

تأثیر بارهای دینامیکی در رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های سه راهی تحت فشار داخلی

استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی

سیدجاوید زکوی
علیرضا رحیمی*

چکیده

در این تحقیق، رفتار انباشتگی کرنش در لوله‌های سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده تحت فشار داخلی و ممان‌های دوره ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدل کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی برای بررسی رفتار پلاستیک لوله‌های سه‌راهی بکار برده شده است. پارامترهای ثابت مدل کرنش سختی از روی سیکل‌های پایدار شده منحنی‌های تنش-کرنش تحت کنترل کرنش‌های مختلف بدست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار انباشتگی کرنش در نزدیکی محل اتصال سه‌راهی در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. مشاهده نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که در ممان‌های با دامنه کم انباشتگی کرنش دارای مقدار بسیار پایین و نزدیک به صفر است، با افزایش تنش میانگین و بالا رفتن دامنه ممان‌های اعمال شده، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها میزان انتقال انباشتگی کرنش نیز بیشتر می‌شود. نرخ رشد اولیه انباشتگی کرنش زیاد بوده و سپس با افزایش تعداد سیکل‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. البته نرخ انباشتگی کرنش پیش‌بینی شده توسط روش عددی در مقایسه با نتایج تجربی فراتخمین می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری سیکلی، مدل کرنش سختی سینماتیکی، انباشتگی کرنش، فولاد کربنی ساده، لوله‌های سه راهی تحت فشار.

The Effect of Dynamic Loading on the Ratcheting Behavior of Pressurized Piping Branch

S. J. Zakavi

Assistant Professor, Mohaghegh Ardabili University, Faculty of Technical and Engineering

A. R. Rahimi

M.Sc. Student, Mohaghegh Ardabili University, Faculty of Technical and Engineering

Abstract

In this study, cyclic loading behavior of carbon steel pressurized piping branch junction are described. Effects of internal pressure and quantity of moments on ratcheting strain are investigated. The nonlinear kinematic hardening model is used to assessment of the plastic behavior of the branch pipes. The constant parameters of the hardening model and stress-strain data have been obtained from several stabilized cycles of specimens that are subjected to symmetric strain cycles. The results showed that the maximum ratcheting strain occurred on the flanks in the branch hoop stress direction just above the junction. The results show that in low moments, the ratcheting strain rate is very low and near to zero. The ratcheting strain rate increases with increase of average stress and the moment levels in constant pressure. The results show that initial the rate of ratcheting is large and then it decreases with the increasing of cycles. The hoop strain ratcheting rate by FE model give over estimated values comparing with the experimental data.

Keywords: Cyclic loading moment, Strain hardening model, Ratcheting, Carbon steel, Pressurized piping branch.

۱- مقدمه

هرگاه بار اعمال شده سیکلی با مقدار میانگین غیرصفر به اندازه لازم برای تسلیم جسم کافی باشد، در اجزاء یک تغییرشکل سیکلی غیرالاستیک اتفاق خواهد افتاد که این تغییرشکل پلاستیک، انباشتگی کرنش نامیده می‌شود. عمدتاً بررسی رفتار پلاستیک در این اجزاء با استفاده از مدل‌های کرنش سختی سینماتیکی انجام می‌شود. لوله‌های سه راهی در سیستم‌های نیروگاهی و تاسیساتی مورد مصرف بسیار می‌باشد. از جمله تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه رفتار انباشتگی کرنش، بررسی رفتار اجزا سه راهی در سیستم‌های لوله‌ای تحت نیروهای زمین لرزه‌ای در نیروگاه‌ها بوده که این امر توسط یاهیوی و همکارانش انجام و میزان انباشتگی کرنش در اثر این بارگذاری‌ها به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا رفتار لوله سه راهی از جنس فولاد کربنی ساده تحت فشار داخلی با قطر خارجی ۷۰ میلی‌متر تحت اثر بارهای خمشی دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از کد المان محدود ABAQUS رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های سه راهی تحت فشار داخلی از جنس فولاد کربنی ساده در معرض بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرکانس آزمایش‌های تجربی در حدود ۷ هرتز می‌باشد. به وسیله یک سری از آنالیزهای المان محدود و بر پایه مدل کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی این پدیده بررسی و سپس داده‌های انباشتگی کرنش به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

۳- مدل‌های کرنش سختی سینماتیکی غیر خطی

مدل‌های کرنش سختی سینماتیکی برای شبیه‌سازی رفتار غیرالاستیک مواد در معرض بارگذاری سیکلی به کار برده می‌شوند. در حالت کلی استفاده از مدل‌های پلاستیسیته مواد از نوع کرنش سختی ایزوتروپیک برای کرنش سختی سیکلی توصیه نمی‌شود. مدل کرنش سختی ایزوتروپیک اگر خزش وجود نداشته باشد معمولاً رفتار Shake down را پیش‌بینی می‌کند [۴]. مدل‌های پلاستیسیته کرنش سختی سینماتیکی برای مدل کردن رفتار غیرالاستیک مواد در معرض بارهای سیکلی پیشنهاد شده است [۵-۹]. اولین مدل کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی به توسط آرمسترانگ-فردریک [۱۰]. ارائه شده است. بر پایه قانون کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی آرمسترانگ-فردریک، مدل‌های زیادی برای بررسی رفتار انباشتگی کرنش مواد تحت بارگذاری چند محوره و تک محوره

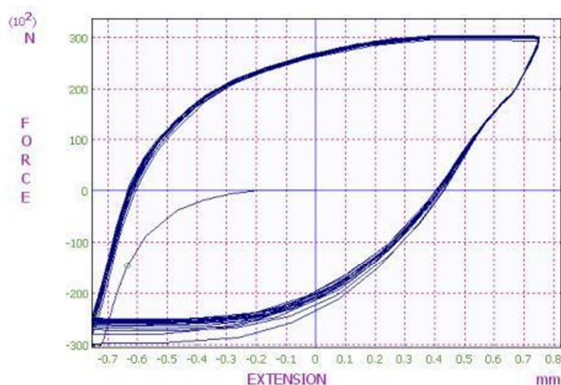
اراده شده است. این مدل کرنش سختی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$dX = \frac{2}{3} C d\varepsilon^P - \gamma X d\varepsilon_P \quad (1)$$

$d\varepsilon_P$ نرخ کرنش پلاستیک معادل، X تانسور تنش برگشتی و C, γ دو پارامتر وابسته به مواد در مدل کرنش سختی سینماتیکی آرمسترانگ-فردریک بوده و $\gamma=0$ بیانگر قانون سینماتیکی خطی می‌باشد. فرم ساده شده مدل کرنش سختی بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۱].

$$[X = v \frac{C}{\gamma} + (X_0 - v \frac{C}{\gamma}) \exp[-v\gamma(\varepsilon_P - \varepsilon_{P_0})]] \quad (2)$$

که $v = \pm 1$ بر طبق جهت جریان و ε_{P_0}, X_0 مقادیر اولیه در شروع هر جریان پلاستیکی می‌باشند. برای به دست آوردن پارامترهای کرنش سختی سینماتیکی داشتن نمونه‌هایی با استحکام تسلیم و استحکام نهایی برابر با نمونه‌های تجربی [۳] الزامی است. برای این منظور پس از تهیه، نمونه تحت بارگذاری سیکلی با دامنه کرنش‌های مختلف توسط دستگاه سنتام ۱۵۰^۱ قرار داده شد. از آزمایشات منحنی‌های سیکلی تنش-کرنش را گرفته و سپس با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش و روش سیکل پایدار پارامترهای کرنش سختی سینماتیکی استخراج شده است که مقدار $C = 2763.69 \text{ MPa}$ و $\gamma = 17.66$ برای فولاد کربن ساده به دست آمده است. یک نمونه از منحنی‌های تنش-کرنش سیکلی با کنترل دامنه کرنش ± 0.75 در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از نمودار بارگذاری سیکلی با کنترل دامنه کرنش

۴- دوباره خوانی برنامه‌های تجربی

چگونگی انجام آزمایش‌ها و توصیف اندازه‌گیری مقادیر تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است. آزمایش توسط یاهیوی و همکارانش [۳] انجام شده است. جمع آوری داده‌های

^۱ Santam 150

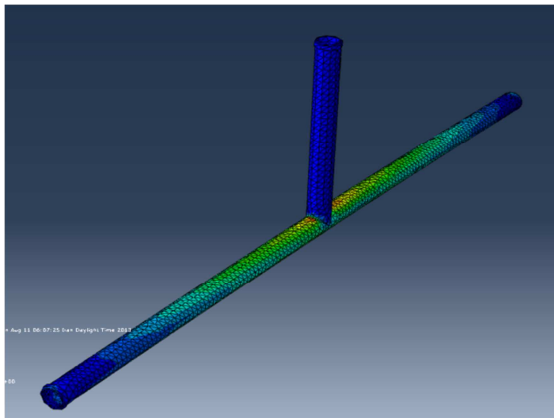
کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط گیج‌های متصل به یک سر شاخه ساقه لوله سه راهی استنباط می‌شوند.

جدول ۲- خواص مواد فولاد کربن ساده به دست آمده از آزمایش‌های کشش

مدول E یانگ	تنش σ_{ult} نهایی	تنش σ_y تسلیم	$S_m = \min\left(\frac{1}{3}\sigma_{ult}, \frac{2}{3}\sigma_y\right)$
۲۱۴GPa	۴۷۵MPa	۲۲۸MPa	۱۵۸MPa

۵- روش المان محدود

امروزه استفاده از مدل‌های کرنش سختی بهبود یافته در روش‌های عددی برای بررسی رفتار انباشتگی کرنش گسترش فراوان یافته است [۱۲-۱۵]. در این تحقیق با استفاده از کد المان محدود غیرخطی ABAQUS برای ارزیابی رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های سه‌راهی تحت بارگذاری فشار به همراه ممان دینامیکی مشابه اثرات زمین لرزه ۳-ای استفاده شده است. لوله سه‌راهی تحت فشار و بارگذاری سیکلی دارای ۲٫۵ متر طول ساقه لوله است که در محیطی سه بعدی و با ۱۲۷۲۷ تعداد المان از نوع C3D4 (هرمی سه بعدی Solid دارای چهار گره) مش بندی شده (شکل ۳) که این تعداد المان انتخاب شده پس از آزمون‌های مکرر و ارائه آزمایش همگرا انتخاب شده است. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی سه بعدی خیلی بهتر از نتایج مدل‌سازی دو بعدی بوده و مدل‌سازی سه‌بعدی پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را از رفتار غیرخطی لوله‌های سه‌راهی تحت بارگذاری ارائه می‌دهد.

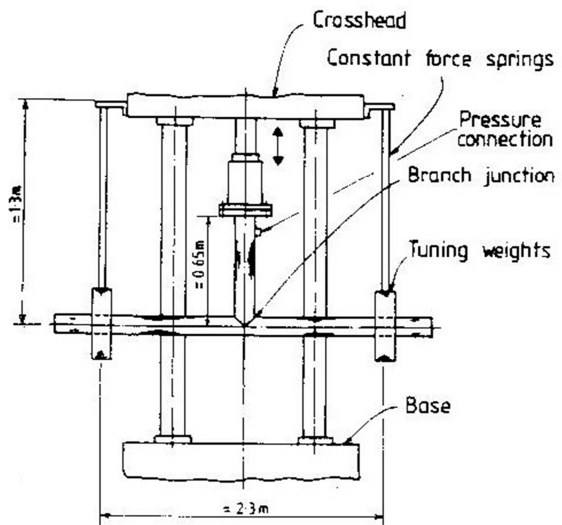


شکل ۳- مش بندی لوله سه‌راهی در محیط سه بعدی

۶- نتایج عددی و تجربی

یک نمونه از انباشتگی کرنش نتیجه شده از نرم افزار ABAQUS در شکل ۴ نشان داده شده است.

کرنش بوسیله یک کرنش‌سنج ۲۴ کاناله در فرکانس حدود ۷ هرتز انجام شده است. در همه آزمایش‌های انجام شده، لوله‌ها دارای فشار داخلی تا فشار طراحی خودشان می‌باشند. دامن‌های ورودی بصورت پله‌ای برای آزمایش‌های بعدی تا زمانی که شکست رخ بدهد، افزایش می‌یابند. هر آزمایش می‌تواند طی ۱۰ سیکل و یا حتی تا ۲۰۰ سیکل انجام شود تا به شکست منجر شود که بستگی به نیرو و گشتاورهای اعمال شده و همچنین ضخامت و ابعاد سه‌راهی مورد نظر دارد. جزئیات هندسی و مشخصات نمونه تجربی آزمایش شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

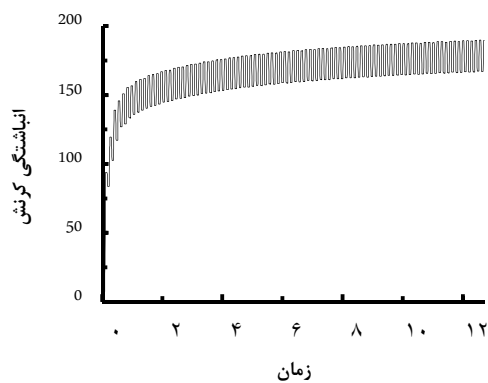
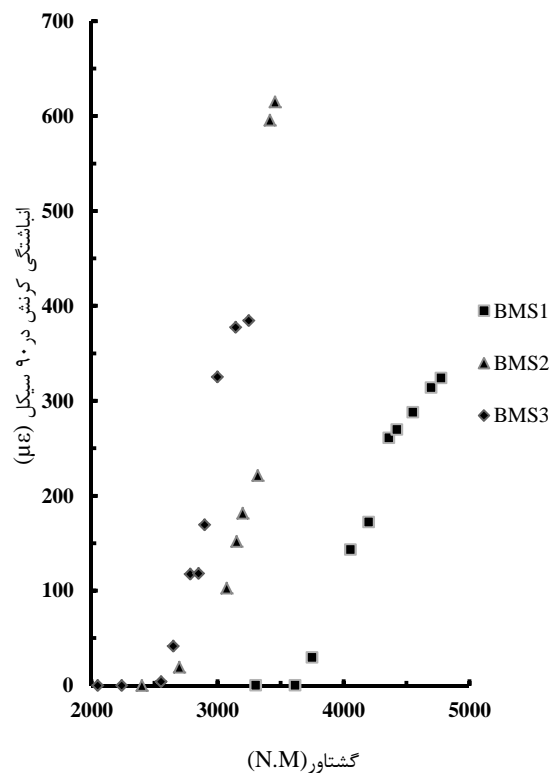


شکل ۲- دستگاه آزمایش لوله سه‌راهی تحت خمش صفحه‌ای [۵]

جدول ۱- مشخصات هندسی لوله‌های سه‌راهی و مشخصات آزمایش

لوله‌ها	ضخامت (mm)	فشار (Mpa)	D_m/t	فرکانس (HZ)
BMS1	۴٫۲۴	۱۸٫۵۸	۱۶	۷٫۵
BMS2	۳٫۲	۱۳٫۸۵	۲۰٫۹	۷٫۳
BMS3	۲٫۷۵	۱۱٫۸۴	۲۴	۷٫۱

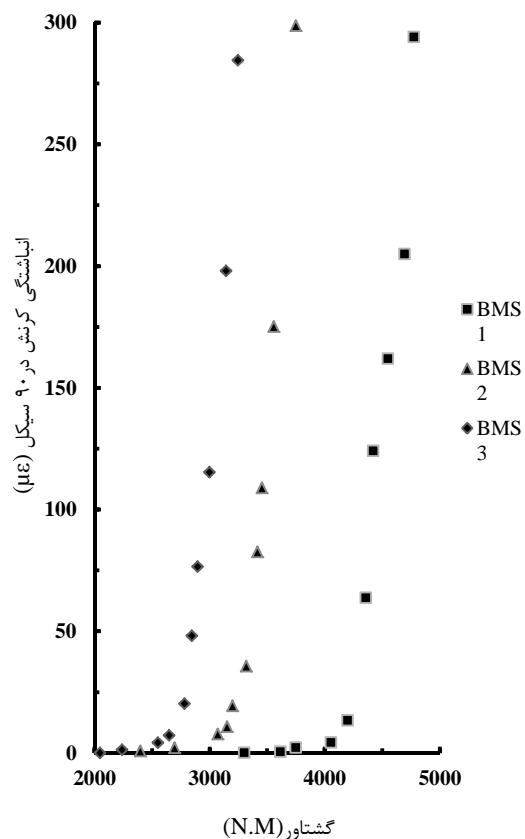
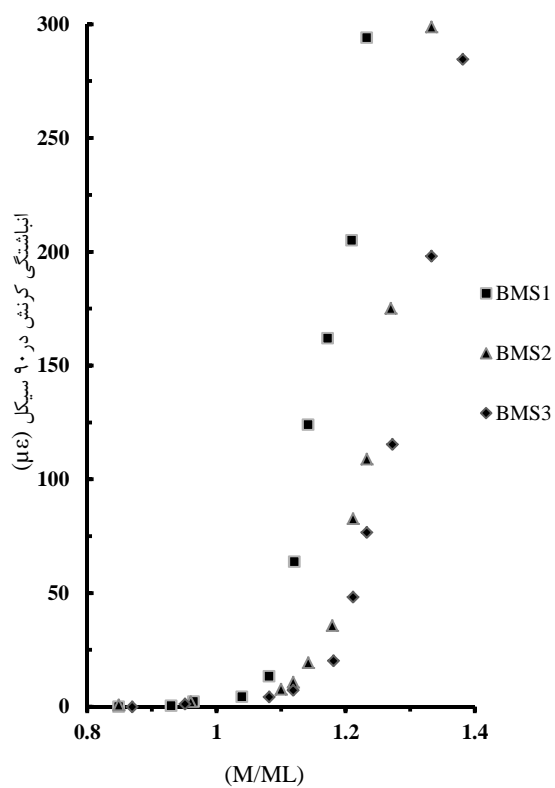
خواص مواد (فولاد کربنی ساده) که از آزمایش کشش بدست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است که فشار داخلی لوله سه راهی تا فشار طراحی می‌باشد. دو نیروی فشار داخلی و نیروی متمرکز سینوسی (دینامیکی) به لوله‌های سه‌راهی اعمال می‌شود که نیروهای متمرکز در دو انتهای ساقه لوله‌ها اعمال شده‌اند. فرکانس اساسی و نیروهای اعمال شده در هر نمونه در فرکانس مشابه اثرات زمین لرزه ای و با دامنه جابجایی ورودی (بنابر شتاب اعمالی) برای هر آزمایش منحصر به فرد است. سپس دامنه به صورت پله‌ای برای آزمایش بعدی بیشتر شده تا زمانی که شکست در نمونه بوجود آید. گشتاورهای خمشی دینامیکی بکار برده شده برای ارزیابی تنش‌های سیکلی به صورت مستقیم قابل کنترل نیستند، اما بوسیله برون‌یابی از



شکل ۴- یک نمونه از انباشتگی کرنش عددی گرفته شده از نمونه BMS2 در گشتاور خمشی صفحه‌ای ۳۲۰۰

نتایج انباشتگی کرنش تجربی و عددی در شکل‌های ۵ و ۶ برحسب محدوده گشتاورها و در شکل‌های ۷ و ۸ برحسب M/ML ارائه شده‌اند.

شکل ۶- انباشتگی کرنش عددی برحسب گشتاورها



شکل ۵- انباشتگی کرنش تجربی برحسب گشتاورها

شکل ۷- انباشتگی کرنش تجربی برحسب M/ML

انباشتگی کرنش با کمک آزمایشات تجربی و مقایسه آن با روش‌های عددی با یکدیگر پیشنهاد می‌گردد. داده‌های به دست آمده تجربی و نتایج عددی برای هر نمونه BMS در بالاترین مقدار خود در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهد که شروع انباشتگی کرنش تجربی در لوله‌های سهراهی از جنس فولاد کربن ساده در $0.93 < M/ML < 1.1$ و شروع انباشتگی کرنش عددی در $0.96 < M/ML < 1.008$ اتفاق می‌افتد. داده‌های نمونه آزمایش شده BMS3 در جدول ۳ ارائه شده است.

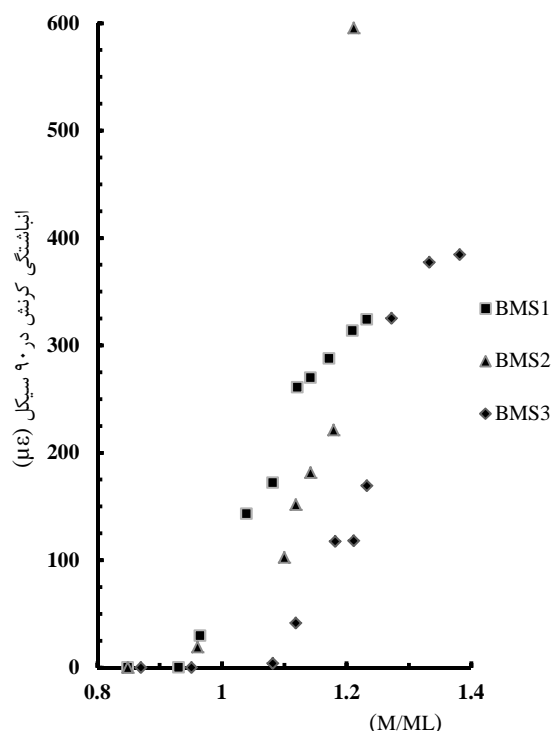
۷- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار بارگذاری سیکلی لوله سه راهی فولاد کربنی ساده تحت فشار ثابت بررسی و اثرات فشار داخلی ثابت و گشتاورهای خمشی در ایجاد انباشتگی کرنش بررسی شده است. از قانون کرنش سختی سینماتیکی غیرخطی آرمسترانگ-فردریک برای آنالیز رفتار لوله‌های سه راهی آزمایش شده تحت شرایط بارگذاری سیکلی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار انباشتگی کرنش در نزدیکی محل اتصال سهراهی در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. مشاهده نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که در ممان‌های پایین انباشتگی کرنش دارای مقدار بسیار پایین و نزدیک به صفر است، در حالی که با افزایش تنش میانگین و بالا رفتن مقدار ممان‌های اعمال شده، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها میزان انتقال انباشتگی کرنش نیز بیشتر می‌شود. نرخ رشد اولیه انباشتگی کرنش زیاد بوده و سپس با افزایش تعداد سیکل‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. البته نرخ انباشتگی کرنش پیش‌بینی شده توسط روش عددی حاضر در مقایسه با نتایج تجربی فراتخمین می‌باشد.

جدول ۳- داده‌های تجربی و عددی انباشتگی کرنش برای نمونه

BMS3

گشتاور خمشی دینامیکی M(N.m)	M/M_L	داده تجربی انباشتگی کرنش ($\mu\epsilon/cycle$)	داده عددی انباشتگی کرنش $\mu\epsilon/cycle$
۲۰۴۸	۰٫۸۶۹	۰	۰
۲۲۴۰	۰٫۹۵۱	۱٫۲۹	۰
۲۵۵۲	۱٫۰۸۱	۴٫۳	۳٫۹۶۸
۲۶۴۸	۱٫۱۱۸	۷٫۳۱	۴۱٫۵۴۴
۲۷۸۴	۱٫۱۸۱	۲۰٫۲۲	۱۱۷٫۵۴۵
۲۸۴۸	۱٫۲۱۱	۴۸٫۲	۱۱۸٫۰۵۶
۲۸۹۶	۱٫۲۳۲	۷۶٫۶۱	۱۶۹٫۱۹۸
۳۰۰۰	۱٫۲۷۲	۱۱۵٫۳۵	۳۲۵٫۰۸۱
۳۱۴۴	۱٫۳۳۲	۱۹۷٫۹۹	۳۷۷٫۴۸۱
۳۲۴۸	۱٫۳۸۱	۲۸۴٫۵	۳۸۴٫۳۸۵



شکل ۸- انباشتگی کرنش عددی برحسب M/ML

تغییر شکل‌های پیش‌رونده برای هر لوله سهراهی در مقابل گشتاور خمشی دینامیکی در نمونه‌های BMS1 و BMS2 و BMS3 در شکل‌های بالا نمایش داده شده است. داده‌های تجربی و عددی به دست آمده از انباشتگی کرنش برای نمونه BMS3 در جدول ۳ به طور خلاصه ارائه شده است. کرنش‌های ضبط شده در بالاترین مقدار منفی یا مثبت به دست آمده می‌باشند.

در این مطالعه، مشاهدات تجربی و نتایج عددی انباشتگی کرنش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که خمش سیکلی لوله‌ها، انباشتگی کرنش‌ها را در لوله ایجاد می‌کند که به این کرنش‌ها، انباشتگی کرنش گفته می‌شود. مقدار حداکثر انباشتگی کرنش در نزدیکی محل اتصال لوله‌های سه راهی و در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. انباشتگی کرنش در جهت‌های محیطی انتشار می‌یابند. این تحقیقات، برای ارزیابی مکانیزم شکست خستگی انباشتگی کرنش و گسترش دادن و فرمولی کردن مدل‌های شبیه‌سازی برای اجزاء لوله‌ای لازم و ضروری هستند. پیشرفت‌های قابل ذکری در بهبود مدل‌های پلاستیسیت سیکلی صورت پذیرفته است اما برای حصول به مدل‌های کرنش سختی بهتر، هنگامی که فقط پارامترهای مدل از خواص مواد تعیین شوند، نیاز به آزمون‌های تجربی می‌باشد. امروزه

ratcheting simulation. International Journal of Plasticity 17, 885–905.

[9] Bari S., Hassan T., 2002. An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation. International Journal of Plasticity 18, 873–894.

[10] Armstrong P.J., Frederick C.O., 1966. A mathematical representation of the multi axial Bauschinger effect. CEGB Report RD/B/N 731, Central Electricity Generating Board. The report is reproduced as a paper: 2007. Materials at High Temperatures, 24(1):1-26.

[11] Chaboche J.L., 1986. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity, Int. J. of Plasticity, 2:149–188.

[12] Chen Xiaohui., Chen Xu., Yu, Dunji., Gao, Bingjun., 2013. Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting in pressurized piping, Int. J. of Pressure Vessels and Piping , 101:113-142.

[13] Chen X., Jiao R., 2004. Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction. International Journal of Plasticity 20, 871–898.

[14] Chen X., Jiao R., Kwang S.K., 2005. On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel. Int. J. of Plasticity, 21:161-184.

[15] Tasnim H., Lakhdar T., Shree K., 2008. Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models, Int. J. of Plasticity, (24) 1863–1889.

علائم

مدول یانگ	E
اندازه اولیه سطح تسلیم	K
گشتاور خمشی دینامیکی	M
گشتاور تسلیم	M_y
گشتاور حد نهایی	M_l
فشار آزمایش	p
شعاع متوسط لوله	r
شدت تنش مجاز طراحی	S_m
ضخامت لوله	t
تانسور تنش برگشتی	X
تنش تسلیم	σ_y
تنش حد نهایی شکست	σ_{ult}
تانسور کرنش پلاستیک	ε^P
کرنش پلاستیک معادل	ε_p
پارامترهای ثابت مدل کرنش سختی غیرخطی	C, γ

مراجع

- [1] Yahiaoui K., Moffat D.G., Moreton D.N., 1994. Stress Limits for Pressurized Piping Branch Junctions Under In-Plane Run pipe Simulated Seismic Loadings. ASME J. Pressure Vessel Tec 116:150-160.
- [2] Yahiaoui K, Moffat D.G., Moreton D.N. 1995. Cumulative damage assessment at pressurized piping branch junctions under in- plane run pipe simulated seismic bending, Int. J. Pres. Ves. Piping 63:119-128.
- [3] Yahiaoui K, Moffat D.G., Moreton D.N. 1993. Single frequency seismic loading tests on pressurized branch pipe intersections machined from solid, J. of Strain Analysis, 28(3) 197-207.
- [4] Mahbadi H. and Eslami M.R., 2006. Cyclic loading of thick vessels based on the Prager and Armstrong–Frederick kinematic hardening models. Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 83:409-419.
- [5] Hassan T., Kyriakides S., 1994a. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials, Part I: uniaxial behavior. International Journal of Plasticity 10, 149–184.
- [6] Hassan T., Kyriakides S., 1994b. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials, Part II: multiaxial behavior. International Journal of Plasticity 10, 185–212.
- [7] Ohno N., 1998. Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratcheting. International Journal of Mechanics and Sciences 40 (2–3), 251–261.
- [8] Bari S., Hassan T., 2001. Kinematic hardening rules in uncoupled modeling for multiaxial