



The Effect of Temperature and Bending Moments on the Strain Accumulation of Carbon Steel Piping Branch

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zakavi S.J^{1*},
Bakhshipour E. ¹

How to cite this article

Zakavi S J, Bakhshipour E. The Effect of Temperature and Bending Moments on the Strain Accumulation of Carbon Steel Piping Branch. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(07):461-471.

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. P.O.B. 179.

zakavi@uma.ac.ir

Article History

Received: January 24, 2021

Accepted: April 04, 2022

ePublished: June 06, 2022

ABSTRACT

In this paper, the effect of temperature and bending moments is investigated on the strain accumulation behavior of carbon steel piping branch by using the Chaboche kinematic hardening model with the isotropic hardening law. Carbon steel branch junctions are tested at five temperatures of 20, 50, 100, 150 and 200 °C under internal pressure and temperature with dynamic bending moment. The results obtained by numerical analysis show that the highest amount of ratcheting occurred near the branch junctions in the circumferential direction. The strain ratcheting occurred mainly because of dynamic moments and high temperatures. The results show that in all three samples, the amount of strain ratcheting increases with increasing of dynamic moment level and temperature. With increasing of the ratio of diameter to thickness in branch junctions, the onset of strain accumulation occurs at low moment levels. It can be concluded that initially, the rate of strain ratcheting is high and with the increase of loading cycles, this rate decreased due to the strain hardening phenomenon. The increase of strain ratcheting at high temperatures is due creep strain because of high temperature and mainly accumulated plastic strain under dynamic bending moments because of cyclic plasticity.

Keywords Piping Branch, Strain Accumulation, Creep, Combined Hardening Model, Dynamic Moment.

CITATION LINKS

[1] High-temperature Low-cycle fatigue of Alloy 800H. [2] Beading Ratcheting tests of Z2CND18.12 Stainless Steel. [3] Ratcheting fatigue behaviour of 42CrMo4 steel under different heat treatment conditions. [4] Experimental investigation on temperature-dependent uniaxial ratcheting of AZ31B magnesium alloy. [5] Ratcheting assessment of Visco-Plastic alloys at ambient temperature by means of the A-V and O-W hardening rate frameworks. [6] Experimental study on rate-dependent uniaxial whole-life ratcheting and fatigue behavior of polyamide 6. International Journal of Fatigue. [7] Ratcheting assessment in the tubesheets of heat exchangers using the nonlinear isotropic/kinematic hardening model [8] Ratcheting fatigue of modified 9Cr-1Mo steel and Inconel alloy 617 at ambient temperature: Effect of uniform plastic strain. [9] Response and cyclic strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic out-of-plane bending. [10] Study on strain accumulations of plain carbon steel elbows subjected to dynamic out of plane bending by the chaboche model with isotropic hardening. [11] The ratcheting behavior of Carbon Steel piping elbows under cyclic bending moments and temperature. [12] Single Frequency Seismic Loading Tests on Pressurized Branch Pipe Intersections Machined from Solid. [13] Time independent constitutive theories for cyclic plasticity. [14] On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects. [15] Mechanics of Solid Materials [16] Evaluatin of the ratcheting behaviour of carbon Steel pressurized piping elbows by chaboche cyclic plasticity model. [17] Evaluation of combined hardening model in ratcheting behavior of pressurized piping elbows subjected to in-plane moments. [18] The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model. [19] The effect of Basic factors on strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic moments. [20] Study of Ratcheting Behavior of 304L Stainless Steel Branch Pipes by Using Chaboche and Combined Hardening Models. [21] Evaluation of several hardening models in the ratcheting behavior of piping branch with Different diameter/thickness ratios. [22] The Effect of Dynamic Loading on the Ratcheting Behavior of Pressurized Piping Branch.

تاثیر دما و ممان‌های خمشی در میزان انباشتگی کرنش لوله‌های سهراهی از جنس فولاد کربنی ساده

سید جاوید زکوی*

مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

اسماعیل بخشی‌پور

مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

چکیده

در این مقاله، با استفاده از مدل سختی سینماتیکی شاپوش به همراه قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک بر بررسی تاثیر دما و ممان‌های خمشی در میزان رفتار انباشتگی کرنشی لوله سهراهی از جنس فولاد کربنی ساده پرداخته می‌شود. لوله‌های سهراهی تحت فشار و دمای داخلی ثابت همراه با ممان دینامیکی سیکلی داخل صفحه متاثر از پنج دمای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. نتایج عددی به دست آمده بر روی نمونه‌های مورد آزمون نشانگر این است که حداکثر مقدار کرنش پیش‌رونده در نزدیکی محل اتصال سهراهی در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. کرنش‌های پیش‌رونده به وجود آمده، اکثراً ناشی از ممان‌های دینامیکی و دماهای بالا می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در هر سه نمونه موجود، میزان کرنش‌های پیش‌رونده با افزایش اندازه ممان دینامیکی و دما، افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت قطر به ضخامت در لوله‌های سهراهی، شروع کرنش‌های پیش‌رونده محیطی در نسبت‌های ممان کم اتفاق می‌افتد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده در ابتدا زیاد بوده و با افزایش سیکل‌های بارگذاری، این نرخ به علت غالب بودن پدیده سخت‌شوندگی، کرنش کاهش پیدا می‌کند. البته افزایش کرنش‌های پیش‌رونده در دماهای بالا شامل کرنش خزشی به علت بالا رفتن دما و عمدتاً کرنش پلاستیکی انباشته به علت پلاستیک سیکلی در اثر ممان‌های دینامیکی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: لوله‌های سهراهی، انباشتگی کرنشی، خزش، مدل سختی ترکیبی، ممان دینامیکی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

* نویسنده مسئول: zakavi@uma.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی و تحلیل خطوط لوله‌های تحت فشار که به طور هم‌زمان تحت گشتاور سیکلی و دما قرار دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور طراحی ایمن و مناسب برای خطوط لوله‌های تحت فشار بالا، معمولاً کدهای استاندارد همانند ASME boiler and Pressure Vessel Code کاربرد دارد. بارگذاری‌های موجود در این لوله‌ها و اتصالات لوله‌ای، فشار سیال، دما و اثر ممان‌های تناوبی مشابه با اثرات زلزله می‌باشد که تحت این نوع بارگذاری‌ها ممکن است پدیده‌ی کرنش‌های پیش‌رونده بوجود آید که منجر به وارد شدن صدمات جبران‌ناپذیری به سازه‌ها و اجزا تاسیساتی شود. از این رو در صنایع مختلف نظیر صنایع شیمیایی و نیروگاهی مهم‌ترین انگیزه و هدف، یافتن یک روش طراحی کارآمد برای

رهایی از اثرات مخرب تغییر شکل‌های پیش‌رونده و پلاستیسیته متناوب می‌باشد.

با توجه به اهمیت پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده و رفتار این پدیده در دماهای بالا محققین زیادی در این زمینه به تحقیق پرداخته‌اند. کائی، در سال ۲۰۰۹، آزمایش‌های خزش-خستگی کم چرخه را بر روی آلیاژ 800H در بازه‌ی ۷۶۰-۲۲ درجه سانتی‌گراد انجام داد، کرنش محوری، میان مقادیر مثبت و منفی برابر با بازه ۲-۰/۳ درصد در نوسان بوده است. تعداد سیکل‌های بارگذاری تا خرابی به عنوان تابعی از محدوده کرنش پلاستیک از قانون کافین-مان سون در محدوده کرنش کم تبعیت می‌کند. در طی تست خستگی کم چرخه، تغییر شکل پلاستیک به طور ناپیوسته در آلیاژ 800H رخ می‌دهد که با افزایش سیکل‌های بارگذاری این اثر ناپدید می‌شود^[1]. ژو و همکارانش، در سال ۲۰۱۲ به صورت آزمایشگاهی به مطالعه رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده فولاد ضد زنگ Z2CND18.12 پرداختند. خصوصیات تغییر شکل‌های غیر الاستیک پیش‌رونده تحت بارگذاری‌های مختلف خمشی و دما برای فولاد ضد زنگ Z2CND18.12 در دستگاه تست دینامیکی مکانیکی بررسی شده است که نتایج آزمایش نشان می‌دهد که دما و بار خمشی تا حد زیادی بر میزان کرنش‌های پیش‌رونده تاثیر می‌گذارند. همچنین ملاحظه می‌شود که رابطه بین مدول یانگ و دما، یک رابطه خطی بوده و با افزایش دما مقدار آن کاهش می‌یابد^[2].

کریسی و همکارانش، در سال ۲۰۱۷، به بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده فولاد 42CrMo4 در دمای محیط با استفاده از ترکیبات مختلف تنش میانگین (σ_m) و دامنه تنش (σ_a) در دو شرایط مختلف عملیات حرارتی پرداختند. نتایج نشانگر آن است که مقدار تغییر شکل‌های پیش‌رونده با افزایش تنش در هر دو حالت آئیل و نرمالیزه افزایش می‌یابد که مقدار تغییر شکل‌های پیش‌رونده در حالت نرمالیزه به علت افزایش چگالی دیسلوکاسیون‌ها در طی بارگذاری سیکلی نامتقارن کمتر است^[3]. هنگ لی و همکارانش، در سال ۲۰۱۹، به بررسی تجربی کرنش‌های پیش‌رونده تک محوری وابسته به دما در آلیاژ منیزیم AZ31B پرداختند. برای بررسی تغییر شکل‌های وابسته به دما از آزمایش‌های سیکلی تنش-کرنش کنترل شده در پنج دمای معین (به عنوان مثال ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۲۵ درجه سانتی‌گراد) استفاده شده است. آزمایش سیکلی آلیاژ منیزیم در دماهای بالا انجام و ملاحظه می‌شود که ویژگی سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی آن به شدت به دما وابسته می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آلیاژ منیزیم AZ31B تغییر شکل‌های سیکلی وابسته به دما را از خود نشان می‌دهد، عدم تقارن در بخش منحنی کشش-فشار در دمای اتاق به طور مشخص مشاهده شده که با افزایش دمای آزمایش از بین می‌رود. سخت‌شوندگی سیکلی قابل توجهی در دمای پایین تر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد، اما در نهایت با افزایش دمای آزمایش به یک مقدار بحرانی خاص (۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) یک نرم‌شوندگی سیکلی مشاهده می‌شود.

سانتی‌گراد) برای به دست آوردن سیکل‌های پسماند پایدار و به دست آوردن پارامترهای سخت شونده‌گی ماده انجام شده است. علاوه بر این، اثر تعداد لوله بر روی کرنش‌های پیش‌رونده بررسی شده است. بنابراین سه مدل صفحه لوله با تعداد لوله‌های مختلف در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که کرنش‌های پیش‌رونده در ابتدا قابل توجه بوده و به تدریج از مقدار اولیه خود کاهش می‌یابند. با افزایش تعداد لوله‌ها به حالت پایدار می‌رسند و کرنش‌های پیش‌رونده افزایش می‌یابد.

پررنا و همکارانش^[8] به بررسی پدیده خستگی در دو نمونه فولاد اصلاح شده 9Cr-1Mo و آلیاژ ۶۱۷-IN که مورد استفاده در اجزای تاسیسات لوله‌ای در نیروگاه‌ها می‌باشند، پرداختند. این اجزا به دلیل تنش متوسط ناشی از نوسانات دما و فشار داخلی دچار پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌شوند. در این تحقیق کرنش پلاستیک انباشته شده در مقایسه با عمر خستگی این دو ماده تحت تنش متوسط و دامنه تنش یکسان در دمای محیط دارای نقش اساسی می‌باشد. بررسی نشان می‌دهد که کرنش پلاستیک انباشته شده در آلیاژ ۶۱۷-IN، به طور قابل توجهی بیشتر از فولاد اصلاح شده 9Cr-1Mo می‌باشد، در حالی که عمر خستگی ناشی از آلیاژ IN-617 مقداری بیشتر از فولاد اصلاح شده است. بنابراین، کرنش کششی یکنواخت مواد را می‌توان به عنوان یک پارامتر مهم برای انتخاب مواد برای استفاده در تاسیسات لوله‌ای در نیروگاه‌ها در نظر گرفت که دچار پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌شوند. زکوی و خدادادی، در سال ۲۰۱۷، به بررسی رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده لوله‌های زانویی تحت ممان خمشی خارج از صفحه پرداختند. آن‌ها به شبیه‌سازی عددی مربوط به آزمایش تجربی یاهیوئی و همکارانش^[9] با کد آباکوس پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل عددی روی نمونه‌های فولاد کربنی A106 GRADE B نشان داد که مدل شابوشی همراه با قانون سختی ایزوتروپیک نسبت به مدل آرمسترانگ-فردریک و مدل آرمسترانگ-فردریک همراه با قانون سختی ایزوتروپیک به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. همچنین نرخ کرنش‌های پیش‌رونده در ابتدا زیاد بوده و با افزایش ممان این مقدار ثابت می‌شد که بیانگر پدیده سخت‌شوندگی است. در این تحلیل حداکثر کرنش اصلی در حدود زاویه ۴۵ درجه بین جهات محیطی و محوری بوده و هیچ تجمع کرنشی در جهت محوری مشاهده نشد و برای تمامی نمونه‌ها تجمع کرنش سیکنی به سرعت در حال افزایش در شروع کار می‌باشد^[10].

زکوی و آقایی در سال ۲۰۱۸، به بررسی تأثیر دما و ممان‌های دینامیکی خارج از صفحه در رفتار انباشتگی کرنش لوله‌های زانویی براساس مدل سخت شونده‌گی سینماتیک شابوشی همراه با قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک پرداختند. لوله‌های زانویی مورد نظر تحت فشار و دمای داخلی ثابت و ممان دینامیکی سیکنی خارج از صفحه در فرکانس‌های مشابه با اثرات زلزله بارگذاری شده بودند. نتایج عددی نشان می‌داد تغییر شکل ایجاد شده، عمدتاً ناشی از کرنش‌های خزشی در دماهای بالا و کرنش‌های پیش‌رونده در اثر ممان‌های دینامیکی خارج از صفحه می‌باشد. به طوری که با افزایش ممان دینامیکی، کرنش‌های پیش‌رونده افزایش یافته و با

با افزایش دمای آزمون، تغییر شکل‌های پیش‌رونده در جهت کششی بسیار قابل توجه بوده در حالی که وقتی دما کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد تغییر شکل‌های پیش‌رونده در جهت فشاری نسبتاً غیرحساس و ثابت است. همچنین تأثیر تنش‌های خیلی بالا و خیلی پایین روی تغییر شکل‌های پیش‌رونده بستگی به دمای آزمایش دارد و در دماهای پایین تر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد توجه می‌باشد. چنین تغییر شکل‌های پیش‌رونده خاص آلیاژ منیزیم AZ31B، از مکانیزم‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک ارائه شده در دماهای مختلف سرچشمه می‌گیرد^[4].

کاروان و همکارانش، در سال ۲۰۱۹، به بررسی پاسخ تغییر شکل‌های پیش‌رونده سه ماده Zircaloy-4 و Z2CND18.12N و 63Sn37Pb تحت اثر بارگذاری سیکل‌های تنش نامتقارن با سطوح تنش متفاوت و نرخ‌های مختلف از طریق قانون سخت‌شوندگی سینماتیک-ایزوتروپیک A-V (احمدزاده-وروانی) و O-W (اهنو - وانگ) پرداختند. اساس این قوانین سختی، برپایه خاصیت ویسکوپلاستیک مواد همراه با اثرات نرخ تنش و وابستگی آن به زمان برای توجیه رفتار تغییر شکل‌های پیش‌رونده می‌باشد.

عناصر ویسکوپلاستیک در قوانین سخت‌شوندگی براساس معادلات شابوشی به منظور ارزیابی نرخ تنش در تغییر شکل‌های پیش‌رونده مواد در دمای اتاق انجام شده‌اند. منحنی‌های پیش‌بینی شده تغییر شکل‌های پیش‌رونده و حلقه‌های هیستریزیس براساس مدل‌های A-V و O-W با آن‌هایی که از نظر تجربی به دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده از مدل A-V در ارزیابی منحنی‌های تغییر شکل‌های پیش‌رونده و حلقه‌های هیستریزیس سازگار و در نرخ تنش‌های مختلف نسبت به مدل O-W مطابقت بهتری با داده‌های تجربی داشته‌اند^[5].

جینگ یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹، به بررسی و مطالعه تجربی بر روی کرنش‌های پیش‌رونده و خرابی ناشی از خستگی پلی‌آمید ۶، با انجام یک سری آزمایش خستگی تک محوره با کنترل تنش در دمای اتاق، پرداختند. در همین حال، در سطح نمونه‌ها، افزایش دما ثبت شد تا منعکس کننده خودگرمايشی در طی آزمایش‌های خستگی باشد. نتایج تجربی نشان می‌دهند که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده نسبت به نرخ تنش‌های تعیین شده بسیار حساس می‌باشد. در نتیجه با در نظر گرفتن رابطه بین کرنش‌های پیش‌رونده و افزایش دما، مشخص شد که افزایش میزان تنش باعث تاخیر یا تسریع کرنش پیش‌رونده می‌شود که بستگی به اندازه خودگرمايشی تولید شده در هر مرحله از خستگی دارد و میزان مفید یا مضر بودن آن بر روی مجموع عمر خستگی، با در نظر گرفتن سخت شونده‌گی کرنشی و نرم شونده‌گی خودگرمايشی مشخص می‌شود^[6].

پدیده تغییر شکل‌های پیش‌رونده در صفحه لوله یک مبدل حرارتی از جنس فولاد اصلاح شده 9Cr-1Mo تحت اثر فشار سیکنی و بارگذاری دما، با انتخاب مدل سخت شونده‌گی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک (مدل ترکیبی) توسط تصویری و همکارانش^[7] مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور سه سری آزمایش در دماهای مختلف (دمای اتاق، ۳۰۰ و ۵۲۰ درجه

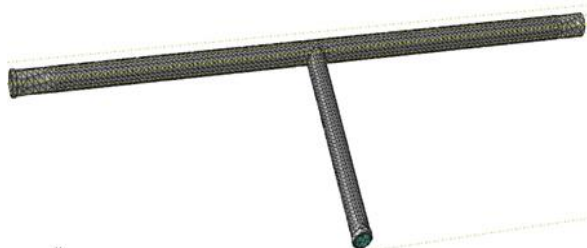
جدول ۲) ابعاد و مشخصات سه راهی های تحت آزمون [12]

ممان های دینامیکی (نیوتن-متر) حداقل	فشار تست (مگاپاسکال)	تعداد تست ها	فرکانس تست (هرتز)	مشخصه لوله سه- راهی
۳۳۰۴	۱۸/۵۸	۲۱	۷/۵	BMS1
۲۴۰۰	۱۳/۸۵	۲۷	۷/۳	BMS2
۲۰۴۸	۱۱/۸۴	۳۱	۷/۱	BMS3

به منظور بدست آوردن کرنش های پیش رونده لوله های سه راهی از مدل سختی شاپوشی [13-15] همراه با قانون سخت شوندرگی ایزوتروپیک استفاده می شود. این مدل ترکیبی طبق مطالعاتی که زکوی و همکارش [16-22] انجام داده اند نتایج نزدیکی با آزمایش تجربی داشته است و به همین سبب در این مطالعه از این مدل ترکیبی استفاده شده و تاثیر دماهای بالا در رفتار انباشتگی کرنش سه راهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت ایجاد ممان خمشی متناوب در انتهای بخش غیراصلی لوله بار تناوبی سینوسی $F=A \sin \omega t$ اعمال می شود. فرکانس اعمال شده با مقدار فرکانس تجربی [12] برابر در نظر گرفته می شود. جهت مدل سازی سه بعدی لوله سه راهی، یک لوله انشعاب دار با قطر خارجی D_o و ضخامت t تحت فشار داخلی و ممان سیکی داخلی صفحه در نرم افزار آباکوس ایجاد که از سه بخش تشکیل شده است که قسمت اصلی در وسط سه راهی و دو قسمت جانبی، لوله های مستقیم هستند.

جهت مدل سازی این سه راهی از ۱۲۴۹۹ تعداد المان از نوع C3D4 (سه وجهی با چهار گره)، استفاده شده است. بعد از اعمال فشار و دما به جهت ایجاد ممان خمشی متناوب در انتهای بخش غیراصلی لوله بار تناوبی سینوسی اعمال می شود. لازم به ذکر است که در این شبیه سازی از جابه جایی و دوران در امتداد محورها به عنوان شرایط مرزی مسئله جلوگیری شده است. مقدار کرنش های پیش رونده براساس مدل سختی سینماتیکی شاپوشی به همراه قانون ایزوتروپیک استخراج شده است. در شکل ۲، یک نمونه طراحی شده مدل سه بعدی لوله سه راهی در نرم افزار آباکوس نشان داده شده است.

برای اعمال درجه حرارت، در نمونه سه راهی قسمت های داخلی لوله های سه راهی تحت دمای داخلی ثابت قرار گرفته است. این ناحیه از لوله تحت دماهای داخلی مورد نظر (۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد) قرار گرفته که این دماها در طول آزمایش ثابت است. تغییرات دمایی می تواند بر روی پارامترهایی از جمله هدایت



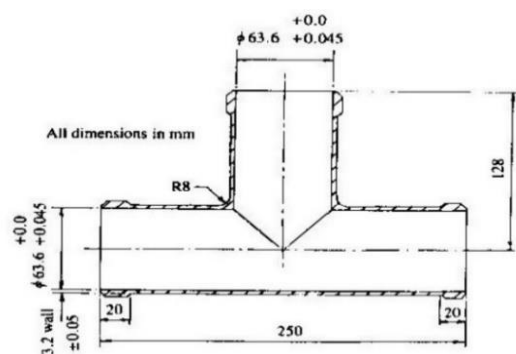
شکل ۲) مدل سه بعدی لوله سه راهی طراحی شده در نرم افزار آباکوس

افزایش دما، کرنش ها افزایش می یابد. نرخ کرنش ها در ابتدا کم بوده که با افزایش دما این نرخ افزایش می یابد که بیانگر پدیده نرم شوندرگی در اثر خزش حرارتی می باشد. حداکثر کرنش اصلی در محل پهلوها مشاهده شد که این امر برای نتایج تجربی بدون در نظر گرفتن اثرات دما نیز صادق می باشد [11].

اهمیت بررسی هم زمان اثرات دما و بارهای مکانیکی و پیش بینی پاسخ صحیح رفتار ماده در برابر بارهای اعمال شده باعث شده تا مطالعه در میزان انباشتگی کرنش لوله های سه راهی مورد توجه محققان قرار گیرد. افزایش کرنش های پیش رونده در دماهای بالا می تواند ناشی از کرنش خزشی به علت بالا رفتن دما و یا کرنش پلاستیکی انباشته به علت پلاستیک سبکی در اثر ممان های دینامیکی باشد که تشخیص مناسب رفتار ماده بسیار مهم می باشد. از این رو در این مطالعه به بررسی تاثیر هم زمان دما و ممان های خمشی در میزان انباشتگی کرنش لوله های سه راهی پرداخته و پیش بینی رفتار ماده در برابر بارهای مکانیکی و بویژه در حضور بارهای حرارتی مورد نظر می باشد. نتایج عددی حاصل با استفاده از مدل سختی سینماتیکی شاپوشی همراه با قانون سخت شوندرگی ایزوتروپیک در دمای اتاق تحت بارهای خارجی با نتایج تجربی [12] موجود مقایسه و به لحاظ پیش بینی مناسب رفتار ماده، انباشتگی کرنش در اثر دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش ها

نمونه استاندارد لوله سه راهی منطبق با استاندارد ASME در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین ابعاد و مشخصات لوله سه راهی و شرایط بارگذاری (فشار تست، فرکانس تست، بازه ی ممان های دینامیکی مورد استفاده در آزمون و تعداد تست های انجام شده) در جدول ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱) نمونه استاندارد لوله سه راهی منطبق با [12] ASME

جدول ۱) جزئیات شرایط بارگذاری [12]

هندسه نمونه ها			
ضخامت لوله (میلی متر)	مختصه Dm/t	قطر خارجی (میلی متر)	نمونه ها
۴/۲۴	۱۶	۷۰	BMS1
۳/۲	۲۰/۹	۷۰	BMS2
۲/۷۵	۲۴	۷۰	BMS3

که با جایگذاری $i=3$ در رابطه (۲) به دست می‌آید. در این روش نمونه‌های مورد آزمون تحت تاثیر بارگذاری‌های سیکلی با کنترل دامنه کرنش متقارن قرار گرفته و تا زمان پایداری سیکل‌ها بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه‌ها ادامه می‌یابد. منظور از پایداری سیکل‌ها هنگامی است که در آن وضعیت منحنی تنش-کرنش تغییرات زیادی در شکل منحنی از یک سیکل به سیکل دیگری اتفاق نیفتد یا به عبارتی منحنی‌های هیستریزیس هنگام بارگذاری و باربرداری بر روی همدیگر منطبق شوند. بازه کرنش بین کرنش الاستیک و نصف کرنش گلوبی به چندین قسمت تقسیم و در هر بازه، آزمون سیکلیک انجام و از روی منحنی‌های پایدار شده مقادیر محدوده تنش $\Delta\sigma$ و مقدار تنش تسلیم k و هم چنین محدوده کرنش پلاستیک $\Delta\varepsilon^p$ برای هر مورد از آزمایش‌ها به دست می‌آید. سپس مقادیر $k - \frac{\Delta\sigma}{2}$ در برابر $\frac{\Delta\varepsilon^p}{2}$ برای آزمون‌های مختلف رسم و با انطباق نقاط بر معادله سختی سینماتیکی (۳) ضرایب ثابت ماده C و γ تعیین می‌گردد:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} - k = \frac{C}{\gamma} \tanh\left(\gamma \frac{\Delta\varepsilon^p}{2}\right) \quad (3)$$

ضرایب ثابت ماده شامل C_1 و γ_1 و C_2 و γ_2 و C_3 و γ_3 برای پنج درجه دمایی ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۴ ارائه شده است.

با استفاده از داده‌های آزمایش نیم سیکل ساده و با استفاده از معادله (۴) ضرایب ثابت ماده m و n تعیین می‌شوند:

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}_p}{m}\right)^n \quad (4)$$

در معادله بالا $\bar{\sigma}$ تنش معادل، σ_y تنش تسلیم اولیه در حالت تک محوره می‌باشد. برای مولفه سخت شونده ایزوتروپیک داریم:

$$R = k + Q(1 - e^{-b\varepsilon_p}) \quad (5)$$

k تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر است. Q ماکزیمم اندازه سطح تسلیم و b نرخ است که اندازه سطح تسلیم و وقتی کرنش پلاستیک اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند.

به وسیله معادله‌های (۳) و (۴) و با استفاده از داده‌های آزمایشی، $\bar{\sigma}$ و \bar{X} برای هر کرنش پلاستیک معادل بدست می‌آید.

که \bar{X} تنش برگشتی معادل است. مولفه سخت شونده ایزوتروپیک σ^0 ، بعنوان تابعی از کرنش پلاستیک بوسیله معادله زیر بیان می‌شود:

$$\sigma^0(\bar{\varepsilon}_p) = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p) - \bar{X}(\bar{\varepsilon}_p) \quad (6)$$

حرارتی، مدول الاستیسته، گرمای ویژه و چگالی ماده تاثیرگذار باشد پس لازم است که به تاثیر دما بر روی پارامترهای فولاد کربنی از نوع A106GRADE B پرداخته شود که جزئیات آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳) تاثیر دما روی پارامترهای فولاد کربنی نوع A106 GRADE B [11]

هدایت حرارتی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kg K)	چگالی (Kg/dm ³)	تنش تسلیم (مگاپاسکال) E	مدول یانگ (مگاپاسکال)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۵۳/۴	۴۶۱	۷۸۵۰	۳۲۸	۲۱۰۰۰	۲۰
۵۳/۲	۴۷۳	۷۸۴۱/۳۹	۳۱۵	۲۰۹۰۰	۵۰
۵۲/۹	۴۹۶	۷۸۲۶/۵	۳۰۰	۲۰۷۰۰	۱۰۰
۵۱/۶	۵۱۴/۵	۷۸۱۲/۵	۲۹۴	۲۰۴۰۰	۱۵۰
۵۰/۳	۵۳۳	۷۷۹۶/۱	۲۸۸	۱۹۹۰۰	۲۰۰

۳- قانون سختی ترکیبی

در نظریه سخت شونده ایزوتروپیک اندازه سطح تسلیم در همه جهات به طور یکنواخت تغییر یافته و مرکز سطح تسلیم ثابت می‌ماند در حالی که در مدل سختی سینماتیک مرکز سطح تسلیم در فضای تنش حرکت کرده و اندازه آن ثابت می‌ماند. از این رو در مدل ترکیبی مولفه سخت شونده سینماتیک غیرخطی، انتقال سطح تسلیم در فضای تنش از طریق تنش برگشتی X را بیان و مولفه ایزوتروپیک تغییر تنش معادل با تعریف اندازه سطح تسلیم R بعنوان تابعی از تغییر شکل پلاستیک را به صورت معادله (۱) بیان می‌کند:

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

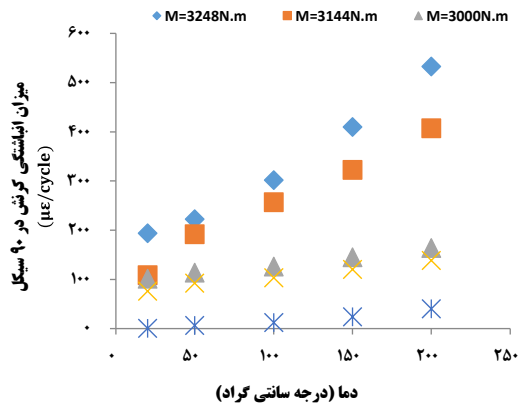
شابوش و همکارانش [13] در سال ۱۹۸۶ مدل سخت شونده سینماتیکی غیرخطی تجزیه شده را به صورت معادله (۲) ارائه دادند:

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

قانون سخت شونده سینماتیک شابوش طبق معادله (۲)، از مجموع چند قانون سخت شونده آرمسترانگ- فردریک حاصل شده است. در مدل یاد شده، جهت منطبق کردن این نقاط از سه منحنی استفاده می‌شود، منحنی اول مربوط به ناحیه بعد از شروع تسلیم با مدول بالا است که با جایگذاری $i=1$ در رابطه (۲) به دست می‌آید. منحنی دوم مربوط به ناحیه مدول ثابت قسمت غیرخطی در کرنش بالاتر است که با جایگذاری $i=2$ در رابطه (۲) به دست می‌آید. منحنی سوم شامل ناحیه ماقبل گلوبی قسمت خطی است

جدول ۴) ضرایب سختی سینماتیکی برای فولاد کربنی ساده در پنج درجه حرارت [11]

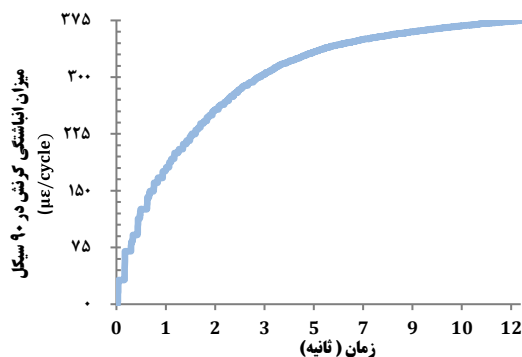
دما (درجه سانتی‌گراد)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	C_1 (مگاپاسکال)	γ_1	C_2 (مگاپاسکال)	γ_2	C_3 (مگاپاسکال)	γ_3
۲۰	۳۲۸	۴۲۷۸/۶۸	۶۴/۱۶	۳۲۵۴/۶	۲۲/۲۵	۱۳۳۶/۸۴	۱/۴۴
۵۰	۳۱۵	۴۱۹۳/۱	۶۲/۱۸	۳۱۸۹/۵	۲۱/۸	۱۳۱۰/۱۰	۱/۴۱
۱۰۰	۳۰۰	۴۰۶۴/۷۴	۶۰/۹۵	۳۰۹۱/۸۷	۲۱/۱۴	۱۲۶۹/۹۹	۱/۳۶۸
۱۵۰	۲۹۴	۳۹۵۷/۷۷	۵۹/۳	۳۰۱۰/۵	۲۰/۵۸	۱۲۳۶/۵۷	۱/۳۳
۲۰۰	۲۸۸	۳۸۵۰/۸	۵۷/۷۴	۲۹۲۹/۱۴	۲۰	۱۲۰۳/۱۵	۱/۲۹۶



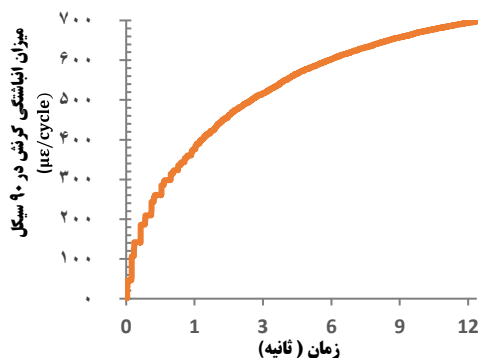
شکل ۵) مشاهده اثرات دما در نتایج عددی بدست آمده از مدل شاپوشی همراه با قانون سختی ایزوتروپیک برای نمونه BMS3 در بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده.

افزایش دما و ممان‌های دینامیکی بر انباشتگی کرنش افزوده می‌شود.

با تحلیل نتایج عددی به دست آمده برای نمونه سه راهی BMS1 در جدول ۶ ملاحظه می‌شود که در ممان دینامیکی ثابت، با افزایش دما از ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر میزان کرنش‌های پیش‌رونده افزوده می‌شود. مطابق شکل‌های ۶ و ۷، در ممان دینامیکی ۴۷۷۶ نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/23$ به ازای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، کرنش پیش‌رونده به اندازه



شکل ۶) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS1 تحت ممان ۴۷۷۶ نیوتن‌متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان



شکل ۷) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS1 تحت ممان ۴۷۷۶ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

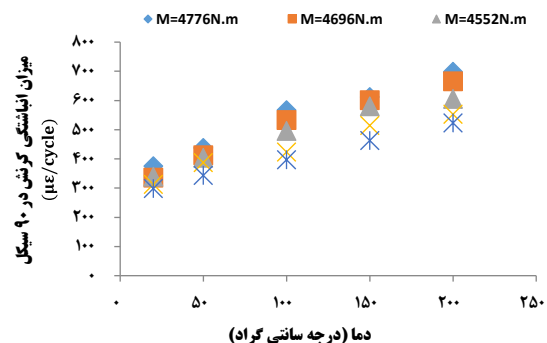
پارامترهای ایزوتروپیک مواد Q و b با جفت‌سازی معادله (۵) با نتایج (۶) و با استفاده از رگرسیون غیرخطی کمترین مربعات برای فولاد کربنی ساده در پنج درجه حرارت در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵) پارامترهای سختی ایزوتروپیک برای فولاد کربنی در پنج درجه حرارت [11]

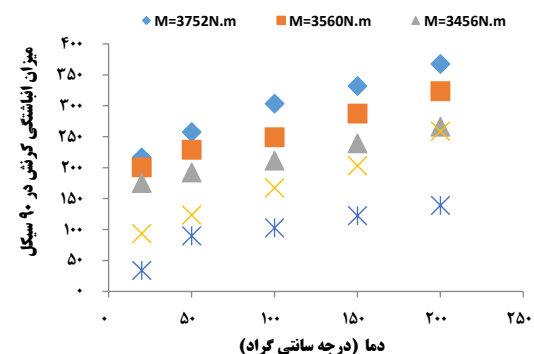
دما (درجه سانتی‌گراد)	Q (مگاپاسکال)	b
۲۰	۱۳۵/۹	۴/۷
۵۰	۱۳۳/۱۸	۴/۶۶
۱۰۰	۱۲۹/۱	۴/۴۶
۱۵۰	۱۲۵/۷	۴/۴
۲۰۰	۱۲۲/۳	۴/۲۳

۴- بحث در نتایج عددی

در این بخش به بررسی پدیده انباشتگی کرنش نمونه لوله سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده با ابعاد، ضخامت، فرکانس، فشارهای داخلی مختلف و هر نمونه با ممان‌های جداگانه تحت تاثیر پنج دمای ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی عددی قرار گرفته‌اند که نتایج به دست آمده از آن برای سه مدل لوله سه‌راهی از جنس فولاد کربنی ساده مطابق جدول‌های ۶ تا ۸ و شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند که نشان می‌دهند که با



شکل ۳) مشاهده اثرات دما در نتایج عددی بدست آمده از مدل شاپوشی همراه با قانون سختی ایزوتروپیک برای نمونه BMS1 در بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده.



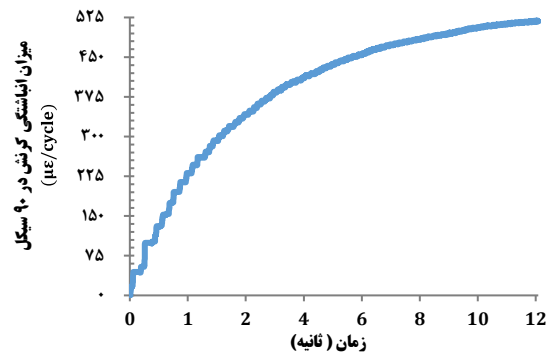
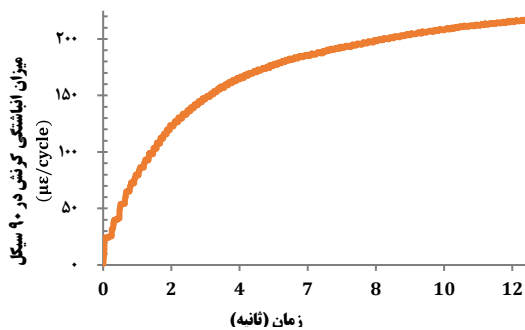
شکل ۴) مشاهده اثرات دما در نتایج عددی بدست آمده از مدل شاپوشی همراه با قانون سختی ایزوتروپیک برای نمونه BMS2 در بررسی رفتار کرنش‌های پیش‌رونده.

دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر افزایش ممان دینامیکی را نشان می‌دهد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده ناشی از دما و ممان دینامیکی بوده که در ابتدا زیاد می‌باشد که با افزایش سیکل‌های بارگذاری، این نرخ به علت پدیده سخت‌شوندگی کرنش کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده ایجاد تغییر شکل‌های پیش‌رونده در اثر ممان‌های دینامیکی است. با تحلیل نتایج عددی به دست آمده برای نمونه سهرای BMS2 در جدول ۷ ملاحظه می‌شود که همانند نمونه قبلی با افزایش دما از ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر میزان کرنش‌های پیش‌رونده افزوده می‌شود.

($\mu\epsilon/cycle$) $375/12$ می‌باشد که این مقدار با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به اندازه ($\mu\epsilon/cycle$) $697/91$ می‌رسد. همچنین با افزایش ممان‌های دینامیکی، مقدار کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش پیدا می‌کند. برای مثال مطابق جدول ۶، در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش ممان دینامیکی از 4360 نیوتن‌متر با مقدار نسبت ممان $M/M_L = 1/12$ تا مقدار 4776 نیوتن‌متر و با مقدار نسبت ممان $M/M_L = 1/23$ ، اندازه کرنش پیش‌رونده از مقدار $298/19$ ($\mu\epsilon/cycle$) تا مقدار $375/12$ ($\mu\epsilon/cycle$) افزایش می‌یابد. این افزایش در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ممان‌های دینامیکی ذکر شده از مقدار ($\mu\epsilon/cycle$) $517/47$ تا مقدار ($\mu\epsilon/cycle$) $697/91$ افزایش می‌یابد که شکل‌های ۷ و ۸ در

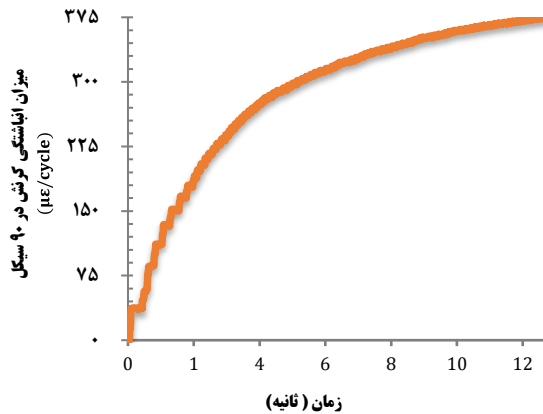
جدول ۶) نتایج حاصل از نمونه‌های تحت آزمون BMS1

ممان دینامیکی (نیوتن‌متر)	M/M_L	تعداد سیکل بارگذاری	کرنش‌های پیش-رونده تجربی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۱۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۱۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)
۲۸۴۸	۱/۲۱	۹۰	۴۸/۲	۰	۵/۹۶	۱۲/۱۳	۲۳/۹۷	۴۱/۰۹
۲۸۹۶	۱/۲۳	۹۰	۷۶/۶۱	۷۶/۰۳	۹۱/۹۲	۱۰۳/۳۱	۱۱۹/۹۲	۱۳۸/۰۱
۳۰۰۰	۱/۲۷	۹۰	۱۱۱/۳۵	۱۰۰/۸۵	۱۱۳/۲۲	۱۲۵/۶۹	۱۴۴/۵۸	۱۶۳/۶۲
۳۱۴۴	۱/۳۳	۹۰	۱۹۷/۹۹	۱۰۸/۳۷	۱۹۱/۳۲	۲۵۶/۷۹	۳۲۲/۴۱	۴۰۶/۸۶
۳۲۴۸	۱/۳۸	۹۰	۲۸۴/۵	۱۹۳/۷۳	۲۲۱/۹۶	۳۰۱/۵۴	۴۰۸/۸۳	۵۳۲/۱۶



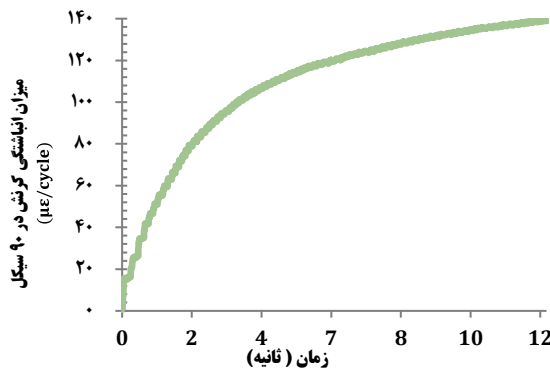
شکل ۹) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS2 تحت ممان ۳۷۵۲ نیوتن‌متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

شکل ۸) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS1 تحت ممان ۳۳۶۰ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان.



شکل ۱۰) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS2 تحت ممان ۳۷۵۲ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

شوندگی کرنش کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده ایجاد تغییر شکل‌های پیش رونده در اثر ممان‌های دینامیکی است. با تحلیل نتایج عددی به دست آمده برای نمونه سهراهی BMS3 در جدول ۸ ملاحظه می‌شود که با افزایش دما از ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر میزان کرنش‌های پیش‌رونده افزوده می‌شود. به عنوان نمونه مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در ممان دینامیکی ثابت $M/M_L = 1/38$ نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/38$ به ازای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کرنش پیش‌رونده به اندازه $193/73 (\mu\epsilon/cycle)$ می‌باشد که این مقدار با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به اندازه $532/16 (\mu\epsilon/cycle)$ می‌رسد. همچنین با افزایش ممان‌های دینامیکی نیز مقدار کرنش‌های پیش‌رونده افزایش پیدا می‌کند. برای مثال مطابق جدول ۸، در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش ممان دینامیکی از ۲۸۴۸



شکل ۱۱) کرنش‌های پیش‌رونده نمونه BMS2 تحت ممان ۳۳۲۰ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

به عنوان نمونه مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، در ممان دینامیکی ثابت 3752 نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/33$ به ازای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کرنش پیش‌رونده به اندازه $216/5 (\mu\epsilon/cycle)$ می‌باشد که این مقدار با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به اندازه $374/77 (\mu\epsilon/cycle)$ می‌رسد. همچنین در دمای ثابت و با افزایش ممان‌های دینامیکی نیز مقدار کرنش‌های پیش‌رونده افزایش پیدا می‌کند.

برای مثال مطابق جدول ۷، در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش ممان دینامیکی از 3320 نیوتن‌متر با نسبت ممان $1/17$ تا $M/M_L = 1/33$ مقدار 3702 نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/33$ انداره کرنش پیش‌رونده از مقدار $34/76 (\mu\epsilon/cycle)$ تا مقدار $216/5 (\mu\epsilon/cycle)$ افزایش می‌یابد که این افزایش در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ممان‌های دینامیکی ذکر شده از مقدار $139 (\mu\epsilon/cycle)$ تا مقدار $374/77 (\mu\epsilon/cycle)$ افزایش می‌یابد که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر افزایش ممان دینامیکی را در نمونه سهراهی BMS2 نشان می‌دهد.

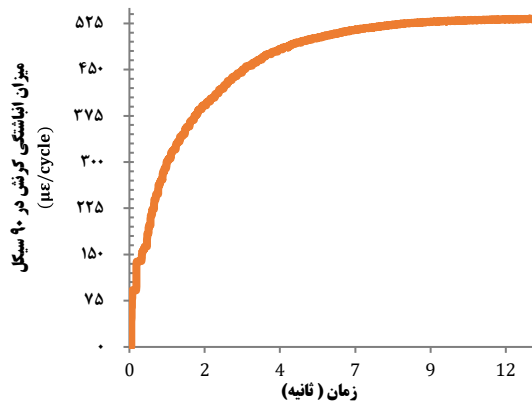
در مقایسه با مدل BMS1 در این مدل میزان افزایش کرنش پیش‌رونده کمتر به نظر می‌رسد، همچنین در ممان‌های دینامیکی پایین‌تر نسبت به ممان‌های بالا و با افزایش اندازه دما، تغییرات کرنش پیش‌رونده نسبتاً بیشتر مشاهده می‌شود که نشانگر اثر خزش حرارتی و احتمال پدیده نرم‌شوندگی است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده ناشی از دما و ممان دینامیکی بوده که در ابتدا زیاد بوده و با افزایش سیکل‌های بارگذاری، این نرخ به علت غالب بودن پدیده سخت

جدول ۷) نتایج حاصل از نمونه‌های تحت آزمون BMS2

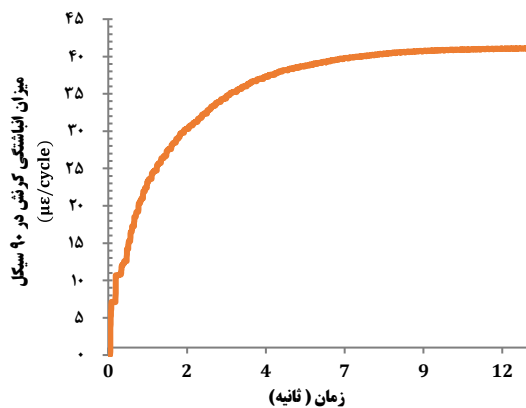
ممان دینامیکی (نیوتن-متر)	M/M_L	تعداد سیکل بارگذاری	کرنش‌های پیش-رونده تجربی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۱۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش‌رونده عددی در دمای ۱۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)
۴۳۶۰	۱/۱۲	۹۰	۶۳/۷	۲۹۸/۱۹	۳۴۲/۸۷	۳۹۶/۷۲	۴۶۲/۱۲	۵۱۷/۴۷
۴۴۲۴	۱/۱۴	۹۰	۱۲۳/۹۶	۳۱۲/۲۶	۳۸۷/۱۴	۴۲۲/۶۵	۵۱۴/۵۶	۵۵۲/۶۴
۴۵۵۲	۱/۱۷	۹۰	۱۶۱/۸۳	۳۳۸/۷۷	۴۰۳/۳۱	۴۹۵/۳۷	۵۷۹/۸۲	۶۰۵/۴۴
۴۶۹۶	۱/۲۰	۹۰	۲۰۴/۸۷	۳۳۵/۷۲	۴۱۲/۶۵	۵۳۲/۷۲	۶۰۱/۱۲	۶۶۵/۶۳
۴۷۷۶	۱/۲۳	۹۰	۲۹۳/۹۷	۳۷۵/۱۲	۴۳۷/۶۵	۵۶۶/۷۲	۶۱۱/۲۴	۶۹۷/۹۱

جدول ۸) نتایج حاصل از نمونه‌های تحت آزمون BMS3

ممان دینامیکی (نیوتن-متر)	M/M_L	تعداد سیکل بارگذاری	کرنش‌های پیش-رونده تجربی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۱۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۱۵۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)	کرنش‌های پیش-رونده عددی در دمای ۲۰۰ °C ($\mu\epsilon/cycle$)
۳۳۲۰	۱/۱۷	۹۰	۳۵/۷۲	۳۴	۸۹/۱۹	۱۰۳/۵۸	۱۲۲/۵۶	۱۳۹
۳۴۱۶	۱/۲۱	۹۰	۸۲/۶۳	۹۳/۳۱	۱۲۳/۴۲	۱۶۷/۲۲	۲۰۲/۹۶	۲۵۹/۰۵
۳۴۵۶	۱/۲۳	۹۰	۱۰۸/۸۹	۱۷۵/۱۲	۱۹۲/۳۲	۲۱۱/۲۳	۲۳۹/۳۱	۲۶۷/۸۳
۳۵۶۰	۱/۲۶	۹۰	۱۷۵/۱۷	۲۰۰/۲۴	۲۲۸/۸۱	۲۴۹/۰۱	۲۸۷/۴۹	۳۲۳/۲۴
۳۷۵۲	۱/۳۳	۹۰	۲۹۸/۷	۲۱۶/۵	۲۵۷/۳۹	۳۰۳/۳۱	۳۳۱/۸۲	۳۷۴/۷۷



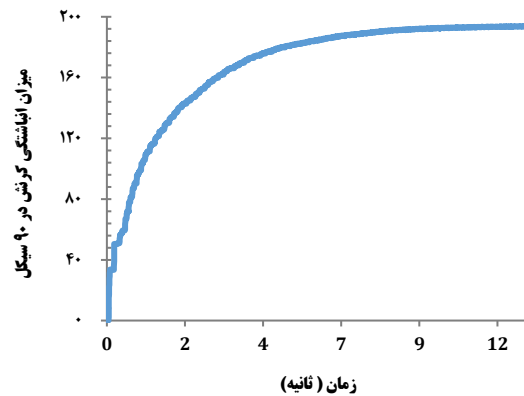
شکل ۱۳) نمونه ای از تجمع کرنش در نمونه BMS3 تحت ممان ۳۲۴۸ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان



شکل ۱۴) نمونه ای از تجمع کرنش در نمونه BMS3 تحت ممان ۲۸۴۸ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

ممان‌های خمشی در میزان رفتار انباشتگی کرنشی لوله سهرای از جنس فولاد کربنی ساده پرداخته شد. لوله‌های سهرای تحت فشار و دمای داخلی ثابت همراه با ممان دینامیکی داخل صفحه، متاثر از پنج دمای ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند که برای شبیه‌سازی لوله سهرای مورد نظر از نرم‌افزار آباکوس (به روش المان محدود) استفاده شده است. نتایج عددی به دست آمده از تحلیل انجام گرفته بر روی نمونه‌ها نشانگر این است که حداکثر مقدار انباشتگی کرنشی در نزدیکی محل اتصال سهرای در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. کرنش‌های پیش‌رونده به وجود آمده، اکثراً ناشی از ممان‌های دینامیکی و دماهای بالا می‌باشد.

نتایج عددی به دست آمده نشان می‌دهد که در هر سه نمونه موجود، میزان کرنش‌های پیش‌رونده با افزایش اندازه ممان دینامیکی و دما، افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت قطر به ضخامت در لوله‌های سهرای، شروع کرنش‌های پیش‌رونده محیطی در نسبت‌های ممان کم اتفاق می‌افتد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده در ابتدا زیاد بوده و با افزایش سیکل‌های بارگذاری، این نرخ به علت غالب بودن



شکل ۱۵) نمونه ای از تجمع کرنش در نمونه BMS3 تحت ممان ۳۲۴۸ نیوتن‌متر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب زمان

نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/21$ تا مقدار ۳۲۴۸ نیوتن‌متر با نسبت ممان $M/M_L = 1/38$ اندازه کرنش پیش‌رونده از مقدار صفر تا مقدار $193/73$ ($\mu\epsilon/cycle$) افزایش می‌یابد. این افزایش در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ممان‌های دینامیکی ذکر شده از مقدار $41/9$ ($\mu\epsilon/cycle$) تا $532/16$ ($\mu\epsilon/cycle$) افزایش می‌یابد که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر افزایش ممان دینامیکی را در نمونه BMS3 نشان می‌دهد.

در حالت کلی برای نمونه BMS3 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار دما در ممان‌های دینامیکی موجود، بر میزان کرنش پیش‌رونده افزوده می‌شود. همچنین میزان کرنش پیش‌رونده در ممان‌های دینامیکی بالا ۳۲۴۸ نیوتن‌متر و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که این روند صعودی در ممان‌های دینامیکی پایین ۲۸۴۸ نیوتن‌متر دیده نمی‌شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش‌های پیش‌رونده ناشی از دما و ممان دینامیکی بوده که در ابتدا زیاد بوده و با افزایش سیکل‌های بارگذاری، این نرخ به علت غالب بودن پدیده سخت‌شوندگی کرنش کاهش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده ایجاد تغییر شکل‌های پیش‌رونده در اثر ممان‌های دینامیکی است.

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار کرنش پیش‌رونده در نزدیکی محل اتصال سهرای در جهت محیطی اتفاق می‌افتد. هر چه مقدار ضخامت لوله‌ها بیشتر باشد مقدار گشتاور لازم برای شروع تغییر شکل‌های پیش‌رونده نیز افزایش خواهد یافت. بعبارتی با افزایش نسبت قطر به ضخامت در لوله‌های سهرای، شروع کرنش‌های پیش‌رونده محیطی در نسبت ممان‌های کم اتفاق می‌افتد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از مدل سختی سینماتیکی شایوشی به همراه قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک به بررسی تاثیر دما و

محدوده کرنش پلاستیک $\Delta \epsilon^{pl}$
 ثابت‌های سخت‌شوندگی مواد در مدل سینماتیک $\gamma_{1,2,3}$

منابع

1- Kaae JL. High-temperature low-cycle fatigue of Alloy 800H. International Journal of Fatigue. 2009 Feb; 31(2):332-40.
 2- Zhu J, Chen X, Xue F, Yu W. Bending ratcheting tests of Z2CND18. 12 stainless steel. International Journal of Fatigue. 2012 Feb 1;35(1):16-22.
 3- Kreethi R, Mondal AK, Dutta K. Ratcheting fatigue behaviour of 42CrMo4 steel under different heat treatment conditions. Materials Science and Engineering: A. 2017 Jan; 679:66-74.
 4- Li H, Kang G, Yu C, Liu Y. Experimental investigation on temperature-dependent uniaxial ratcheting of AZ31B magnesium alloy. International Journal of Fatigue. 2019 Mar; 120:33-45.
 5- Karvan P, Varvani-Farahani A. Ratcheting assessment of visco-plastic alloys at ambient temperature by means of the AV and OW hardening rule frameworks. Mechanics of Materials. 2019 Mar; 130:95-104.
 6- Yang J, Kang G, Chen K, Kan Q, Liu Y. Experimental study on rate-dependent uniaxial whole-life ratcheting and fatigue behavior of polyamide 6. International Journal of Fatigue. 2020 Mar; 132:105402.
 7- Tasavori M, Zehsaz M, Tahami FV. Ratcheting assessment in the tubesheets of heat exchangers using the nonlinear isotropic/kinematic hardening model. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2020 Jun;183:104103.
 8- Mishra P, Srinivas NS, Singh V. Ratcheting fatigue of modified 9Cr-1Mo steel and Inconel alloy 617 at ambient temperature: Effect of uniform plastic strain. Materials Letters. 2022 May; 314:131916.
 9- Yahiaoui K, Moreton DN, Moffat DG. Response and cyclic strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic out-of-plane bending. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1996 Mar; 31(2):153-66.
 10- Zakavi S J, 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.
 11- Zakavi SJ, Aghaei Y. The ratcheting behavior of carbon steel piping elbows under cyclic bending moment and temperature. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 Aug; 42(8):1-9.
 12- 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 Jul; 28(3):197-207.
 13- Chaboche JL. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. International Journal of plasticity. 1986 Jan; 2(2):149-88.

پدیده سخت‌شوندگی کرنش کاهش پیدا می‌کند. افزایش کرنش‌های پیش‌رونده در دماهای بالا شامل کرنش خزشی به علت بالا رفتن دما و عمدتاً کرنش پلاستیکی انباشته به علت پلاستیک سبکی در اثر ممان‌های دینامیکی می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در این نوع از اتصالات مورد استفاده در تأسیسات، با افزایش دما و ممان دینامیکی میزان کرنش‌های پیش‌رونده نیز افزایش می‌یابد که در صورت بروز، می‌تواند موجب وارد شدن صدمات و آسیب‌های جدی و جبران‌ناپذیری به قطعات و سازه‌های تأسیساتی شود.

تشکر و قدردانی: از همکاری مجموعه ارکان گروه مهندسی مکانیک دانشگاه محقق اردبیلی که در انجام این امر همکاری لازم را بعمل آوردند تقدیر و تشکر می‌گردد.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است

۶- فهرست علائم

D_i	قطر داخلی (mm)
D_o	قطر خارجی (mm)
D_m	قطر متوسط نمونه‌ها (mm)
f	فرکانس تست (s^{-1})
M	ممان دینامیکی (N.m)
M_L	حد ممان خمشی (N.m)
E	مدول یانگ
P	فشار تست ($Kgm^{-1}s^{-2}$)
S_m	تنش مجاز طراحی
S_u	استحکام نهایی
S_y	استحکام تسلیم
t	ضخامت
X	تانسور تنش برگشتی
p	کرنش پلاستیک انباشته شده
b	ثابت‌های سخت‌شوندگی مواد
Q	ثابت‌های سخت‌شوندگی مواد
$c_{1,2,3}$	ثابت‌های سخت‌شوندگی مواد در مدل سینماتیک

علائم یونانی

$\Delta \sigma$	محدوده تنش
$d \epsilon^{pl}$	تانسور نرخ کرنش پلاستیک
$d \bar{\epsilon}^p$	نرخ کرنش پلاستیک موثر
ν	نسبت پواسون
σ_y	تنش تسلیم اولیه
σ_e	تنش الاستیک

- 14- Chaboche JL. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects. *International journal of plasticity*. 1991 Jan; 7(7):661-78 .
- 15- Lemaitre J, Chaboche JL. *Mechanics of solid materials*. Cambridge university press; 1994 Aug.
- 16- M. Mardomi Bashir, S. J. Zakavi, Evaluatin of the ratcheting behaviour of carbon Steel pressurized piping elbows by chaboche cyclic plasticity model, 25 th Annual international conference on mechanical engineering, 2017 .
- 17- Zakavi SJ, Shiralivand B, Nourbakhsh M. Evaluation of combined hardening model in ratcheting behavior of pressurized piping elbows subjected to in-plane moments. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*. 2017 Aug; 7(1):57-71.
- 18- Zakavi SJ, Zehsaz M, Eslami MR. The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model. *Nuclear Engineering and Design*. 2010 Apr; 240(4):726-37.
- 19- Zakavi SJ, Nourbakhsh M. The effect of Basic factors on strain accumulation of pressurized piping elbows under dynamic moments. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Jul; 15(5):412-8.
- 20- Zakavi SJ, 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 Sep; 19(9):2193-201.
- 21- 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 Apr; 18(2):201-8.
- 22- Zakavi S J, Rahimi A., The Effect of Dynamic Loading on the Ratcheting Behavior of Pressurized Piping Branch. *Tabriz Un. J. of Mecanical Eng*. 2015., 45(3) :63-68.