbows under dynamic ... [8] The effect of basic factors on strain accumulation of pressurized piping elbows under ... [9] Evaluation of several hardening models in the ratcheting behavior of piping branch with different diameter ... [10] Cumulative damage assessment of pressurised piping branch junctions under in-plane run pipe simulated ... [11] Single frequency seismic loading tests on pressurized branch pipe intersections machined ... [12] Ratcheting of cyclically hardening and ... [13] Ratcheting of cyclically hardening and ... [14] Current state of the art in constitutive modeling ... [15] Anatomy of coupled constitutive models for ... [16] Kinematic hardening rules in uncoupled modeling for multiaxial ... [17] An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ... [18] Constitutive equations for cyclic plasticity a ... [19] Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part I: Formulation and basic features ... [20] Kinematic hardening model suitable for ratchetting ... [21] Biaxial ratcheting deformation of type 304 stainless steel: Effect of memorization ... [22] Improved ratcheting analysis ... [23] Uniaxial and biaxial ratchetting study of SA333 Gr.6 steel ... [24] Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting ... [25] Ratcheting failure of pressurized straight pipes and elbows ... [26] Axial and hoop ratcheting assessment in pressurized steel elbow pipes ... [27] Study on ratcheting effect of pressurized straight pipe with local wall ... [28] Modelling of cyclic plasticity for austenitic stainless ... [29] Mechanics of solid ...

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ L۳۰۴ براساس مدل‌های سخت‌شوندگی شابوشی و ترکیبی

سیدجاوید زکوی* PhD
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
هادی محمدی‌اصل MSc
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
داود بابایی MSc
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده
در این مقاله، تحلیل المان محدود با مدل‌های سختی غیرخطی ترکیبی (مدل سینماتیکی آرمسترانگ- فردریک همراه با قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیکی) و مدل شابوشی برای بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ و تحت بارگذاری ممان‌های دینامیکی همراه با تاثیر فشار داخلی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار حداکثر تغییر شکل‌های پیش‌رونده در محل اتصال لوله‌های سه‌راهی رخ می‌دهد. همچنین نرخ تغییر شکل‌های پیش‌رونده با افزایش سطح بارگذاری خمشی در فشار ثابت افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که هندسه و ابعاد لوله سه‌راهی بر میزان و نرخ کرنش‌های پیش‌رونده تاثیر بسزایی دارد. مقایسه نشان می‌دهد نتایج عددی حاصل از کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه BSS1 (نمونه اول لوله سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ) با مدل سختی ترکیبی و شابوشی در مقایسه با نتایج حاصل از مدل سختی آرمسترانگ فردریک بهتر بوده و به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است. پیش‌بینی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده در BSS2 براساس مدل ترکیبی در مقایسه با سایر مدل‌ها به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. البته در نمونه BSS3 این پیش‌بینی رفتار، توسط مدل شابوشی در مقایسه با سایر مدل‌ها بهتر و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. همانند نمونه‌های فولاد کربنی ساده که در مقاله اخیر مورد مطالعه قرار گرفته، 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 در نمونه‌های فولاد ضدزنگ از خود نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: لوله سه‌راهی ضدزنگ، رفتار کرنش‌های پیش‌رونده، مدل سخت‌شوندگی ترکیبی، مدل سختی شابوشی، بارگذاری خمشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸
*نویسنده مسئول: zakavi@uma.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی دقیق و سریع‌تر رفتار ماده در ناحیه پلاستیک به‌ویژه برای سازه‌هایی که تحت بارگذاری‌های متناوب قرار دارند از اهمیت بالایی برخوردار بوده و در صورت عدم توجه به این مساله، ممکن است پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده رخ داده و چنانچه مقدار انباشت کرنش پلاستیک در هر سیکل بیش از حد مجاز باشد، باعث فروپاشی ماده خواهد شد.

اولین تلاش‌ها برای بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده در سال ۱۹۶۱ توسط *دموند* و *بیر* انجام شده است[1]، آنها تعداد محدودی از حالت‌های انباشت کرنش را طی آزمایشات تجربی بررسی کردند، به‌صورتی که اکثر آزمایشات تجربی انجام‌شده توسط این افراد با کنترل دامنه کرنش بوده و بارگذاری‌های کشش و فشار در قالب چرخه‌های کاملاً معکوس‌شونده اعمال شده است. پدیده کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های جدار ضخیم تحت فشار داخلی و خمش سیکلی معکوس‌شونده توسط *بنی* نیز بررسی شده است[2]. براساس این نظریه، کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌ها زمانی رخ می‌دهد که سازه تحت هر دو بارگذاری سیکلی و فشار یکنواخت قرار می‌گیرد. تنش‌های سیکلی باعث ایجاد پدیده شیک دان یا پدیده کرنش پیش‌رونده می‌شود. مطالعات گذشته محققان نشان می‌دهد که راه حل دقیق و کاملی برای پدیده کرنش پیش‌رونده لوله‌ها که تحت فشار داخلی و بارگذاری سیکلی هستند، ارایه نشده است. با این حال چند راه حل تقریبی توسط *بنی*[2]، *چن*[3]، *تسنیم*[4] و *زهساز*[5] برای این پدیده اریه شده است. *زکوی* و همکاران[6] نشان دادند که با استفاده از مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک/سینماتیک غیرخطی (ترکیبی) نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی در لوله‌های مستقیم دارد. همچنین *زکوی* و همکاران[7, 8] به ارزیابی مدل آرمسترانگ-فردریک در پیش‌بینی کرنش‌های پیش‌رونده در لوله‌های زانویی پرداخته و ملاحظه نمودند که کرنش‌های پیش‌رونده در ممان‌های پایین به نتایج تجربی نزدیک و در ممان‌های بالا نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی فراتخمین است.

زکوی و همکاران در مطالعه اخیر[9] ارزیابی مدل‌های مختلف سختی در بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده اتصالات سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده با نسبت قطر به ضخامت مختلف را بررسی و ملاحظه کردند که نرخ انباشتگی کرنش‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل آرمسترانگ-فردریک در همه نمونه‌ها در مقایسه با نتایج تجربی فراتخمین است. همچنین در نمونه BMS1 نتایج عددی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی شابوشی در مقایسه با دو مدل سختیی آرمسترانگ- فردریک و مدل ترکیبی به نتایج تجربی نزدیک است. 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 این مطالعه به بررسی و بحث در مورد لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ ۳۰۴L تحت فشار در معرض ممان‌های دینامیکی پرداخته و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است .همچنین به ارزیابی مدل‌های سختی در پیش‌بینی رفتار پدیده کرنش‌های پیش‌رونده در حضور دو جنس متفاوت پرداخته است.

۲- مشخصات لوله‌های سه‌راهی و مواد و روش‌ها

لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱ مشخصات هندسه سه‌راهی و مشخصات آزمایش به‌طور کامل ارایه شده است. همچنین خواص مواد به‌دست‌آمده از آزمون کشش ساده در جدول ۲ ارایه شده است. نمونه‌ای از دستگاه تست لوله‌های سه‌راهی در شکل ۱ نشان داده شده است[10].

در این تحقیق، با استفاده از کد المان محدود آباکوس رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های سه‌راهی تحت فشار داخلی از جنس فولاد ضدزنگ درمعرض بارگذاری سیکلی مورد بررسی عددی قرار می‌گیرد. فرکانس آزمایش‌های تجربی در حدود ۷هرتز است. به‌وسیله یک سری از آنالیزهای المان محدود و بر پایه مدل کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی این پدیده بررسی و سپس انباشتگی کرنش به‌دست‌آمده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

جدول ۱) مشخصات هندسه لوله سه‌راهی و مشخصات تست

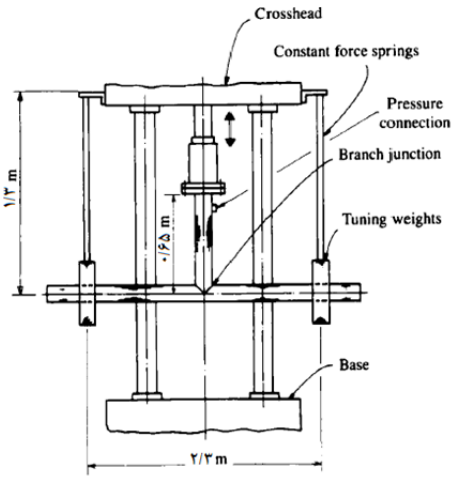
مشخصه سه‌راهی	ضخامت (میلی‌متر)	فشار تست (مگاپاسکال)	فرکانس تست (هرتز)
BSS1	۴/۲۴	۲۰/۴۹	۷/۴
BSS2	۳/۲	۱۵/۲۸	۷/۲
BSS3	۲/۷۵	۱۳/۰۶	۷

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲) خواص مواد فولاد ضد زنگ به‌دست‌آمده از تست کشش

مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۲۰۰
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۲۹۲
استحکام نهایی (مگاپاسکال)	۵۹۷
تنش مجاز طراحی	۱۹۴/۶۶
نسبت پواسون	۰/۳



شکل ۱) دستگاه آزمون سه‌راهی تحت خمش صفحه‌ای[10]

۳- مروری بر کارهای تجربی

نحوه انجام آزمایش تجربی و کار با دستگاه به‌طور کامل در منبع [10, 11]، ارایه شده که در اینجا به‌طور خلاصه به آن اشاره می‌شود. دستگاه‌های تست یونیورسال قادر به بارگذاری سیکلی است. سه‌راهی طوری در دستگاه تست نصب شده که حرکت سر لوله سه‌راهی باعث می‌شود که سه‌راهی تحت اثر خمش داخل صفحه قرار گیرد. بارگذاری شامل دو مرحله است. در ابتدا لوله تحت فشار داخلی قرار می‌گیرد. فشار اعمال‌شده برابر با فشار مجاز طراحی (P_d) طبق کد $ASME$ است.

(۱)

$$P_{\mathrm{d}} = \frac{2S_m t}{D_o - 2yt}$$

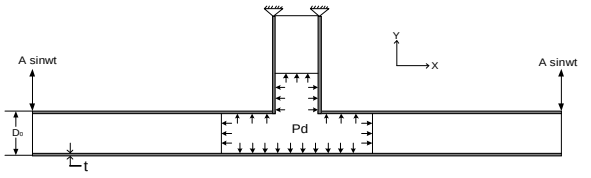
در رابطه (۱) که بیانگر فشار طراحی است، S_m تنش مجاز طراحی و y ضریب ثابت و برابر ۰/٤ است. پس از ایجاد فشار در مرحله بعدی برای ایجاد ممان خمشی متناوب در انتهای بخش مستقیم لوله بار تناوبی اعمال می‌شود. بار اعمال‌شده به‌صورت سینوسی بوده و با فرکانسی برابر با فرکانس روش تجربی در نظر گرفته شده است. مقدار کرنش‌ها در هر مرحله، توسط گیج‌های نصب‌شده روی لوله اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند.

۴- روش عددی برای بررسی تغییر شکل پیش‌رونده

تلاش‌های بسیاری برای درک مفاهیم و مکانیزم شکست در اثر کرنش‌های پیش‌رونده انجام شده است[12-16] و مدل‌های بنیادی مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار کرنش پیش‌رونده توسعه داده شده است[16-23]. برخی از این مدل‌های ساختاری برای شبیه‌سازی یک مجموعه گسترده‌ای از رفتار کرنش پیش‌رونده در سطح مواد مورد بررسی قرار گرفته است. از مرور مقالات مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی‌های کرنش‌های پیش‌رونده موجود برای اجزای تاسیسات لوله‌کشی تحت خمش سیکلی و فشار داخلی کافی نبوده است. بنابراین، بهبود ابزارهای عددی موجود برای پیش‌بینی بهتر پاسخ‌ها مورد نیاز است.

در سال ۲۰۱۳ *چن* و همکاران 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 است. براساس یافته‌های تجربی و عددی مرز تغییر شکل‌های پیش‌رونده و نهایتاً ارزیابی و طراحی ایمن سازه‌ها تعیین شده است که در این راستا برخی پیشنهادهای ارزشمند در بررسی و مطالعه این پدیده ارایه شده است[24]. در سال ۲۰۱۳ *ویشنوواردهان* و همکاران برای اندازه‌گیری کرنش‌های پیش‌رونده به‌صورت 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 یا به‌صورت بالون‌دارشدن در این ناحیه شده و نهایتاً از این قسمت دچار واماندگی می‌شود[25]. *فروتن* و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی پاسخ تغییر شکل‌های پیش‌رونده در لوله‌های زانویی ساخته‌شده 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 نتایج تجربی را دارد[26]. *چن* و همکاران در سال ۲۰۱۶ تغییر شکل‌های پیش‌رونده عددی روی لوله‌های مستقیم از جنس فولاد ضدزنگ Z2CND18.12 N با دیواره محلی نازک در معرض فشار داخلی و خمش تناوبی انجام دادند. تحلیل الاستیک- پلاستیک سه‌بعدی 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 است[27]. *مارو* و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارهای سیکلی براساس خستگی و تغییر شکل‌های پیش‌رونده پرداختند. در این کار توسعه مدل عددی از روی پارامترهای سختی شابوشی و از روی داده‌های منحنی تنش- کرنش تهیه‌شده از آزمون مواد ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود این مدل عددی برای لوله‌ای زانویی در معرض فشار داخلی و بارهای سیکلی قابل استفاده است[28].

برای مدل‌سازی سه‌بعدی لوله سه‌راهی، یک لوله با قطر خارجی D_o و ضخامت t، تحت فشار داخل و ممان سیکلی داخل صفحه در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده است. مطابق با شکل ۲ که نمای شماتیک از مدل ایجادشده است. مدل از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اصلی در وسط سه‌راهی و دو بخش جانبی، لوله‌های مستقیم هستند. برای مدل‌سازی از المان هرمی از نوع C3D4 استفاده شد. بخش اصلی مدل با ۱۲۷۲۷ المان مدل‌سازی شده است.



شکل ۲) نمونه لوله سه‌راهی

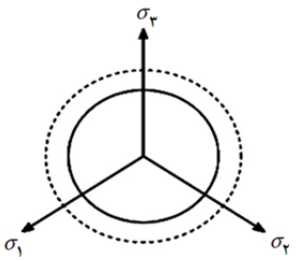
۵- نظریه‌های سخت‌شوندگی

هنگامی که در جسمی تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده باشد، مقاومت آن در مقابل تغییر شکل‌های بعدی افزایش می‌یابد. این

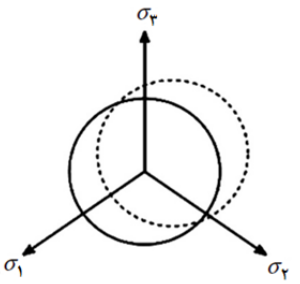
www.SID.ir

Archive of SID

پدیده را سخت‌شوندگی می‌نامند. از نظر فیزیکی سخت‌شوندگی افزایش تراکم نابجایی‌ها است. به‌واسطه تغییرات میکروساختاری در ماده ناشی از جریان پلاستیک، اندازه یا موقعیت ناحیه الاستیک یا هر دو تغییر می‌کند بنابراین در اثر پدیده سخت‌شوندگی، سطح تسلیم می‌تواند به‌صورت یکنواخت بزرگ‌تر شود (سخت‌شوندگی ایزوتروپیکی- شکل ۳) یا مرکز آن در فضای تنش جابه‌جا شود (سخت‌شوندگی سینماتیکی- شکل ۴) یا در حالی که سطح تسلیم بزرگ‌تر می‌شود مرکز آن نیز جابه‌جا شود که ترکیب دو نوع سخت‌شوندگی ایزوتروپیکی و سینماتیکی است.



شکل ۳) مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک



شکل ٤) مدل سخت‌شوندگی سینماتیک

۵-۱- نظریه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

در این مدل اندازه سطح تسلیم در همه جهات به‌طور یکنواخت تغییر می‌کند. مطابق این مدل فرضیه سطح بارگذاری فقط با یک متغیر R بیان می‌شود. برای پلاستیسیته مستقل از زمان و تغییر شکل پلاستیک ایزوترمال سطح تسلیم به شکل تابع زیر بیان می‌شود[29]:

(۲)

$$f = f(\sigma, R)$$

که با واردکردن معیار ون میسز به شکل زیر نوشته می‌شود[29]:

(۳)

$$f = J_2(\sigma) - R - K$$

که در آن K اندازه سطح تسلیم اولیه و R پارامتر سخت‌شوندگی ایزوتروپیک است که می‌تواند به‌صورت تابعی از کرنش پلاستیک به‌صورت زیر بیان شود:

$$R = R(\varepsilon_p) \quad (۴)$$

که ε_p به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3} d\,\varepsilon^p : d\varepsilon^p} \quad (۵)$$

J_2 فاصله ون میسز در فضای تنش انحرافی را نشان می‌دهد:

$$J_2(\sigma) = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma' : \sigma'} \quad (۶)$$

که در آن σ و σ' به‌ترتیب ماتریس تنش و تنش انحرافی در فضای تنش هستند. قانون جریان به‌طور کلی به‌صورت زیر بیان می‌شود[27]:

(۷)

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{3}{2}\, d\lambda \frac{\sigma'}{R + k}$$

که در آن ثابت $d\lambda$ به‌صورت $d\lambda = d\varepsilon_p$ تعریف می‌شود:

(۸)

$$dR = b\,(Q - R)\,d\varepsilon_p$$

Q و b با انتگرال‌گیری و قراردادن مقدار اولیه صفر برای R داریم:

(۹)

$$\sigma^{o} = k + Q\left[1 - exp(-b\varepsilon_p)\right]$$

σ^{o} اندازه سطح تسلیم آنی است.

۵-۲- نظریه سخت‌شوندگی سینماتیک

برای حل یک مساله الاستو پلاستیک باید چهار دسته معادلات تعادل، سازگاری یا روابط کرنش-تغییر مکان، شرایط مرزی و روابط تنش-کرنش همراه با تابع تسلیم و قانون جریان به‌طور همزمان حل شوند. در این مدل فرض می‌شود که در فرآیند تغییر شکل پلاستیک، ابعاد و اندازه‌های سطح تسلیم در فضای تنش‌ها تغییر نکند ولی مرکز آن به‌طور لحظه‌ای در امتداد برداری جابه‌جا شود که آن را به یک نقطه از سطح تسلیم متصل می‌کند به شرط آن که این نقطه نشان‌دهنده تانسور تنش جاری باشد. به کمک ریاضیاتی که برای فرمول‌بندی این مدل مورد نیاز است و با یک روش عددی تکراری می‌توان تنش‌ها و کرنش‌های موثر و بردار جابه‌جایی مرکز سطح تسلیم را در هر لحظه با استفاده از مقادیر دیفرانسیلی آنها محاسبه کرد.

قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در شرایطی که تحت بارگذاری سیکلیک هستند استفاده نمی‌شود، چرا که در آن اثر بوشینگر در نظر گرفته نشده است. قانون سخت‌شوندگی سینماتیکی اجازه می‌دهد که سطح تسلیم بدون تغییر شکل جابه‌جا شود. تابع تسلیم برای پلاستیسیته مستقل از زمان با استفاده از معیار تسلیم ون میسز به‌صورت زیر است[29]:

(۱۰)

$$f = J_2(\sigma - X) - k$$

(۱۱)

$$J_2(\sigma - X) = \left[\left(\frac{3}{2}\sigma' - X'\right) : (\sigma' - X')\right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن X و σ به‌ترتیب تانسورهای تنش برگشتی و تنش و X' و σ' تانسورهای تنش برگشتی انحرافی و تنش انحرافی در فضای تنش هستند. با استفاده از قانون پراگر داریم:

(۱۲)

$$dX = \frac{2}{3}\, C d\varepsilon^p - \gamma X d\varepsilon_p$$

که در آن C و γ ضرایب سخت‌شوندگی ماده در مدل سخت‌شوندگی سینماتیک آرمسترانگ-فردریک هستند. با توجه به شرایط سازگاری و فرض نرمالیته نرخ کرنش پلاستیک به‌صورت زیر می‌شود[28]:

(۱۳)

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{H(f)}{h} \langle \frac{\partial f}{\partial \sigma} : d\sigma \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma}$$

که H تابع پله وزنی است. به‌طوری که $H(f)$=۰ اگر f<۰ و $H(f)$=۱ اگر f≥۰ باشد. نماد <> براکت است. $h.\langle u \rangle = (u + |u|)/2$

www.SID.ir

Archive of SID

ضریب سخت‌شوندگی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

(۱۴)

$$h = C - \frac{3}{2}\gamma X: \frac{\sigma' - X'}{K}$$

در حالت کشش و فشار داریم[29]:

(۱۵)

$$f = |\sigma - X| - k = 0$$

(۱۶)

$$d\varepsilon_p = \frac{1}{h}\langle \frac{\sigma - X}{k} d\sigma \rangle \frac{\sigma - X}{k} = \frac{d\sigma}{h}$$

(۱۷)

$$dX = C d\varepsilon_p - \gamma X |d\varepsilon_p|$$

(۱۸)

$$h = C - \gamma X \, Sgn\,(\sigma - X)$$

(۱۹)

$$X = \upsilon \frac{C}{\gamma} + \left(X_0 - \upsilon \frac{C}{\gamma}\right) exp[-\upsilon\gamma(\varepsilon_p - \varepsilon_{p0})]$$

که $\upsilon = \pm 1$ مطابق جهت جریان، X_0 و ε_{p0} مقادیر اولیه هستند.

۵-۳- نظریه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک/ سینماتیکی غیرخطی (مدل ترکیبی)

در مدل سینماتیک مرکز سطح تسلیم در فضای تنش حرکت می‌کند. اما وقتی مدل ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد دامنه سطح تسلیم ناشی از اجزای ایزوتروپیک منبسط می‌شود. مولفه سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی، انتقال سطح تسلیم در فضای تنش از طریق تنش برگشتی X را بیان می‌کند و مولفه ایزوتروپیک تغییر تنش معادل با تعریف اندازه سطح تسلیم R به‌عنوان تابعی از تغییر شکل پلاستیک را بیان می‌کند. در سخت‌شوندگی سینماتیکی داریم که:

(۲۰)

$$dX = C\frac{1}{R}(\sigma - X)d\varepsilon_p - \gamma X d\varepsilon_p$$

موقعی که $\gamma = 0$ باشد قانون سخت‌شوندگی خطی زیگر به دست می‌آید.

در رفتار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک داریم:

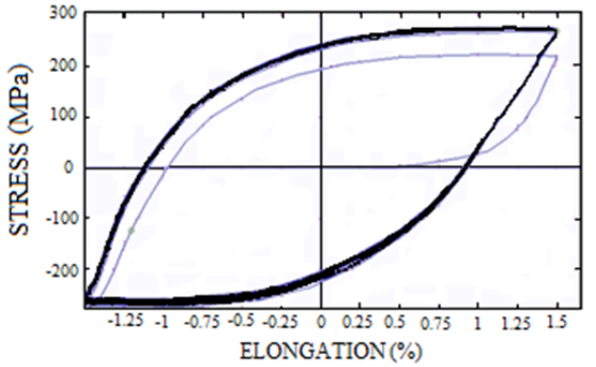
(۲۱)

$$R = k + Q(1 - e^{-b\varepsilon_p})$$

K تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر است. Q ماکزیمم اندازه سطح تسلیم و b نرخی است که اندازه سطح تسلیم و وقتی کرنش پلاستیک اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند. موقعی که $R=K$ می‌شود، مدل به مدل سخت‌شوندگی غیرخطی تبدیل می‌شود.

۵-۴- به‌دست‌آوردن ضرایب سخت‌شوندگی نمونه‌های تحت آزمون

در اینجا برای به‌دست‌آوردن ضرایب سخت‌شوندگی در مدل سخت‌شوندگی غیرخطی، از روش سیکل‌های پایدار استفاده شده است. از روی منحنی‌های پایدارشده از آزمون‌های 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 به‌دست آمده است (برای مثال آزمون بارگذاری سیکلیک در نمودار ۱ برای دامنه کرنش محدود در فولاد ضدزنگ ۳۰۴L ارایه شده است). سپس مقادیر k -/۲ $\Delta\sigma$ /۲ در برابر $\Delta\varepsilon^p$ برای آزمون‌های مختلف رسم می‌شود. معادله مورد نظر برای انطباق و برآزش داده‌ها به‌صورت رابطه (۲۲) است و ضرایب ثابت ماده C و می‌شود:



نمودار ۱) بارگذاری سیکلیک پایدارشده برای فولاد ضدزنگ ۳۰۴L

(۲۲)

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

پس از برآزش منحنی، ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی آرمسترانگ- فردریک برای فولاد ضدزنگ برابر خواهد بود با:

C=۳۹۴۱/۳۱ MPa, γ=۱۵/۸۵

با استفاده از داده‌های آزمایش نیم سیکل ساده و با استفاده از معادله زیر ضرایب ثابت ماده nوm تعیین می‌شوند:

(۲۳)

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

در معادله بالا $\bar{\sigma}$ تنش معادل، σ_y تنش تسلیم اولیه در حالت تک‌محوری است. به‌وسیله معادله‌های (۱۹) و (۲۱) و با استفاده از داده‌های آزمایشی، $\bar{\sigma}$ و $\bar{X}$ برای هر کرنش پلاستیک معادل به دست می‌آید که $\bar{X}$ تنش برگشتی معادل است. مولفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک σ^0، به‌عنوان تابعی از کرنش پلاستیک به‌وسیله معادله زیر بیان می‌شود:

(۲۴)

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

پارامترهای ایزوتروپیک مواد Q و b با جفت‌سازی معادله (۲۱) با نتایج (۲۴) و با استفاده از رگرسیون غیرخطی کمترین مربعات به دست می‌آید.

ضرایب سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای فولاد ضدزنگ Q=۹۸/۱۱مگاپاسکال و b =۱/۴۷ است. بنابراین برای مدل غیرخطی ترکیبی که ترکیب دو نوع مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیکی و سینماتیکی است. ضرایب سخت‌شوندگی به‌صورت زیر نتیجه می‌شود:

C=۳۹۴۱/۳۱ MPa, γ=۱۵/۸۵

Q=۹۸/۱۱ MPa, b=۱/۴۷

به‌علت استفاده از مدل تجزیه‌شده شابوشی مطابق رابطه (۲۵)، ثابت‌های ماده از سه منحنی براساس انطباق نقاط تجربی به دست می‌آید:

(۲۵)

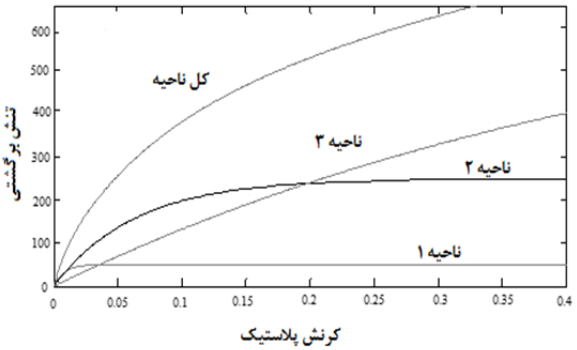
$$dX_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^P - \gamma_i X_i dp \qquad i = 1,2,3$$

در این مرحله با استفاده از نقاط به‌دست‌آمده از آزمون‌های تجربی نیز با استفاده از رابطه سخت‌شوندگی شابوشی و با انطباق رابطه آن بر نقاط محاسبه‌شده، سه منحنی بر داده‌های واردشده انطباق گشته و در نهایت پارامترهای سخت‌شوندگی ماده استخراج می‌شود. ابتدا یک منحنی برای ناحیه اول بعد از شروع تسلیم با مدول بالا (i=۱)

www.SID.ir

Archive of SID

در رابطه (۲۵))، منحنی دوم به ناحیه مدول ثابت قسمت غیرخطی در کرنش بالاتر (i=۲) و منحنی سوم به ناحیه ماقبل گلویی قسمت خطی (i=۳) در نظر گرفته می‌شود (نمودار ۲). نهایتاً ضرایب ثابت ماده C_1، γ_1، C_2، γ_2، C_3 و γ_3 می‌شوند (جدول ۳).



نمودار ۲) نمای شماتیک از مدل سختی شابوشی برای فولاد ضد زنگ ۳۰۴L

جدول ۳) نتایج حاصل از انطباق برای فولاد ضدزنگ 304L

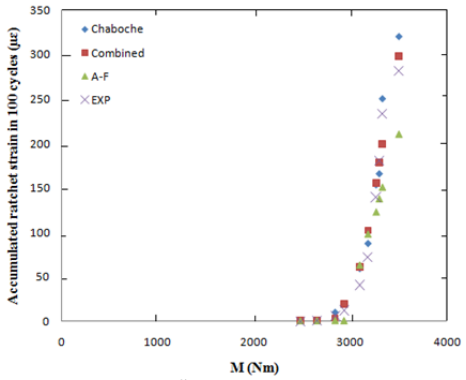
γ_3	C_3 (مگاپاسکال)	γ_2	C_2 (مگاپاسکال)	γ_1	C_1 (مگاپاسکال)
٤/٦	١٤٥٦/٤٣	٢٤/٦٥	٤٤٥٢/٨٥	١١٩/٣٦	٦٠٦٢/٠٧

نتایج عددی و تجربی

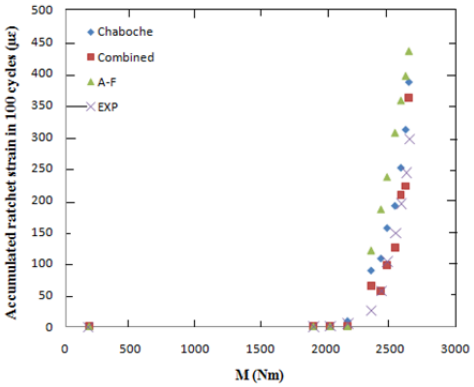
امروز استفاده از مدل‌های کرنش سختی بهبودیافته در روش‌های عددی برای بررسی رفتار انباشتگی کرنش گسترش فراوان یافته است. در این تحقق با استفاده از کد المان محدود غیرخطی آباکوس برای ارزیابی رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های سه‌راهی تحت بارگذاری فشار به همراه ممان دینامیکی مشابه اثرات زمین‌لرزه‌ای استفاده شده است. لوله سه‌راهی تحت فشار و بارگذاری سیکلی دارای ۲/۵متر طول ساقه لوله است که در محیطی سه‌بعدی و با ۱۲۷۲۷ تعداد المان از نوع C3D4 (هرمی دارای چهار گره) مش‌بندی شده که این تعداد المان انتخاب‌شده پس از آزمون‌های مکرر و ارایه آزمایش همگرا انتخاب شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سه‌بعدی خیلی بهتر از نتایج مدل‌سازی دوبعدی بوده و مدل‌سازی سه‌بعدی پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را از رفتار غیرخطی لوله‌های یه راهی تحت بارگذاری ارایه می‌دهد.

تغییر شکل‌های پیش‌رونده برای لوله‌های سه‌راهی BSS1 و BSS2 و BSS3 در برابر گشتاور خمشی دینامیکی در نمودارهای ۳ تا ۵ و در برابر نسبت ممان M/M_L نمودارهای ۶ تا ۸ نمایش داده شده است. همچنین داده‌های تجربی و عددی به‌دست‌آمده از کرنش‌های پیش‌رونده برای نمونه BSS2 در جدول ۴ به‌طور خلاصه ارایه شده است.

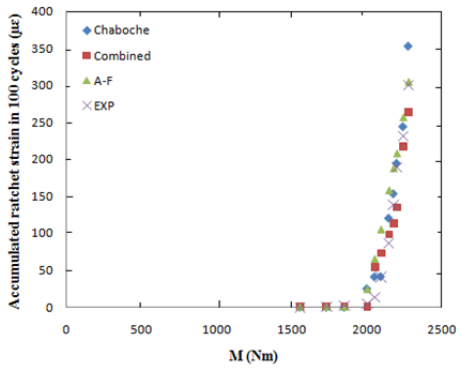
در این مطالعه، مشاهدات تجربی و نتایج عددی کرنش‌های پیش‌رونده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که خمش سیکلی لوله‌ها، کرنش‌های پیش‌رونده را در لوله ایجاد می‌کند که به این کرنش‌ها کرنش‌های پیش‌رونده گفته می‌شود. مقدار حداکثر کرنش‌های پیش‌رونده در نزدیکی محل اتصال لوله‌های سه‌راهی اتفاق می‌افتد. کرنش‌های پیش‌رونده در جهت محیطی انتشار می‌یابند. این تحقیقات، برای ارزیابی مکانیزم شکست خستگی کرنش‌های پیش‌رونده و گسترش و بررسی توانایی مدل‌های سختی در ارزیابی مناسب کرنش‌های پیش‌رونده در اجزای تاسیسات لوله‌ای لازم و ضروری هستند.



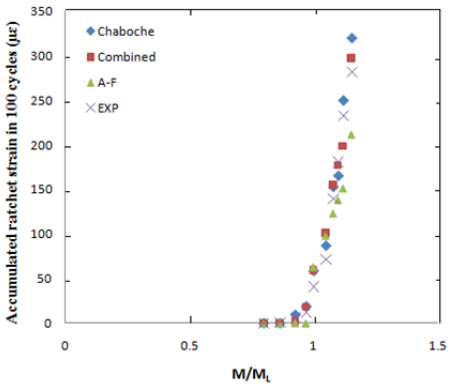
نمودار ۳) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS1 برحسب گشتاور



نمودار ۴) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS2 برحسب گشتاور



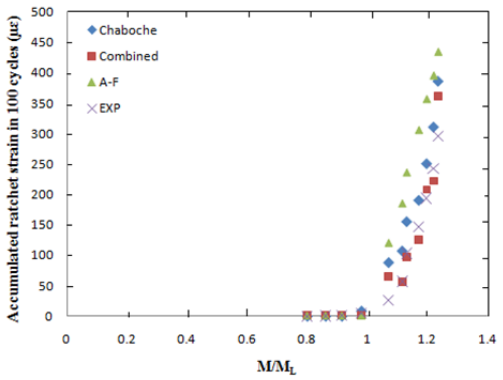
نمودار ۵) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS3 برحسب گشتاور



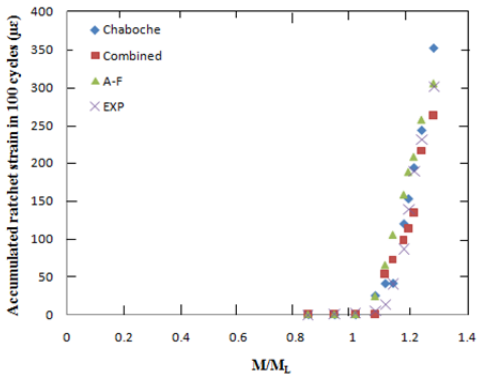
نمودار ۶) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS1 برحسب نسبت M/M_L

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۷) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونهBSS2 برحسب نسبت M/M_L



نمودار ۸) تغییرشکل‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و عددی برای نمونه BSS3 برحسب نسبت M/M_L

جدول ۴) نتایج عددی و تجربی برای نمونه تحت آزمون BSS2

نتایج کرنش پیش‌رونده از مدل سختی چابوشی (με)	نتایج کرنش پیش‌رونده از مدل سختی ترکیبی (με)	نتایج کرنش پیش‌رونده از مدل سختی آرمسترانگ- فردریک (με)	نتایج کرنش پیش‌رونده از آزمون تجربی (με)	تعداد سیکل بارگذاری	M/M_L	مقدار ممان دینامیکی (Nm)
۰	۰	۰	۰	۹۰	۰/۸	۱۷۷۵
۰	۰	۰	۰/۵	۹۰	۰/۸۶۲	۱۹۰۸/۵
۰	۰	۰	۱/۸	۹۰	۰/۹۱۵	۲۰۳۷/۵
۸/۵	۰	۰	۵/۵	۹۰	۰/۹۸	۲۱۷۲
۸۸	۶۳/۹۵	۱۲۰	۲۶	۹۰	۱/۰۷	۲۳۵۴
۱۰۷	۵۵/۵	۱۸۵	۵۷	۹۰	۱/۱۱۵	۲۴۳۰
۱۵۵	۹۶/۴۵	۲۳۶	۱۰۳	۹۰	۱/۱۳	۲۴۷۷
۱۹۰	۱۲۴/۹۸	۳۰۶	۱۴۷	۹۰	۱/۱۷	۲۵۳۸/۵
۲۵۰	۲۰۸	۳۵۷	۱۹۳/۵	۹۰	۱/۱۹۶	۲۵۸۴/۵
۳۱۰	۲۲۲	۳۹۶	۲۴۲/۵	۹۰	۱/۲۱۹	۲۶۲۱
۳۵۸	۳۶۲	۴۳۵	۲۹۵	۹۰	۱/۲۳۴	۲۶۴۶

کرنش‌های پیش‌رونده به‌دست‌آمده عددی با نتایج تجربی تحت سه مدل سختی شابوشی، مدل آرمسترانگ-فردریک و مدل ترکیبی برای هر نمونه BSS در نمودارهای ۳ تا ۵ نشان داده شده است. مطابق آن نتایج عددی حاصل از کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه BSS1 با مدل سخت‌شوندگی ترکیبی و شابوشی در مقایسه با نتایج حاصل از مدل سخت‌شوندگی آرمسترانگ فردریک بهتر بوده و به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است. البته پیش‌بینی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه BSS2 براساس مدل ترکیبی در مقایسه با سایر مدل‌ها به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. به‌طوری که برای نمونه BSS3 این پیش‌بینی رفتار، توسط مدل شابوشی در مقایسه با سایر مدل‌های سختی بهتر و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. 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 سخت‌شدن قطعه، به‌طور موثر موجب اختلاف در مقدار تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌شود در حالی که در روش عددی در هر مرحله، یک نمونه جدید تحت بارگذاری قرار گرفته و تحلیل می‌شود.

همچنین مطابق نمودار ۶ آغاز کرنش‌های پیش‌رونده در نمونه BSS1 براساس مدل آرمسترانگ-فردریک با آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی برابر و در M/M_L=۰/۸۶۵ بوده و در این نمونه براساس مدل‌های شابوشی و ترکیبی این امر با تاخیر و در نسبت ممان M/M_L=۰/۹۲۷ اتفاق می‌افتد.

در نمودار ۷ برای نمونه BSS2، آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در نسبت ممان M/M_L=۰/۸۶۱ و براساس مدل سختی شابوشی در M/M_L=۰/۹۸ و براساس مدل‌های سختی ترکیبی و آرمسترانگ-فردریک با تاخیر و در نسبت ممان M/M_L=۱/۰۷ اتفاق می‌افتد.

همچنین براساس نمودار ۸ برای نمونه BSS3، آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در نسبت ممان M/M_L=۰/۹۳۸ و براساس مدل‌های سختی شابوشی و آرمسترانگ-فردریگ در M/M_L=۱/۰۸ و براساس مدل سختی ترکیبی با تاخیر و در نسبت ممان M/M_L=۱/۱۱۵ اتفاق می‌افتد.

همچنین مقایسه نتایج حاصل برای لوله‌های سه‌راهی با جنس فولاد ضدزنگ با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه *زکوی* و همکاران[9] در مورد لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده نشان می‌دهد که در نمونه‌های BSS2 و BMS2 آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در حدود M/M_L=۰/۸۴ و عددی در حدود M/M_L=۱ است. برای نمونه‌های BSS3 و BMS3 شروع کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در حدود M/M_L=۰/۹۵ و عددی در حدود M/M_L=۱/۱ بوده که بسیار نزدیک بهم هستند. حال آن که در نمونه BSS1 آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در حدود M/M_L=۰/۹۳ و عددی در حدود M/M_L=۰/۸۴ و برای نمونه BMS1 آغاز کرنش‌های پیش‌رونده تجربی در حدود M/M_L=۰/۸۶ و عددی در حدود M/M_L=۰/۹۲ است که با هم اختلاف اندکی مشاهده می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار بررسی انباشتگی کرنش لوله‌های سه‌راهی فولاد ضدزنگ تحت اثر ممان‌های خمشی داخل صفحه توصیف شده و تاثیرات فشار داخلی و گشتاورهای خمشی در تغییر شکل‌های پیش‌رونده بررسی شده است. از مدل‌های سخت‌شوندگی

www.SID.ir

Archive of SID

سینماتیکی غیرخطی شابوشی، ترکیبی و آرمسترانگ-فردریک برای آنالیز رفتار لوله سه‌راهی تست‌شده تحت شرایط بارگذاری سیکلیک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار حداکثر کرنش تغییر شکل‌های پیش‌رونده در محل اتصال لوله‌های سه‌راهی رخ می‌دهد. نرخ کرنش تغییر شکل‌های پیش‌رونده با افزایش سطح بارگذاری خمشی در فشار داخلی ثابت افزایش می‌یابد که نتایج عددی نیز همین مورد را به‌وضوح نشان می‌دهد. با افزایش مقدار فشار داخلی مقدار کرنش تغییر شکل‌های پیش‌رونده افزایش خواهد یافت که این موضوع در نتایج عددی نیز به‌وضوح دیده می‌شود. هر چه مقدار ضخامت لوله‌ها بیشتر باشد مقدار گشتاور لازم برای شروع کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش خواهد یافت. نرخ تغییر شکل‌های پیش‌رونده پیش‌بینی‌شده توسط روش عددی براساس مدل سختی شابوشی و ترکیبی بهتر از مدل آرمسترانگ-فردریک بوده و ارزیابی مناسبی به‌ویژه در ممان‌های کم ارایه می‌دهد.

تشکر و قدردانی: از همکاری ارکان گروه مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی که در انجام این امر همکاری لازم را به عمل آوردند تقدیر و تشکر می‌شود.

تاییدیه‌اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: سیدجاوید زکوی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳٤%)؛ هادی محمدی‌اصل (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۳%)؛ داود بابایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۳%)

منابع مالی: با حمایت دانشگاه محقق اردبیلی انجام شده است.

۸- پی‌نوشت

فهرست علایم

b	ثابت ماده در سخت‌شوندگی ایزوتروپیک
C	ثابت ماده در سخت‌شوندگی سینماتیک
BSS1	نمونه اول لوله سه‌راهی از جنس فولاد ضدزنگ
BMS1	نمونه اول لوله سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده
D_o	قطر خارجی (میلی‌متر)
E	مدول یانگ
f	سطح تسلیم
J_2	تابع تسلیم فون میسز
k	اندازه اولیه سطح تسلیم
M	ممان دینامیکی خمشی (N.m)
M_L	حد ممان خمشی
P	فشار داخلی ($kgm^{-1}s^{-2}$)
P_d	فشار مجاز طراحی
Q	ثابت ماده در سخت‌شوندگی ایزوتروپیک
R	پارامتر سخت‌شوندگی ایزوتروپیک
S_m	تنش مجاز طراحی
S_u	استحکام نهایی
S_y	استحکام تسلیم
t	ضخامت
X	تانسور تنش برگشتی
X'	تانسور انحرافی تنش برگشتی
y	ضریب تصحیح

علایم یونانی

γ	ثابت ماده در سخت‌شوندگی سینماتیک
ε^p	تانسور کرنش پلاستیک
ε_p	کرنش پلاستیک معادل
ν	نسبت پواسون
σ	تانسور تنش
σ^0	اندازه سطح تسلیم لحظه‌ای
σ'	تانسور تنش انحرافی
σ_a	تنش محوری (طولی)
σ_h	تنش محیطی (هوپ)
σ_y	تنش تسلیم

منابع

1- Edmunds HG, Beer FJ. Notes on incremental collapse in pressure vessels. Journal of Mechanical Engineering Science. 1961;3(3):187-199.

2- Beaney EM. Measurement of dynamic response and failure of pipework. Strain. 1991;27(3):89-94.

3- Chen X, Jiao R, Kim KS. On the Ohno-Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel. International Journal of Plasticity. 2005;21(1):161-184.

4- Hassan T, Taleb L, Krishna Sh. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models. International Journal of Plasticity. 2008;24(10):1863-1889.

5- Zehsaz M, Zakavi SJ, Mahbadi H, Eslami MR. Cyclic strain accumulation of plain stainless steel pressurized cylinders subjected to dynamic bending moment. Journal of Applied Science. 2008;8(18):3129-3138.

6- Zakavi SJ, Zehsaz M, Eslami MR. The ratchetting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model. Nuclear Engineering and Design. 2010;240(4):726-737.

7- Zakavi SJ, Nourbakhsh M. Study on strain accumulation of carbon steel pressurized piping elbows under dynamic out-of-plane bendings. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(15):218-224. [Persian]

8- Zakavi SJ, Nourbakhsh M. The effect of basic factors on strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic moments. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(5):412-418. [Persian]

9- Zakavi SJ, Malekzadeh B, Shayestehnia E, Shiralivand B. Evaluation of several hardening models in the ratcheting behavior of piping branch with different diameter/thickness ratios. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):201-208. [Persian]

10- Yahiaoui K, Moffat DG, Moreton DN. Cumulative damage assessment of pressurised piping branch junctions under in-plane run pipe simulated seismic bending. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1995;63(2):119-128.

11- Yahiaoui K, Moffat DG, Moreton DN. Single frequency seismic loading tests on pressurized branch pipe intersections machined from solid. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1993;28(3):197-207.

12- Hassan T, Kyriakides S. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials: I. Uniaxial behavior. International Journal of Plasticity. 1994;10(2):149-184.

13- Hassan T, Kyriakides S. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials: II. Multiaxial behavior. International Journal of Plasticity. 1994;10(2):185-212.

14- Ohno N. Current state of the art in constitutive modeling for ratcheting. 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), August 17-22, 1997, Lyon, France. Lyon: IASMiRT; 1997. p. 201-212.

15- Bari Sh, Hassan T. Anatomy of coupled constitutive

www.SID.ir

Archive of SID

Y, Vaze KK. Uniaxial and biaxial ratchetting study of SA333 Gr.6 steel at room temperature. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2003;80(3):179-185.
24- Chen X, Chen X, Yu D, Gao B. Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting in pressurized piping. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2013;101:113-142.
25- Vishnuvardhan S, Raghava G, Gandhi P, Saravanan M, Goyal S, Arora P, et al. Ratcheting failure of pressurized straight pipes and elbows under reversed bending. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2013;105-106:79-89.
26- Foroutan M, Ahmadzadeh GR, Varvani Farahani A. Axial and hoop ratcheting assessment in pressurized steel elbow pipes subjected to bending cycles. Thin Walled Structures. 2018;123:317-323.
27- Chen X, Chen X. Study on ratcheting effect of pressurized straight pipe with local wall thinning using finite element analysis. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2016;139-140:69-76.
28- Palma MD. Modelling of cyclic plasticity for austenitic stainless steels 304L, 316L, 316L(N)-IG. Fusion Engineering and Design. 2016;109-111(Pt A):20-25.
29- Lemaitre J, Chaboche JL. Mechanics of solid materials. Cambridge UK: Cambridge University Press; 1994.
models for ratcheting simulation. International Journal of Plasticity. 2000;16(3-4):381-409.
16- Bari Sh, Hassan T. Kinematic hardening rules in uncoupled modeling for multiaxial ratcheting simulation. International Journal of Plasticity. 2001;17(7):885-905.
17- Bari Sh, Hassan T. An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation. International Journal of Plasticity. 2002;18(7):873-894.
18- Chaboche JL. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. International Journal of Plasticity. 1989;5(3):247-302.
19- Ohno N, Wang JD. Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part I: Formulation and basic features for ratchetting behavior. International Journal of Plasticity. 1993;9(3):375-390.
20- Abdel-Karim M, Ohno N. Kinematic hardening model suitable for ratchetting with steady-state. International Journal of Plasticity. 2000;16(3-4):225-240.
21- Mayama T, Sasaki K, Ishikawa H. Biaxial ratcheting deformation of type 304 stainless steel: Effect of memorization of back stress. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science. 2004;218(9):901-908.
22- Hassan T, Zhu Y, Matzen VC. Improved ratcheting analysis of piping components. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1998;75(8):643-652.
23- Kulkarni SC, Desai YM, Kant T, Reddy GR, Parulekar

www.SID.ir