



مطالعه مدل های سخت‌شوندگی در فرآیند هیدروفرمینگ پالسی قطعه T شکل

امیر اشرفی¹، خلیل خلیلی^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

*بیرجند، صندوق پستی 615/97175، kkhaliili@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1393

پذیرش: 26 بهمن 1393

ارائه در سایت: 18 اسفند 1393

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ پالسی

روش اجزاء محدود

سخت‌شوندگی همسانگرد

سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک

غیرخطی

در فرآیند هیدروفرمینگ منحنی فشار داخلی برحسب جابجایی محوری مسیر بارگذاری نامیده می‌شود، که کلید رسیدن به یک قطعه مطلوب است. شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ برای بررسی تأثیر منحنی بارگذاری بر روی خصوصیات قطعه نهایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق شبیه‌سازی اجزاء محدود هیدروفرمینگ پالسی به‌وسیله دو مدل سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی که اثر پوشینگر را نیز در نظر می‌گیرد، انجام گرفت. پارامترهای هر دو مدل سخت‌شوندگی از داده‌های آزمون کشش به دست آمد. نتایج دو شبیه‌سازی با نتایج آزمایش هیدروفرمینگ مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی مشخصات قطعه نهایی را بهتر پیش‌بینی نموده است. تفاوت‌های بین دو شبیه‌سازی از این واقعیت نتیجه شد که در ابتدای فرآیند هیدروفرمینگ، به علت حرکت سنبه محوری تنش فشاری در طول لوله وجود داشت و در ادامه با افزایش فشار داخلی، تنش کششی بر تنش فشاری غالب شد و جهت تنش برعکس گردید و اثر پوشینگر بر نتایج تأثیر گذاشت. برای مطالعه تأثیر فشار پالسی بر خصوصیات ماده لوله، آزمون بالچ سه مرحله‌ای با باربرداری در هر مرحله انجام شد و نتایج با آزمون بالچ یک مرحله‌ای مقایسه گردید. بارگذاری و باربرداری فشار داخلی باعث افزایش ارتفاع برآمدگی برای یک سطح از فشار نهایی در مقایسه با بارگذاری یک مرحله‌ای تا همان سطح از فشار شد. شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ پالسی و هیدروفرمینگ خطی باهم مقایسه شد و ارتفاع برآمدگی و ضخامت‌های به‌دست‌آمده افزایش شکل‌پذیری ماده لوله را در هیدروفرمینگ پالسی با در نظر گرفتن میانگین فشار بکار رفته نشان داد.

Study of the hardening models in T-shape pulsating hydroforming process

Khalil Khalili*, Amir Ashrafi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

*P.O.B. 615/97175 Birjand, kkhaliili@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 December 2014
Accepted 15 February 2015
Available Online 09 March 2015

Keywords:
Pulsating Hydroforming
Finite Element Method
Isotropic Hardening
Mixed Isotropic-Nonlinear Kinematic
Hardening

ABSTRACT

In hydroforming process, the curve of internal pressure versus axial feeding is called loading path, which is the key to producing a desired product. Finite element simulation of tube hydroforming can be used to study the loading path effect on the final part characteristics. In this research the finite element simulation of pulsating hydroforming process has been done in conjugation with two different work hardening models: an isotropic hardening and a mixed isotropic-nonlinear kinematic hardening model, which is able to describe the Bauschinger effect. The parameters of both hardening models have been obtained from tensile test data. The results of both finite element simulations were compared to experimental work. The results show that the mixed hardening model obtains better prediction of final product characteristics than isotropic hardening. The differences between the results of two hardening models are from the fact that in a hydroforming process the tensile and compression loads are used and the loads reversal may occur. To study the effect of pulsating pressure on tube material characteristic, a three-step bulge test with unloading has been done and the results have been compared to monotonic bulge test. Loading and unloading of internal pressure cause a higher bulge height for a final pressure level compared to monotonic bulge height. The finite element simulation of pulsating hydroforming has been compared to linear hydroforming. The reported bulge heights and thicknesses show an improvement in formability of tubular material in pulsating hydroforming by considering the average pressure level that was applied.

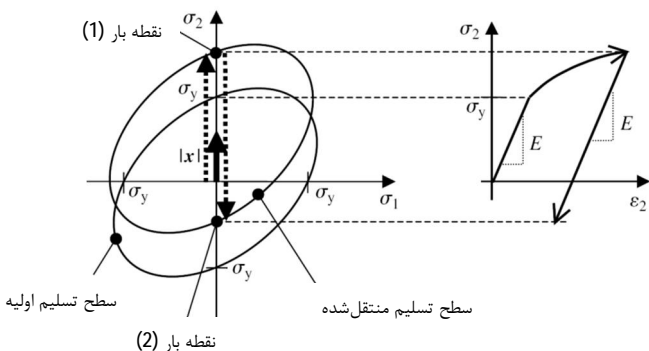
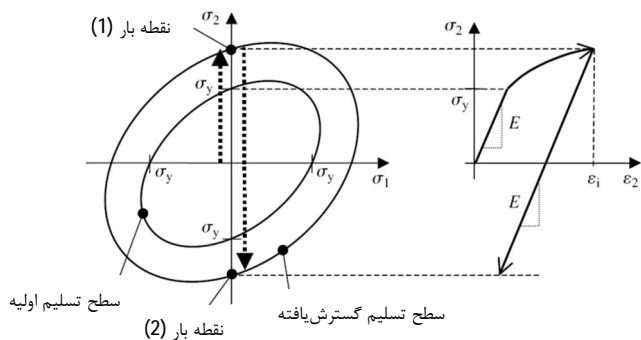
1- مقدمه

خصوصیات این فرآیند در مقایسه با روش‌های سنتی مانند ریختگری هستند [1]. در فرآیند هیدروفرمینگ، منحنی فشار داخلی لوله برحسب جابجایی سنبه محوری مسیر بارگذاری نامیده می‌شود. مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ کلید جلوگیری از عیوب احتمالی در حین فرآیند است.

در فرآیند هیدروفرمینگ، لوله اولیه با اعمال همزمان فشار هیدرولیکی به سطح داخلی و نیروی‌های محوری به دو انتهای آن به شکل قالب موردنظر تغییر شکل پیدا می‌کند. کاهش وزن و یکپارچگی قطعات از مهم‌ترین

شبیه‌سازی اجزاء محدود¹ فرآیند هیدروفرمینگ می‌تواند در پیش‌بینی شکل‌پذیری لوله بکار رود. برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ، داده‌های دقیق ماده لوله از قبیل منحنی تنش سیلان² ماده، ضخامت، قطر و ناهمسانگردی و همچنین پارامترهای فرآیندی از قبیل فشار داخلی، جابجایی محوری و اصطکاک موردنیاز است [2]. تحقیقات فراوانی برای ارزیابی تأثیر فشار داخلی و جابجایی سنبه محوری بر روی کیفیت قطعه تولیدی از نقطه‌نظر یکنواختی ضخامت و ارتفاع برآمدگی انجام گرفته است. ری و مک‌دونالد شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعات T و X شکل را به‌وسیله روش اجزاء محدود و با شرایط مرزی و بارگذاری مشابه با آزمایش‌ها انجام دادند [3]. لین و کوان ضمن شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل، نحوه‌ی تأثیر پارامترهای شعاع گوشه قالب و فشار داخلی را در این فرآیند بررسی کردند [4]. همچنین از ترکیب روش اجزاء محدود با طراحی آزمایش‌ها و یا منطق فازی برای بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ قطعه T شکل استفاده شده است [5-8]. یکی از زمینه‌های جدید در فرآیند هیدروفرمینگ استفاده از نوسان فشار داخلی در حین فرآیند است. موری و همکارانش با استفاده از آزمایش تجربی و روش اجزاء محدود بهبود شکل‌پذیری لوله در منطقه بالچ آزاد را در فرآیند هیدروفرمینگ نوسانی ارزیابی نمودند [9,10]. هاما و همکارانش تأثیر فشار نوسانی را بر روی یک قطعه خودرو با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کردند. آن‌ها ادعا کردند که با استفاده از فشار نوسانی ضریب اصطکاک کاهش یافت و گوشه‌های قالب نیز بهتر پر شد [11]. لوح‌موسوی و همکارانش با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود، تأثیر اصطکاک و دامنه و بسامد نوسان را بر روی رفتار نازک شدگی لوله ارزیابی نمودند و مکانیسم بهبود شکل‌پذیری را در حین فرآیند هیدروفرمینگ نوسانی قطعه T شکل بررسی کردند [12].

کدخدایان و عرفانی‌مقدم با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی اجزاء محدود، پارامترهای مسیرهای بارگذاری نوسانی را در فرآیند هیدروفرمینگ T شکل مورد مطالعه قرار دادند و به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم تبرید تدریجی³ مسیرهای بارگذاری بهینه را به دست آوردند [13]. ژو و همکارانش هیدروفرمینگ پالسی با دامنه‌ی بزرگ را در بهبود شکل‌پذیری قطعه شاسی خودرو با توزیع ضخامت یکنواخت به‌طوری‌که گوشه‌های قالب نیز پر شده است، مؤثر دانستند [14]. لوح‌موسوی و همکارانش فرآیند هیدروفرمینگ لوله با اعمال فشار نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل را با روش‌های اجزاء محدود و تجربی مورد بررسی قرار دادند و مسیر بارگذاری نوسانی جدیدی را پیشنهاد کردند که به کمک آن درصد پرشدگی گوشه قالب افزایش یافت [15]. یانگ و همکارانش فشار پالسی را در شکل‌دهی قطعه‌ای که در ساخت آن به‌جای حرکت سنبه محوری از نیروی فشاری شعاعی استفاده می‌شود، بررسی کردند. آن‌ها بهبود شکل‌پذیری در این فرآیند را به تغییرات در ریزساختار ماده لوله فولاد زنگ نزن مربوط دانستند [16]. در این تحقیق تحلیل اجزاء محدود فرآیند هیدروفرمینگ پالسی برای قطعه سه‌راهی T شکل از جنس مس مورد بررسی قرار گرفت. یکی از پارامترهای مهم موردنیاز برای تحلیل اجزاء محدود فرآیند هیدروفرمینگ، خواص مکانیکی ماده لوله مورد نظر است. اصولاً برای بررسی رفتار مکانیکی ماده دو نوع سخت‌شوندگی همسانگرد⁴ و سخت‌شوندگی



5- Kinematic Hardening
6- Dynamic Recovery
7- Dislocations

1- Finite Element Simulation
2- Flow Stress Curve
3- Simulated Annealing Algorithm
4- Isotropic Hardening

تأمین قدرت برای حرکت محوری سنبه‌ها و فشار داخلی لوله به‌طور جداگانه استفاده شد. از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی⁵ برای کنترل فشار هیدرولیکی استفاده گردید. سیستم داده‌گیری شامل حسگر فشار و حسگر موقعیت خطی بود، که برای اندازه‌گیری برخط⁶ فشار داخل لوله و همچنین موقعیت سنبه محوری به کار رفت. داده‌های خروجی حسگرها برای کنترل دقیق مدار بسته مجدداً به کنترل‌کننده منتقل شدند و نهایتاً در یک رایانه ذخیره گردیدند. سیستم طراحی‌شده قابلیت کنترل منحنی مسیر بارگذاری به صورت‌های خطی و پالسی را دارا بود.

3- ماده لوله

لوله‌های بدون درز مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس آلیاژ مس مورداستفاده در تهیه مطبوع⁷ با قطر خارجی 28/56 میلی‌متر، ضخامت دیواره 1/27 میلی‌متر و طول 150 میلی‌متر بودند. لوله‌ها پس از برش و آماده‌سازی، در دمای 550 درجه سانتی‌گراد به مدت 90 دقیقه تحت عملیات آنیل کردن قرار گرفتند و سپس در کوره سرد شدند. برای به دست آوردن خواص مکانیکی ماده لوله، از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد انجمن مواد و آزمایش آمریکا⁸ توسط دستگاه سیم برش⁹ از درون لوله تهیه شدند و برای یکنواختی خواص مشابه نمونه‌های لوله‌ای مورداستفاده در فرآیند هیدروفرمینگ آنیل شدند. نمونه‌ها سپس توسط دستگاه کشش¹⁰ تحت آزمون کشش قرار گرفتند و اصلاح ناهمسانگردی نیز بر روی داده‌های به‌دست‌آمده انجام شد. به‌این‌ترتیب که نمونه‌هایی از درون لوله در دو راستای طولی لوله و 90 درجه نسبت به راستای طولی (استای محیطی) تهیه شدند. ضرایب ناهمسانگردی در کرنش 20% برای نمونه‌های در دو راستا (به ترتیب $R_{90} = 0/628$ و $R_0 = 0/648$) به دست آمدند [21]. سپس داده‌های آزمون کشش برای نمونه‌ی در راستای طولی لوله به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شدند و از روابط (1) و (2) ارائه‌شده توسط هوآنگ و همکارانش [22]، مقادیر تنش و کرنش مربوطه اصلاح شدند.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left[\frac{(1 + 1/R_0)}{(1/R_{90}) + 1 + (1/R_0)} \right]^{1/2}} \sigma_2 \quad (1)$$

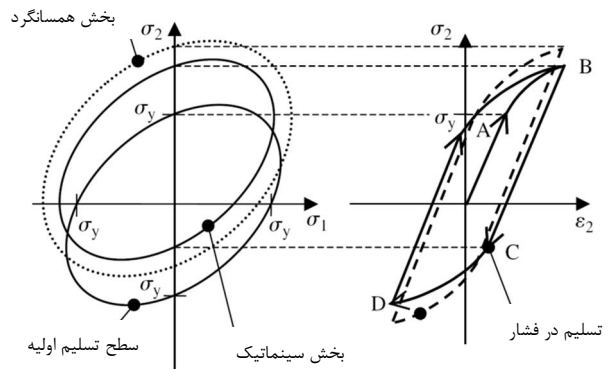
$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{(1/R_{90}) + 1 + (1/R_0)}{1 + (1/R_0)} \right)^{1/2}} \varepsilon_2 \quad (2)$$

که در این روابط $\bar{\sigma}$ و $\bar{\varepsilon}$ تنش مؤثر و کرنش مؤثر، σ_2 و ε_2 تنش و کرنش در نمونه‌های کشش در راستای طولی لوله و R_0 و R_{90} ضرایب ناهمسانگردی در دو راستای طولی و عمود بر راستای طولی لوله می‌باشند. در شکل 4 منحنی آزمون کشش و منحنی اصلاح‌شده نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش با نتایج آزمون بالچ برای این لوله مشابهت داشته است [21].

3-1- سخت‌شوندگی همسانگرد

در سخت‌شوندگی همسانگرد معمولاً از معادله توانی سوئیفت¹¹ به‌صورت رابطه (3) برای نشان دادن تغییرات تنش مؤثر برحسب کرنش مؤثر استفاده می‌شود [23]:

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^n \quad (3)$$



شکل 3 سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد- سینماتیک [17]

چگالی نابجایی‌ها بالا می‌رود و به تدریج صعود¹ و لغزش متقاطع² که مکانیسم‌های بازیابی هستند، اتفاق می‌افتند. در یک کرنش مشخص نرخ کارسختی و بازیابی به یک مقدار تعادلی می‌رسد و چگالی نابجایی‌ها ثابت می‌ماند. بنابراین بخش سینماتیک منحنی تنش-کرنش به یک مقدار اشباع می‌رسد. میزان صعود و لغزش متقاطع، وابستگی مستقیم به انرژی نقص در چیده شدن³ در ساختار ماده دارند. انرژی نقص در چیده شدن در فلزات با ساختار مکعب وجوه مرکز پر⁴ دیده می‌شود و برای مس برابر 78 mJm^{-2} است که مقداری متوسط است [18]. بنابراین در این تحقیق بخشی از سخت‌شوندگی لوله مسی در فرآیند هیدروفرمینگ از نوع سخت‌شوندگی سینماتیک به حساب آورده شد.

مدل‌های سخت‌شوندگی در برخی فرآیندهای شکل‌دهی مورد مطالعه قرار گرفته است. پناهی‌زاده رحیملو و همکارانش اثر دو مدل سخت‌شوندگی همسانگرد و سینماتیک را بر روی میزان برگشت فنری کانال U شکل متقارن بررسی کردند [19]. در فرآیند هیدروفرمینگ شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اساس مدل سخت‌شوندگی همسانگرد بوده است. در این تحقیق مدل سخت‌شوندگی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی در شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند هیدروفرمینگ استفاده شد و نتایج با شبیه‌سازی به کمک مدل سخت‌شوندگی همسانگرد مقایسه گشت.

2- مواد و تجهیزات آزمایش هیدروفرمینگ

یک ماشین هیدروفرمینگ از بخش‌های اصلی شامل موارد زیر ساخته می‌شود [20]:

- پرس و وسایل بستن قالب
- ابزارها
- سیستم فشار و تشدیدکننده
- سیلندرهای هیدرولیکی و سنبه‌ها برای آب‌بندی لوله و تغذیه ماده
- سیستم کنترل فرآیند، کامپیوتر و سیستم داده‌گیری و وسایل اندازه‌گیری فشار و موقعیت خطی

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها بخش‌های اصلی ماشین هیدروفرمینگ ساخته و مونتاژ شدند. از یک پرس 600 کیلو نیوتنی برای بستن قالب استفاده شد. قالب هیدروفرمینگ شامل یک حفره T شکل با قطر برابر با قطر لوله بود. از یک واحد تولید فشار هیدرولیکی با دو عدد پمپ برای

5- Proportional-Integral-Derivative Controller (PID Controller)
6- Online Measurement
7- C12200 Copper Alloy-ASTM B280-97
8- ASTM E8
9- Wire Cutting Machine
10- Zwick Tensile Testing Machine
11- Swift Power Law Relation

1- Climb
2- Cross Slip
3- Stacking Fault Energy
4- Face Centered Cubic (FCC)

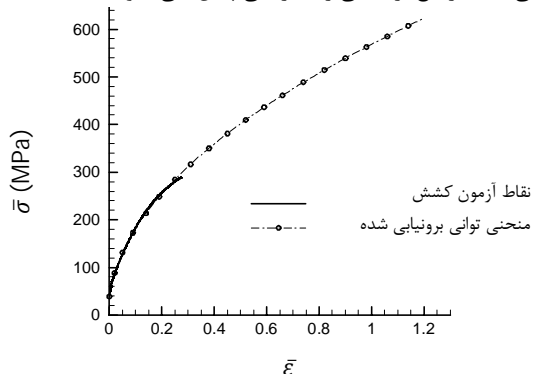
نرخ رسیدن به این مقدار را تعیین می‌کند. مقدار α در رابطه (5) با استفاده از مدل سخت‌شوندگی شابوشه به صورت رابطه (7) است [27]:

$$\alpha = \frac{c}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \epsilon_p}) \quad (7)$$

که در این رابطه c و γ نیز ثابت‌های ماده هستند. مقدار c/γ حد اشباع جابجایی مرکز سطح تسلیم را نشان می‌دهد و پارامتر γ نیز نرخ رسیدن به این حد اشباع را مشخص می‌کند. با قرار دادن روابط (6) و (7) در رابطه (5)، رابطه (8) برای سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی به دست می‌آید [28]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + Q(1 - e^{-b\epsilon_p}) + \frac{c}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \epsilon_p}) \quad (8)$$

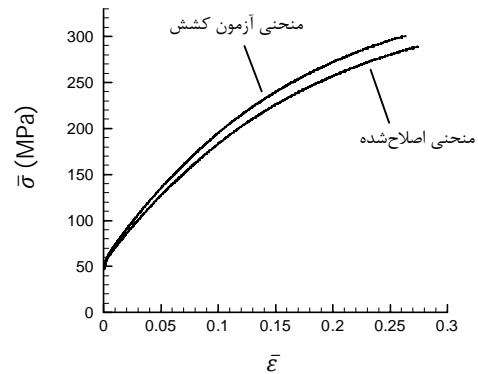
برای استفاده از سخت‌شوندگی ترکیبی باید مقادیر پارامترهای c ، b ، Q و γ تعیین شوند. با توجه به اینکه در سخت‌شوندگی ترکیبی تسلیم ماده تابعی از اندازه سطح تسلیم و موقعیت مرکز سطح تسلیم است، ترکیب این دو عامل حالت‌های مختلفی را به وجود می‌آورد. در نتیجه به دست آوردن مقادیر پارامترهای رابطه (8) به سادگی سخت‌شوندگی همسانگرد نیست. برای به دست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی سینماتیک و یا ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی، نیاز به آزمایش‌های کشش-فشار سیکی است. داده‌های آزمون سیکی به کمک روش‌های شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن پارامترهای موردنظر بکار برده شدند [29,24]. همچنین از داده‌های آزمون تورفتگی کروی⁶ برای به دست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی سینماتیک و سخت‌شوندگی ترکیبی استفاده شده است [28]. ویلیامز و همکارانش برای به دست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی ابتدا یک لوله را در شرایط هیدروفرمینگ تحت کرنش‌های فشاری طولی قراردادند به طوری که باعث کمانش و چروکیدگی در لوله نشد. سپس نمونه‌های آزمون کشش را از درون این لوله استخراج کردند و با انجام آزمون کشش بر روی این نمونه‌ها، پارامترهای موردنظر را تعیین نمودند [30]. در این تحقیق برای به دست آوردن مقادیر این پارامترها از داده‌های آزمون کشش تک‌محوره و همچنین ارزیابی مقادیر این پارامترها در نرم‌افزار اجزاء محدود برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ استفاده شد به طوری که استفاده از مقادیر این پارامترها در شبیه‌سازی اجزاء محدود خصوصیتی از قطعه نهایی مانند ارتفاع برآمدگی را به درستی پیش‌بینی نمود.



شکل 5 مقایسه منحنی سخت‌شوندگی همسانگرد و منحنی آزمایش کشش

جدول 1 مقادیر پارامترهای سخت‌شوندگی همسانگرد

پارامتر	ضریب استحکام $K(\text{MPa})$	توان کارسختی n	پیش کرنش ϵ_0
مقدار	567	0/505	0/005



شکل 4 منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر آزمون کشش [21]

که در این رابطه K ضریب استحکام، ϵ_0 پیش کرنش و n توان کارسختی نامیده می‌شود. از برازش¹ این منحنی توانی بر منحنی داده‌های آزمون کشش اصلاح‌شده در شکل 4 به کمک روش کمترین مربعات خطا²، مقادیر پارامترهای سخت‌شوندگی همسانگرد به دست آمد. در شکل 5 منحنی توانی و مقادیر داده‌های آزمون کشش باهم مقایسه گردیدند. در جدول 1 مقادیر به دست آمده برای پارامترهای سخت‌شوندگی همسانگرد داده شده‌اند.

3-2- سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی

چنانچه تنش‌های وارده به قطعه حالت بارگذاری و باربرداری داشته باشند، در این صورت باید اثر بوشینگر³ نیز در تعیین میزان تنش‌های تسلیم ماده در نظر گرفته شود. یکی از معیارهایی که می‌توان برای این منظور به کار برد، معیار سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی است. در این معیار، اندازه سطح تسلیم نه تنها با افزایش تنش‌ها بزرگ‌تر می‌شود، بلکه مرکز سطح تسلیم نیز در فضای تنش‌های اصلی جابجا می‌شود. تابع تسلیم ماده با استفاده از معیار ون میزز و سخت‌شوندگی ترکیبی به صورت رابطه (4) قابل تعریف است [24]:

$$f(\sigma - \alpha, k) = \sqrt{(s - \alpha) \cdot (s - \alpha)} - k = 0 \quad (4)$$

که در این رابطه s تانسور تنش انحرافی، α تانسور تنش قبلی انحرافی⁴ که جابجایی مرکز سطح تسلیم را مشخص می‌کند و k اندازه سطح تسلیم است که برای سخت‌شوندگی سینماتیک مقداری ثابت است و برای سخت‌شوندگی ترکیبی متغیر است و طبق سخت‌شوندگی همسانگرد با افزایش کرنش، مقدار k افزایش می‌یابد. سخت‌شوندگی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی با رابطه (5) نمایش داده می‌شود [25]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + R + \alpha \quad (5)$$

در این رابطه σ_0 تنش تسلیم اولیه و R مربوط به سخت‌شوندگی همسانگرد و α مربوط به سخت‌شوندگی سینماتیک است. همچنین مقدار $\sigma_0 + R$ اندازه سطح تسلیم را مشخص می‌کند و معادل k در رابطه (4) است. مقدار R طبق مدل شابوشه⁵ به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود [26]:

$$R = Q(1 - e^{-b\epsilon_p}) \quad (6)$$

در این رابطه Q و b ثابت‌های ماده هستند و ϵ_p کرنش پلاستیک تجمعی است. پارامتر Q ، بیشینه اندازه سطح تسلیم را مشخص می‌کند و پارامتر b ،

1- Fitting
2- Least Square Error Method
3- Bauschinger Effect
4- Deviatoric Back-stress Tensor
5- Chaboche Model

6- Spherical Indentation

3-3- به دست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی

در این تحقیق برای یافتن پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی از روش کمترین مربعات خطا استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا مقادیر تصادفی برای c, b, Q و γ در نظر گرفته شدند و سپس با استفاده از رابطه (9) مجموع مربعات خطای بین مقادیر تنش‌های آزمون کشش و مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه (8) محاسبه شدند.

$$S(Q, b, c, \gamma) = \sum_{i=1}^m \left[\bar{\sigma}_i - \left(\sigma_0 + Q(1 - e^{-b\bar{\epsilon}_i}) + \frac{c}{\gamma}(1 - e^{-\gamma\bar{\epsilon}_i}) \right) \right]^2, \quad (Q - R \geq 0, \frac{c}{\gamma} - \alpha \geq 0) \quad (9)$$

که در این رابطه $\bar{\sigma}_i$ تنش‌های مؤثر و $\bar{\epsilon}_i$ کرنش‌های مؤثر برای منحنی توانی برون‌یابی شده آزمون کشش در شکل 5 و 5 n تعداد نقاط می‌باشند. با استفاده از روش کمترین مربعات خطا و تحت قیود داده‌شده در رابطه (9)، مقادیری از c, b, Q و γ که به ازای آن‌ها مقدار S کمترین باشد، به‌عنوان پارامترهای موردنظر انتخاب شدند. به‌منظور به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای تابع f ، از الگوریتم ژنتیک¹ استفاده شد. بهینه‌سازی برای 100 نسل انجام گرفت و جمعیت نسل‌ها 50 عدد و ضریب جهش 0/2 انتخاب شد. پارامترهای به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک در جدول 2 داده شدند. نمودار تنش-کرنش با استفاده از پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی از جدول 2 در شکل 6 نشان داده شده است که شامل دو قسمت سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی سینماتیک بود. سخت‌شوندگی سینماتیک بعد از یک کرنش مشخص به حد اشباع رسید.

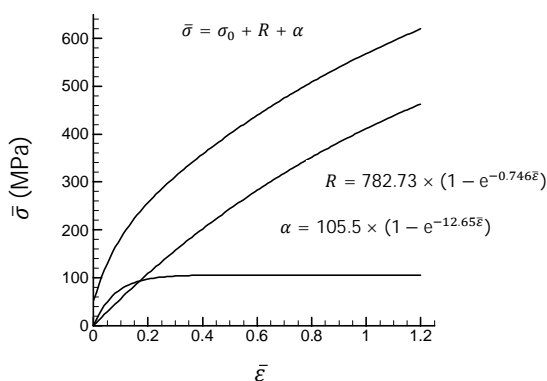
4- شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ بدون نوسان فشار

در هیدروفرمینگ بدون نوسان فشار همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، منحنی فشار داخلی برحسب جابجایی سنبه محوری از فشار صفر شروع شد و متناسب با حرکت سنبه‌ی محوری به‌تدریج افزایش یافت تا به بیشینه فشار رسید و در انتهای فرآیند فشار صفر گشت. در این تحقیق روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعه سه‌راهی T شکل با جابجایی محوری مطابق منحنی بارگذاری شکل 7 به کار رفت. برای تحلیل اجزاء محدود از حل دینامیکی صریح² در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس³ استفاده شد. شروع شبیه‌سازی پس از پایان مرحله آب‌بندی دو انتهای لوله در آزمایش هیدروفرمینگ و زمان پایان آن پس از صفر شدن فشار بود. مدت زمان فرآیند از لحظه‌ی شروع پر شدن قالب تا توقف سنبه‌ی محوری در پایان فرآیند 40 ثانیه بود. در این تحقیق از سنبه مخالف⁴ برای کنترل شکل‌دهی در سمت شاخه‌ی سه‌راهی استفاده نشد.

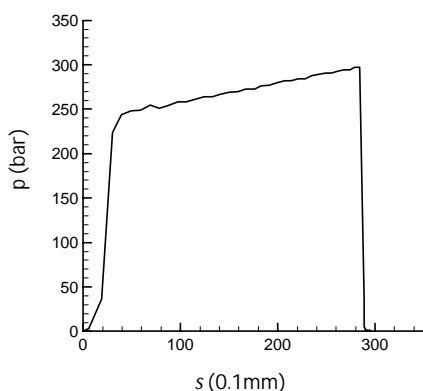
خواص مواد مورد‌استفاده در تحلیل، برای دو حالت سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی ترکیبی موردبررسی قرار گرفت. مقادیر خواص الاستیک لوله شامل مدول یانگ 70 گیگا پاسکال و ضریب پواسن 0/3 در حین شبیه‌سازی ثابت فرض شد. از آنجایی‌که در حین فرآیند هیدروفرمینگ قالب و سنبه‌های محوری بدون تغییر شکل باقی می‌مانند، در مدل اجزاء محدود به‌عنوان اجسام پوسته‌ای و صلب در نظر گرفته شدند و برای آن‌ها نقاط مرجع تعریف شدند. برای لوله، مدل سه‌بعدی با خواص شکل‌پذیر به کار

جدول 2 مقادیر پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی

پارامتر	σ_0 (MPa)	Q (MPa)	b	c (MPa)	γ
مقدار	51/3	782/73	0/746	1334/6	12/65



شکل 6 نمودار تنش-کرنش سخت‌شوندگی ترکیبی از جدول 2

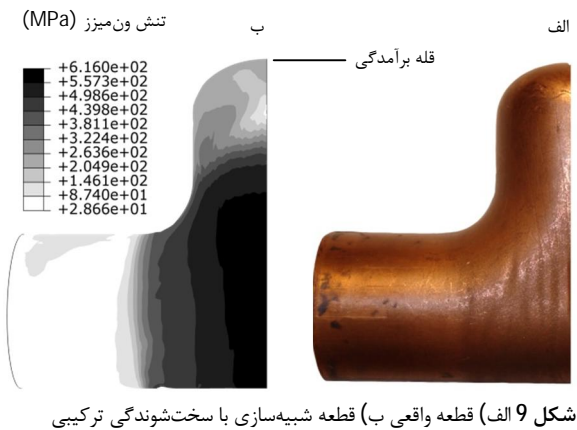


شکل 7 منحنی مسیر بارگذاری در هیدروفرمینگ بدون نوسان فشار

رفت و توسط المان شش‌وجهی و هشت‌گره‌ی⁵ مش بندی شد. اندازه المان‌های لوله بدین‌ترتیب انتخاب شد که ابتدا از المان درشت برای مش بندی در جهت ضخامت استفاده گردید و سپس المان‌های ریزتر استفاده شد و در هر مرحله نتایج با مرحله قبل مقایسه گردید تا با توجه به خطا و همچنین زمان شبیه‌سازی اندازه مناسب المان انتخاب شود. تعداد دو المان در راستای ضخامت لوله برای شبیه‌سازی مناسب تشخیص داده شد و مقادیر ارتفاع برآمدگی به عنوان یک متغیر قابل ارزیابی توسط آزمایش تجربی در شبیه‌سازی توسط دو و سه المان اختلاف‌ناچیزی داشتند. بنابراین با توجه به زمان شبیه‌سازی، از دو المان در راستای ضخامت استفاده شد. همان‌طور که در شکل 8-الف مشاهده می‌شود، مدل به‌صورت سه‌بعدی و کامل موردبررسی قرار گرفت. دلیل این کار این بود که معمولاً استفاده از نصف یا یک‌چهارم مدل و اعمال شرایط مرزی بر روی لوله و قالب در صفحات تقارن، امکان تحلیل کامل مدل خصوصاً هنگام وقوع چروکیدگی را نمی‌دهد. با توجه به استفاده از مدل کامل، برای لوله هیچ‌گونه شرایط مرزی غیر از تماس با قالب و سنبه‌ها تعریف نشد. اما نقاط مرجع دو قسمت قالب به‌طور کامل مقید شدند. سنبه‌های محوری فقط برای حرکت در جهت محور لوله آزاد بودند و در بقیه جهات طولی و چرخشی مقید شدند. تماس بین اجزاء قالب و لوله از نوع پنالتی⁶ و به‌صورت جفت سطوح تماسی¹ تعریف شد. همچنین از روش

1- Genetic Algorithm
2- Explicit
3- Abaqus
4- Counterpunch

5- C3D8R Element
6- Penalty Contact



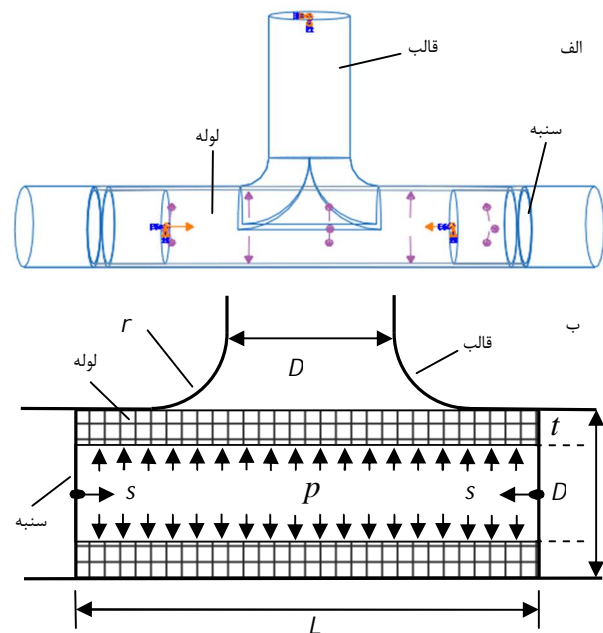
جدول 3 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی

خطا %	ماکزیمم ارتفاع برآمدگی (mm)	نوع نتیجه
-	33/0	تجربی
2/7	32/10	شبیه‌سازی با خواص همسانگرد
0/15	32/95	شبیه‌سازی با خواص ترکیبی

فرآیند در شکل 10 نشان داده شده است. در شبیه‌سازی توسط سخت‌شوندگی ترکیبی تنش مؤثر کمتر و کرنش مؤثر بیشتری به دست آمد. برای بررسی تفاوت‌های دو منحنی در شکل 10، در شکل‌های 11 و 12 مؤلفه‌های تنش و کرنش در قله برآمدگی در دو راستای محیطی و طولی لوله ترسیم شدند. مطابق شکل 11 برای راستای محیطی لوله، نتایج برای دو شبیه‌سازی مشابه بود و تغییر جهت تنش در ابتدا و حین فرآیند مشاهده نگردید و فقط در انتهای فرآیند تنش محیطی برای هر دو شبیه‌سازی وارد ناحیه منفی شد و فرآیند نیز پایان یافت. در انتهای فرآیند به دلیل اینکه این تنش‌های منفی افزایش نیافتند بنابراین اثر پوشینگر باوجود تغییر جهت تنش برای این مورد مشاهده نشد و در ناحیه تنش‌های منفی برای دو شبیه‌سازی تفاوتی دیده نشد. در شکل 12 تغییر جهت تنش طولی از فشاری به کششی در حین فرآیند مشاهده گردید و کرنش منفی با قدر مطلق کوچک‌تر برای خواص ترکیبی به دست آمد. تفاوت دو شبیه‌سازی در شکل 10 به تغییر جهت تنش‌های طولی در شکل 12 مربوط می‌شود. در ابتدای فرآیند تنش‌های طولی در قطعه به دلیل جابجایی سنبه محوری فشاری بودند، به تدریج تنش‌های طولی با افزایش فشار داخلی، از فشاری به کششی تغییر جهت دادند. هنگام تغییر جهت تنش، در شبیه‌سازی با خواص ترکیبی مطابق اثر پوشینگر ماده با تنش کمتری در جهت کششی تسلیم شد. درحالی‌که تسلیم و شروع کرنش مثبت برای سخت‌شوندگی همسانگرد به تنش بیشتری نیاز داشت. بنابراین با تغییر جهت تنش، منحنی‌های تنش طولی در دو شبیه‌سازی از هم جدا شدند و منحنی تنش طولی برای خواص همسانگرد بالاتر از منحنی مربوط به خواص ترکیبی قرار گرفت. در نتیجه با افزایش تنش کششی به دلیل افزایش فشار داخلی، در جهت طولی تغییر شکل بیشتری برای خواص ترکیبی انجام شد و کرنش مثبت بیشتری به دست آمد. در نتیجه مجموع کرنش در جهت طولی برای خواص ترکیبی مقداری نزدیک‌تر به کرنش صفر شد. در جدول 4 مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های مؤثر و جزئی در قله برآمدگی قطعه سهرای T شکل در دو شبیه‌سازی داده شدند. تنش و کرنش محیطی در دو شبیه‌سازی اختلاف کمی داشتند. اما تنش طولی در قطعه شبیه‌سازی شده با خواص همسانگرد 24 مگا پاسکال بیشتر از تنش طولی در

خود تماسی² برای لوله به‌تنهایی استفاده گردید. ضریب اصطکاک 0/04 [31] برای تماس لوله با اجزای قالب در نظر گرفته شد. برای بارگذاری، نقاط مرجع سنبه‌های محوری به‌اندازه‌ی مقدار s در شکل 7 در راستای محور لوله و در جهت مخالف یکدیگر به سمت مرکز قالب حرکت کردند و فشار نیز مطابق با منحنی بارگذاری شکل 7 و متناسب با حرکت سنبه محوری به سطح داخلی لوله اعمال گردید. در شکل 8-الف مدل سه‌بعدی و در شکل 8-ب شرایط اعمال فشار به سطح داخلی لوله (p) و جابجایی دو سنبه محوری (s) به‌صورت دوبعدی نشان داده شده است. دو تحلیل مجزا با استفاده از خواص مکانیکی مطابق منحنی توانی سخت‌شوندگی همسانگرد و همچنین منحنی سخت‌شوندگی ترکیبی موردبررسی قرار گرفتند. قطعه شبیه‌سازی با خواص ترکیبی و قطعه آزمایش هیدروفرمینگ در شکل 9 نشان داده شده‌اند. قطعه شبیه‌سازی در محل تقاطع شاخه‌های سهرای بیشترین مقدار تنش‌های ون‌میز را نشان داد. در این نقاط به علت حرکت سنبه‌های محوری کرنش‌های فشاری بزرگی اعمال گردید. بنابراین کرنش مؤثر در این نقاط بیشترین مقدار را داشتند. بنابراین با توجه به منحنی برونمایی شده در شکل 5 برای کرنش‌های بزرگ، تنش‌های مؤثر بزرگی به دست آمد. در جدول 3 بیشترین ارتفاع برآمدگی در دو شبیه‌سازی با خواص همسانگرد و خواص ترکیبی با آزمایش تجربی به‌صورت کمی مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی با خواص سخت‌شوندگی ترکیبی از جدول 2 ارتفاع برآمدگی بیشتری را پیش‌بینی نمود، درحالی‌که تحلیل با خواص همسانگرد از جدول 1 ارتفاع برآمدگی کمتری را محاسبه کرد. نتایج سخت‌شوندگی ترکیبی به نتایج آزمایش هیدروفرمینگ نزدیک‌تر بود.

برای بررسی تأثیر پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی بر روی شبیه‌سازی، نتایج تنش و کرنش به‌دست‌آمده در قله برآمدگی قطع T شکل موردبررسی قرار گرفت. منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر برای این نقطه در طی



شکل 8 الف) مدل سه‌بعدی قالب، ب) شرایط مرزی در تحلیل اجزاء محدود

1- Contact pair surfaces
2- Self-contact

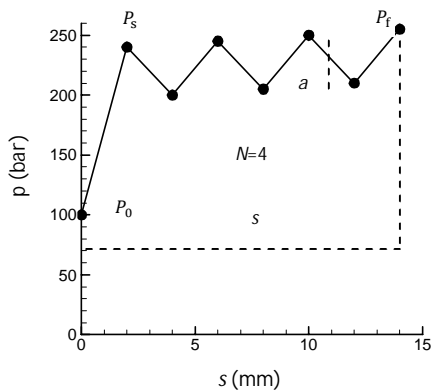
به‌صورت تابعی از جابجایی محوری تغییر داد. در جدول 5 پارامترهای مسیر بارگذاری برای یک آزمایش مشخص داده شده است. با این پارامترها آنچه به‌عنوان خروجی حسگرهای فشار و جابجایی خطی دستگاه هیدروفرمینگ ثبت شد، منحنی فشار-جابجایی در شکل 14 بود. زمان فرآیند از لحظه شروع پر شدن قالب تا صفر شدن مجدد فشار 94 ثانیه بود و زمان حرکت سنبه محوری 78 ثانیه و سرعت متوسط سنبه محوری 0/3 میلی‌متر بر ثانیه ثبت شد. در شکل 15 نیمی از قطعہ هیدروفرمینگ ساخته‌شده توسط مسیر بارگذاری نوسانی شکل 14 نشان داده شد.

جدول 5 پارامترهای مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ پالسی

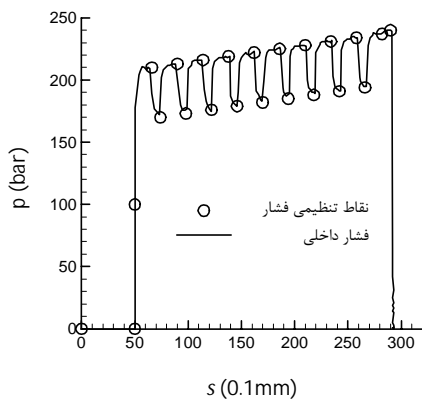
پارامتر	P_0 (bar)	P_s (bar)	P_f (bar)	a (bar)	s (mm)	N
مقدار	100	210	240	40	24	10

جدول 4 نتایج دو شبیه‌سازی در انتهای فرآیند قبل از باربرداری

شبیه‌سازی	$\bar{\sigma}$ (MPa)	$\bar{\epsilon}$	σ_θ (MPa)	ϵ_θ	σ_ϕ (MPa)	ϵ_ϕ
همسانگرد	287	0/254	305	0/207	299	-0/044
ترکیبی	275	0/264	300	0/208	275	-0/029



شکل 13 نقاط تنظیمی قله و دره فشار در هیدروفرمینگ پالسی



شکل 14 منحنی مسیر بارگذاری نوسانی

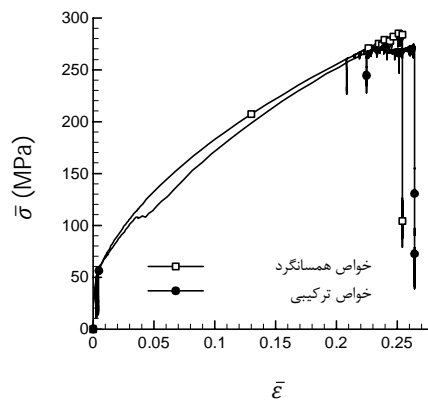


شکل 15 قطعہ سهرای T شکل آزمایش هیدروفرمینگ پالسی

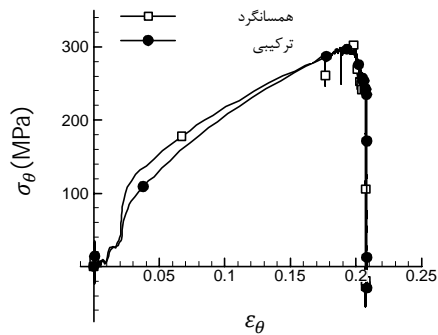
شبیه‌سازی با خواص ترکیبی بود. قدر مطلق کرنش طولی نیز در شبیه‌سازی با خواص همسانگرد 0/015 بیشتر از شبیه‌سازی با خواص ترکیبی بود.

5- مسیر بارگذاری نوسانی

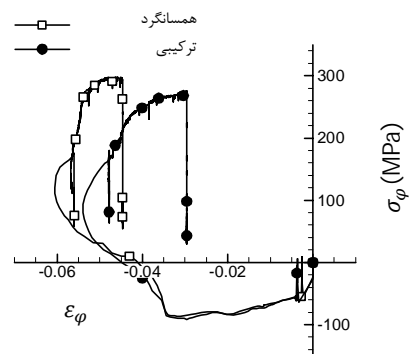
در فرآیند هیدروفرمینگ پالسی فشار بین مقادیر از قبل تعریف‌شده نوسان کرد و سنبه‌های محوری نیز نیروی فشاری را به دو انتهای لوله وارد نمودند. دامنه و فرکانس نوسان فشار در این فرآیند با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود از قبیل فشار ترکیبگی، تغییر نمود. پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ پالسی در این تحقیق در منحنی مسیر بارگذاری در شکل 13 نمایش داده شدند. این پارامترها شامل فشار اولیه بعد از آب‌بندی (P_0), فشار اولیه در شروع نوسان فشار (P_s), فشار نهایی (P_f), جابجایی نهایی سنبه محوری (s), تعداد نوسان فشار (N) و دامنه نوسان فشار (a) بودند. با تعریف شدن مقادیر این پارامترها نقاط قله و دره منحنی مسیر بارگذاری مشخص شدند. با استفاده از این نقاط تنظیمی، دستگاه هیدروفرمینگ فشار را در حین فرآیند



شکل 10 منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر در گره واقع در قله برآمدگی



شکل 11 منحنی تنش-کرنش در راستای محیطی لوله در گره واقع در قله برآمدگی



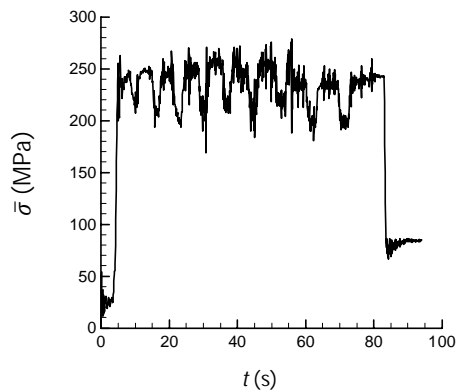
شکل 12 منحنی تنش-کرنش در راستای طولی لوله در گره واقع در قله برآمدگی

5-1- شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ پالسی

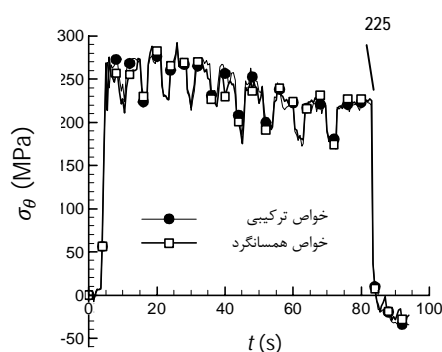
شرایط شبیه‌سازی مطابق بخش قبل است با این تفاوت که از منحنی مسیر بارگذاری نوسانی مطابق شکل 14 استفاده شد. دو شبیه‌سازی مجزا با استفاده از خواص همسانگرد برای ماده لوله از جدول 1 و خواص ترکیبی همسانگرد- سینماتیک غیرخطی از جدول 2 مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول 6 ارتفاع برآمدگی برای دو شبیه‌سازی باهم مقایسه شدند. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود خواص ترکیبی خطای کمتری داشت، هرچند خطای شبیه‌سازی با خواص همسانگرد نیز قابل‌قبول بود. در شکل 16 منحنی تنش ون‌میزر برحسب زمان در قله برآمدگی برای شبیه‌سازی ترکیبی نمایش داده شده است. منحنی تنش ون‌میزر دارای دو نوع نوسان کوچک و بزرگ بود. نوسان‌های بزرگ به تعداد نوسان‌های مسیر بارگذاری در شکل 14 ناشی از تغییرات فشار داخلی، اما نوسان‌های کوچک ناشی از حرکت‌های غیرخطی سنبه‌های محوری بودند. علاوه بر این در انتهای فرآیند در گره واقع در قله برآمدگی تنش پسماند مثبتی وجود داشت. در شکل 17 تنش‌های محیطی در لوله در دو شبیه‌سازی باهم مقایسه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج با استفاده از دو نوع سخت‌شوندگی مشابه بودند. دلیل آن این است که تغییر جهت تنش در راستای محیطی در ابتدا و حین فرآیند وجود نداشت و تنها در انتهای فرآیند که فشار داخلی کاهش یافت، تنش محیطی تغییر جهت داد. در انتهای فرآیند چون فشار داخلی مطابق منحنی بارگذاری کاهش یافت، در نتیجه تنش‌های ناشی از آن نیز حذف گردید، به همین دلیل مقدار تنش در انتهای شبیه‌سازی در منحنی‌های شکل‌های 17 و 18 کاهش یافتند. همچنین جابجایی محوری نیز متوقف شد. در این حال چون سنبه‌ها در تماس با دو انتهای لوله بودند، هنوز تنش‌های پسماند فشاری اندکی در لوله وجود داشتند. در نتیجه با حذف تنش‌های کششی، تنش‌های محیطی در شکل 17 وارد ناحیه منفی شدند. این تنش‌های منفی امکان ادامه و افزایش نداشتند و چون سنبه محوری متوقف شد، در یک حدی باقی ماندند. چنانچه این تنش‌ها افزایش می‌یافتند، مجدداً اثر بوشینگر باعث تفاوت در منحنی‌های تنش در جهت منفی می‌شد و دو منحنی تنش با استفاده از سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی ترکیبی از یکدیگر جدا می‌شدند. ولی در این مورد تنش‌ها نهایتاً در یک حدی باقی ماندند و فرآیند پایان یافت. در شکل 18 منحنی تنش طولی در لوله در طی زمان فرآیند در دو شبیه‌سازی به نشان داده شده است. مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی به کمک سخت‌شوندگی ترکیبی با افزایش زمان فرآیند تنش‌های طولی افزایش کمتری داشت. در ابتدای فرآیند همان‌طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود، تغییر جهت تنش طولی وجود داشت. این تغییر جهت تنش به این دلیل است که در ابتدای فرآیند به دلیل وجود نیروهای فشاری سنبه به دو انتهای لوله، در طول لوله تنش فشاری به وجود آمد و در ادامه با افزایش فشار هیدرولیکی به سطح داخلی لوله تنش کششی در جهت طولی لوله افزایش یافت و بر تنش فشاری غالب گردید. بنابراین جهت تنش از فشاری به کششی تغییر کرد. نرم‌افزار آباکوس در شبیه‌سازی با سخت‌شوندگی ترکیبی هنگام تغییر

جدول 6 مقایسه نتایج ارتفاع قطعه در آزمایش هیدروفرمینگ پالسی و دو شبیه‌سازی

نوع نتیجه	ماکزیمم ارتفاع برآمدگی (mm)	خطا %
آزمایش تجربی	28/64	-
شبیه‌سازی با سخت‌شوندگی همسانگرد	28/33	1
شبیه‌سازی با سخت‌شوندگی ترکیبی	28/41	0/8



شکل 16 منحنی تنش مؤثر در شبیه‌سازی با خواص ترکیبی در قله برآمدگی

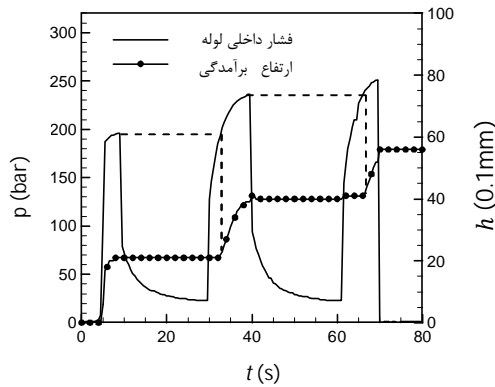


شکل 17 منحنی تنش محیطی در دو شبیه‌سازی در گره واقع در قله برآمدگی

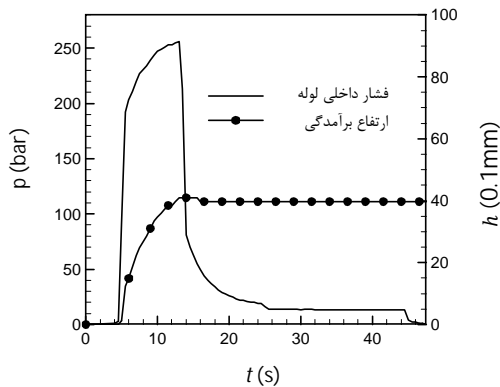
جهت تنش‌ها، در جهت مخالف تغییر شکل با تنش کمتری را محاسبه نمود. همان‌طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود در انتهای فرآیند در قله برآمدگی در جهت طولی لوله برای هر دو شبیه‌سازی تنش پسماند کششی وجود داشت که مقدار این تنش پسماند برای خواص ترکیبی کمتر بود.

6- تأثیر بارگذاری نوسانی بر خواص مواد لوله

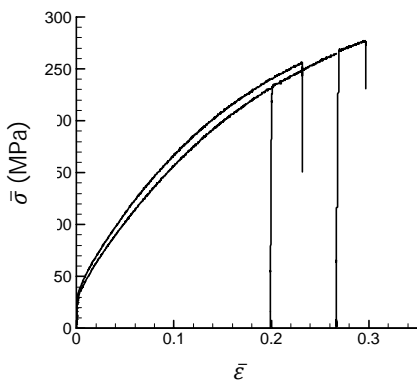
در این تحقیق برای بررسی هیدروفرمینگ پالسی تأثیر نوسان فشار بر روی خواص ماده لوله به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور اینکه تأثیر نوسان فشار بهتر مشخص شود، از منحنی فشار با تعداد نوسان کم و بدون استفاده از حرکت سنبه محوری استفاده شد. شبیه‌سازی بالچ آزاد نشان داده است که عدم حرکت سنبه محوری باعث شده است که تنش‌ها در لوله در منطقه‌ای که با قالب تماس داشته نسبت به منطقه‌ی سهرای که لوله و قالب با یکدیگر تماس نداشتند، ناچیز باشد و تغییر شکل عمده در منطقه‌ای آزاد لوله انجام گرفته است [21]. بنابراین می‌توان تأثیر عامل اصطکاک را در فرآیند بالچ آزاد ناچیز در نظر گرفت. بنابراین در بالچ آزاد تغییر شکل لوله بیشتر وابسته به فشار هیدرولیک داخلی است. برای بررسی تأثیر نوسان فشار، فشار داخلی در سه مرحله وارد شد. در شکل 19 فشار داخلی لوله برحسب زمان و همچنین ارتفاع برآمدگی لوله در منطقه بالچ آزاد برحسب زمان رسم شدند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در طی فرآیند باربرداری و بارگذاری مجدد، مقادیر تسلیم ماده تغییر کرد که در شکل با خط‌چین نمایش مشخص شده است. به عبارتی بعد از مرحله باربرداری و بارگذاری مجدد هنگام افزایش فشار تأخیری در منحنی ارتفاع برآمدگی مشاهده شد و پس‌ازاینکه فشار به مقدار قبل از باربرداری رسید، از این فشار به بعد ارتفاع



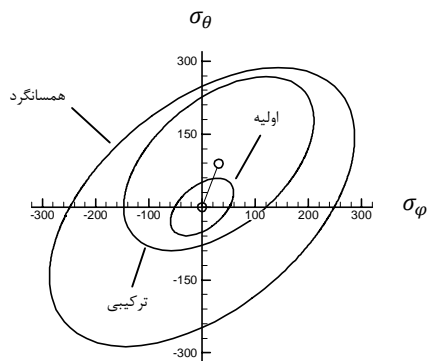
شکل 19 منحنی فشار داخلی سه مرحله‌ای و ارتفاع برآمدگی



شکل 20 منحنی فشار داخلی یک مرحله‌ای و ارتفاع برآمدگی

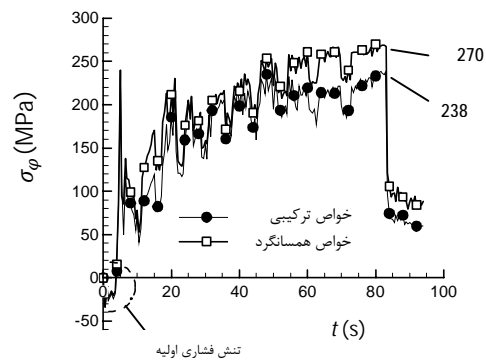


شکل 21 منحنی تنش-کرنش آزمون‌های کشش یکنواخت و سه مرحله‌ای



شکل 22 سطح تسلیم در کرنش معادل 0/19 برای دو نوع سخت‌شوندگی همسانگرد از جدول 1 و ترکیبی از جدول 2

برآمدگی افزایش یافت. در جدول 7 مقادیر فشار و ارتفاع برآمدگی برای سه مرحله فشار داده شده است. همچنین برای مقایسه، آزمون بالچ دیگری نیز انجام شد، به طوری که فشار داخلی نهایی در یک مرحله وارد شد که منحنی‌های فشار و ارتفاع برآمدگی مربوط به آن در شکل 20 رسم شدند. در جدول 8 نتایج این آزمون بالچ نیز داده شده است. از مقایسه دو جدول 7 و 8 نتیجه گرفته شد که برای آزمون بالچ با فشار در چند مرحله، ارتفاع برآمدگی بیشتر به دست آمد. بنابراین بارگذاری و باربرداری خصوصیات ماده لوله را تغییر داد. برای بررسی بیشتر آزمون کششی به صورت چندمرحله‌ای مطابق با کرنش‌های معادل با آزمون بالچ بر روی نمونه‌ی کشش انجام شد و با نتایج آزمون کشش یک مرحله‌ای تا شکست مقایسه گردید. همان‌طور که در شکل 21 مشاهده می‌شود در آزمون کشش سه مرحله‌ای، کرنش شکست نسبت به آزمون کشش در یک مرحله افزایش یافت. با افزایش کرنش، مقادیر تنش تسلیم نسبت به تنش تسلیم اولیه به میزان زیادی افزایش یافت. همچنین مقادیر تنش تسلیم بعد از باربرداری و بارگذاری مجدد بر تنش قبل از باربرداری مرحله قبل منطبق بود و نمودار حالت پیوسته‌ای داشت. این خصوصیت مشابه حالت شکل 19 برای ارتفاع برآمدگی است که در آن ارتفاع برآمدگی تا رسیدن به فشارهای قبل از باربرداری در مرحله قبل تغییر نکرد. در شکل 22 سطح تسلیم برای دو نوع سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی در فرآیند هیدروفرمینگ نشان داده شده است. برای قله فشار اول در شکل 19 کرنش معادل در بالای برآمدگی قطعه معادل 0/19 و کرنش‌های محیطی و طولی به ترتیب برابر 0/149 و 0/28 به دست آمد. بنابراین مرکز سطح تسلیم در سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی در صفحه‌ی تنش‌های محیطی و طولی جابجا شد. اندازه سطح تسلیم و جابجایی مرکز آن مطابق نتایج جدول 2 و رابطه (8) بود. همچنین در شکل 22 سطح تسلیم برای سخت‌شوندگی همسانگرد نیز مطابق پارامترهای جدول 1 رسم شده است که سطح تسلیم فقط بزرگ شد و مرکز سطح آن ثابت باقی ماند.



شکل 18 منحنی تنش طولی در دو شبیه‌سازی در گره واقع در قله برآمدگی

جدول 7 نتایج آزمون بالچ در سه مرحله

آزمایش بالچ نوسانی	فشار (bar)	ارتفاع برآمدگی (mm)
قله فشار اول	196	2/1
قله فشار دوم	236	3/9
قله فشار سوم	251	5/2

جدول 8 نتایج آزمون بالچ در یک مرحله

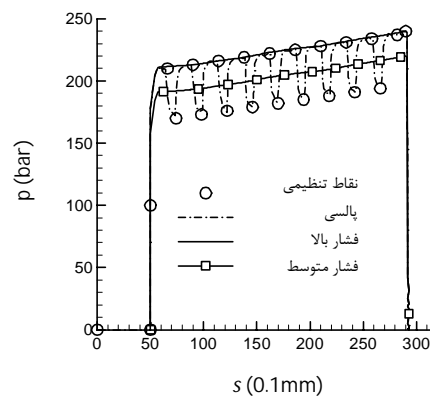
آزمایش بالچ در یک مرحله	فشار (bar)	ارتفاع برآمدگی (mm)
قله فشار	254	4/1

7- مقایسه هیدروفرمینگ پالسی و غیر پالسی

همان‌طور که در بخش‌های 4 و 5 نشان داده شد، شبیه‌سازی هر دو فرآیند هیدروفرمینگ بدون نوسان فشار و هیدروفرمینگ پالسی به کمک سخت‌شوندگی ترکیبی با خطای کمتری همراه بود. بنابراین در این تحقیق، از شبیه‌سازی اجزاء محدود به کمک سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد- سینماتیک غیرخطی برای مقایسه هیدروفرمینگ پالسی و غیر پالسی استفاده شد تا نتایج با دقت بهتری قابل‌مقایسه باشند. شبیه‌سازی‌های فرآیند هیدروفرمینگ بدون نوسان فشار برای دو مسیر بارگذاری فشار بالا و فشار متوسط که در شکل 23 نمایش داده شده است، انجام گردید و با نتایج شبیه‌سازی توسط منحنی مسیر بارگذاری پالسی در شکل 14 مقایسه شدند. شرایط دیگر شبیه‌سازی از جمله زمان فرآیند، ضریب اصطکاک و سرعت سنبه محوری مشابه شبیه‌سازی هیدروفرمینگ پالسی فرض شدند. برای شبیه‌سازی از خواص ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی از جدول 2 استفاده شد. در جدول 9 ارتفاع برآمدگی قطعه در هیدروفرمینگ پالسی، فشار بالا و فشار متوسط باهم مقایسه شده‌اند. مقادیر جدول 9 نشان می‌دهد که برای هیدروفرمینگ فشار بالا ارتفاع برآمدگی بیشتری به دست آمد. با توجه به اینکه دامنه نوسان فشار در آزمایش هیدروفرمینگ نوسانی 40 بار در نظر گرفته شده بود، بنابراین متوسط فشار در آزمایش هیدروفرمینگ فشار بالا 20 بار بیشتر از هیدروفرمینگ پالسی بود و ارتفاع برآمدگی نیز 0/40 میلی‌متر بیشتر از هیدروفرمینگ پالسی به دست آمد. باینکه میانگین فشار در هیدروفرمینگ پالسی و هیدروفرمینگ فشار متوسط باهم برابر بود، ولی ارتفاع برآمدگی در هیدروفرمینگ پالسی به مقدار 0/72 میلی‌متر بیشتر از هیدروفرمینگ فشار متوسط به دست آمد. در جدول 10 مؤلفه‌های کرنش در سه جهت محیطی، طولی و ضخامت در المان واقع در قله برآمدگی برای سه شبیه‌سازی آورده شدند و در شکل 24 تغییرات کرنش در طی زمان فرآیند برای سه شبیه‌سازی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که کرنش‌های نهایی در هیدروفرمینگ پالسی با هیدروفرمینگ فشار بالا اختلاف ناچیزی داشت ولی اندازه‌ی کرنش‌های نهایی در هیدروفرمینگ فشار متوسط، کمتر از مقادیر مربوط به هیدروفرمینگ پالسی بود. در شکل 25 تغییرات ضخامت قطعه سه‌راهی T شکل در راستای محیطی برحسب فاصله از قله‌ی برآمدگی، برای سه شبیه‌سازی نشان داده شده است. برای محاسبه ضخامت از رابطه (10) و از کرنش ضخامت لوله که در شبیه‌سازی به دست آمد، استفاده شد.

$$t = t_0 e^{\epsilon t} \quad (10)$$

در این رابطه t_0 ضخامت اولیه و ϵt کرنش ضخامت لوله است.



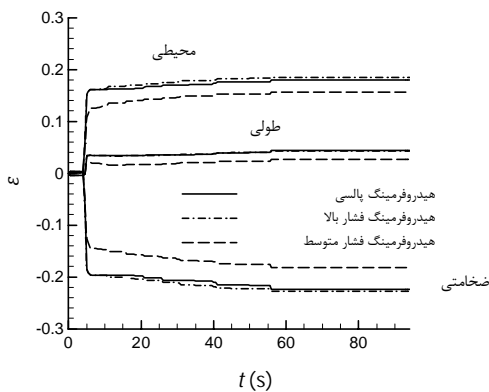
شکل 23 منحنی مسیر بارگذاری هیدروفرمینگ غیر پالسی

جدول 9 مقایسه نتایج ارتفاع برآمدگی شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایش‌های تجربی

نوع مسیر بارگذاری	شبیه‌سازی (mm)	آزمایش تجربی (mm)	خطا %
پالسی	28/41	28/64	0/80
فشار بالا	28/80	29/04	0/82
فشار متوسط	27/72	27/92	0/71

جدول 10 مقایسه کرنش‌های در سه جهت در هیدروفرمینگ پالسی و بدون نوسان

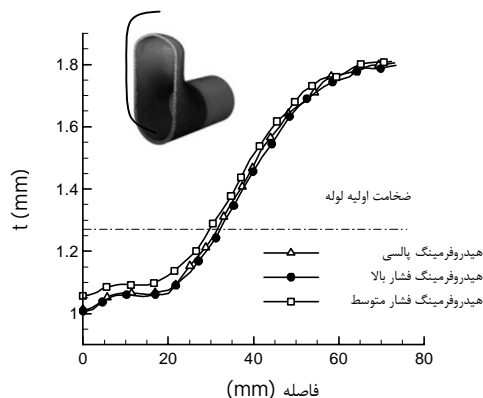
نوع نتیجه	کرنش محیطی	کرنش طولی	کرنش ضخامت
شبیه‌سازی پالسی	0/180	0/043	-0/223
شبیه‌سازی فشار بالا	0/185	0/042	-0/227
شبیه‌سازی فشار متوسط	0/156	0/026	-0/182



شکل 24 تغییرات کرنش در طی زمان فرآیند در گره واقع در قله برآمدگی

همان‌طور که در شکل 25 مشاهده می‌شود، اندازه‌ی ضخامت برای شبیه‌سازی فشار متوسط از دو شبیه‌سازی دیگر بیشتر بود و در دو شبیه‌سازی فشار بالا و پالسی اختلاف کمتری وجود داشت. در جدول 11 کمترین، میانگین و همچنین پراکندگی ضخامت قطعه در راستای محیطی در سه شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل 26 تغییرات ضخامت قطعه در راستای طولی برحسب فاصله از قله برآمدگی، برای سه شبیه‌سازی نشان داده شده است. در این مسیر نیز اندازه‌ی ضخامت قطعه برای دو شبیه‌سازی فشار بالا و پالسی اختلاف کمتری داشتند و در شبیه‌سازی فشار متوسط ضخامت از دو شبیه‌سازی دیگر بیشتر بود. در جدول 12 کمترین، میانگین و همچنین پراکندگی ضخامت قطعه در راستای طولی در سه شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند. از شکل‌های 25 و 26 و مقادیر جدول‌های 11 و 12 نتیجه شد که در هر دو راستای محیطی و طولی، در هیدروفرمینگ فشار متوسط میانگین ضخامت بیشتر و پراکندگی ضخامت کمتری نسبت به هیدروفرمینگ پالسی و فشار بالا به دست آمد. در این تحقیق به دلیل اینکه از سنبه مخالف استفاده نشد، چنانچه نازک‌شدگی کمتر دیواره در منطقه برآمدگی و همچنین پراکندگی ضخامت کمتر در قطعه به‌عنوان پارامترهای بحرانی مطرح باشند، با مقایسه ضخامت در مناطق زیر خط‌چین در شکل‌های 25 و 26، نازک‌شدگی قطعه در منطقه‌ی برآمدگی در هیدروفرمینگ پالسی بیشتر است و هیدروفرمینگ فشار متوسط از این لحاظ ترجیح داده می‌شود. اما اگر ارتفاع برآمدگی بیشتر پارامتر بحرانی باشد، هیدروفرمینگ پالسی ترجیح داده می‌شود. بنابراین به‌طور خلاصه هیدروفرمینگ پالسی باعث افزایش شکل‌دهی لوله شده است. به‌طوری‌که ارتفاع برآمدگی بیشتری را نتیجه داد و ضخیم‌شدگی قطعه که ناشی از فشار محوری سنبه‌ها بود، را کاهش داد. از طرف دیگر مقدار ضخامت دیواره قطعه پراکندگی بیشتری داشت و نیز نازک‌شدگی

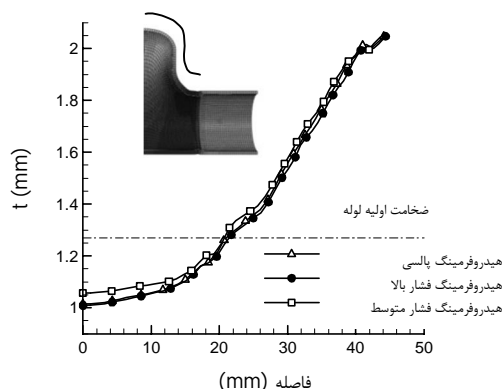
سخت‌شوندگی ترکیبی برای ماده لوله نسبت به شبیه‌سازی با فرض سخت‌شوندگی همسانگرد با دقت بیشتری نتایج آزمایش هیدروفرمینگ را پیش‌بینی نمود. همچنین برای بررسی تأثیر نوسان فشار، آزمون بالچ چندمرحله‌ای انجام شد و نتایج با آزمون بالچ یک مرحله‌ای مقایسه گردید. نتایج نشان داد که برای یک سطح از فشار نهایی استفاده از چند مرحله آزمون بالچ تا رسیدن به این فشار نهایی، ارتفاع برآمدگی بیشتری را در مقایسه با آزمون بالچ یک مرحله‌ای تا همین فشار نهایی به وجود آورد. به کمک خواص ترکیبی مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ پالسی، فشار بالا و فشار متوسط انجام شد. شبیه‌سازی هیدروفرمینگ قطعہ T شکل نشان داد که هیدروفرمینگ پالسی در مقایسه با هیدروفرمینگ فشار متوسط ارتفاع برآمدگی بیشتر، میانگین ضخامت کمتر و پراکندگی ضخامت بیشتری را نتیجه داد.



شکل 25 تغییرات ضخامت برحسب فاصله از قله برآمدگی در راستای محیطی قطعہ

9- فهرست علائم

a	دامنه نوسان فشار (bar)
b	پارامتر سخت‌شوندگی همسانگرد شاپوشه
c	پارامتر سخت‌شوندگی سینماتیک
D	قطر خارجی لوله (mm)
E	مدول یانگ
f	تابع تسلیم
h	ارتفاع برآمدگی قطعہ (mm)
K	ضریب استحکام (MPa)
k	اندازه سطح تابع تسلیم (MPa)
L	طول لوله (mm)
N	تعداد نوسان فشار
m	تعداد نقاط منحنی آزمون کشش
n	توان کارسختی
p	فشار داخلی لوله (bar)
P ₀	فشار اولیه (bar)
P _f	فشار نهایی (bar)
P _s	فشار شروع نوسان (bar)
Q	پارامتر سخت‌شوندگی همسانگرد شاپوشه (MPa)
R	سخت‌شوندگی همسانگرد شاپوشه (MPa)
R ₀	ضریب ناهمسانگردی در راستای طولی لوله
R ₉₀	ضریب ناهمسانگردی در راستای محیطی لوله
r	شعاع قالب (mm)
S	مجموع مربعات خطای برازش منحنی ترکیبی
s	جابجایی سنبه محوری (mm)
S	تانسور تنش انحرافی
t	زمان (s)
t	ضخامت لوله (mm)
t ₀	ضخامت اولیه لوله (mm)
علائم یونانی	
α	تنش قبلی در سخت‌شوندگی سینماتیک (MPa)
γ	پارامتر سخت‌شوندگی سینماتیک
ε̄	کرنش مؤثر ون میزز
ε̄ _i	کرنش در نقاط منحنی برونمایی شده



شکل 26 تغییرات ضخامت برحسب فاصله از قله برآمدگی در راستای طولی قطعہ

جدول 11 مقایسه ضخامت قطعہ در مسیر محیطی در شکل 25 در سه شبیه‌سازی

نوع شبیه‌سازی	کمترین ضخامت (mm)	میانگین ضخامت (mm)	انحراف از معیار (mm)
نوسانی	1/014	1/356	0/308
فشار بالا	1/009	1/348	0/307
فشار متوسط	1/057	1/379	0/296

جدول 12 مقایسه ضخامت قطعہ در مسیر طولی در شکل 26 در سه شبیه‌سازی

نوع شبیه‌سازی	کمترین ضخامت (mm)	میانگین ضخامت (mm)	انحراف از معیار (mm)
نوسانی	1/014	1/452	0/369
فشار بالا	1/009	1/444	0/367
فشار متوسط	1/057	1/465	0/354

در منطقه‌ی برآمدگی قطعہ که با قالب تماس نداشت، بیشتر شد.

8- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ به کمک دو نوع سخت‌شوندگی همسانگرد و سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-سینماتیک غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا پارامترهای لازم برای دو نوع سخت‌شوندگی مورد مطالعه به دست آمدند. سپس این پارامترها در شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ پالسی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تغییر جهت تنش‌ها در ابتدای فرآیند روی تفاوت نتایج دو شبیه‌سازی به کمک دو نوع سخت‌شوندگی مؤثر بودند. شبیه‌سازی با فرض

Hammering Hydroforming by Static Explicit FEM, *ISIJ International*, Vol. 44, No. 1, pp. 123-128, 2004.

[12] M. Loh-Mousavi, M. Bakhshi-Jooybari, K.-I. Mori, K. Hyashi, Improvement of formability in T-shape hydroforming of tubes by pulsating pressure, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1139-1146, 2008.

[13] M. Kadkhodayan, A. Erfani Moghadam, An investigation into the optimal load paths for the pulsating T-shaped hydroforming of tubes, *Journal of Computational Methods in Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 1-10, 2011. (In Persian)

[14] Y. Xu, S. Zhang, M. Cheng, H. Song, X. Zhang, Application of Pulsating Hydroforming in Manufacture of Engine Cradle of Austenitic Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 81, No. 0, pp. 2205-2210, 2014.

[15] M. Loh-Mousavi, M. Bakhshi-Jooybari, K. Mori, M. Farzin, S. J. Hosseinpour, Mechanism of Improvement of Die Corner Filling in Pulsating Hydroforming of Tube in a Box-Shape Die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 121-133, 2009. (In Persian)

[16] L. Yang, H. Rong, Y. He, Deformation Behavior of a Thin-Walled Tube in Hydroforming with Radial Crushing Under Pulsating Hydraulic Pressure, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 2, pp. 429-438, 2014.

[17] F. Dunne, N. Petrinic, *Introduction to Computational Plasticity*, First Edition, pp. 23-38, New York: Oxford university press, 2005.

[18] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Second Edition, pp. 416, Amsterdam: Elsevier, 2004.

[19] V. Panahzadeh R, H. Moslemi Naeini, G. Liaghat, M. Salmani Tehrani, Study of the effects of work hardening models on spring back in cold roll forming of U channels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 74-82, 2013. (In Persian)

[20] M. Koç, T. Altan, An overall review of the tube hydroforming (THF) technology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 108, No. 3, pp. 384-393, 2001.

[21] A. Ashrafi, K. Khalili, Studying the stress-strain curve of C12200 Copper tube using hydraulic bulge test in T-shape die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 95-106, 2015. (In Persian)

[22] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, H.-C. Chuang, Forming limit diagrams of tubular materials by bulge tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 11, pp. 5024-5034, 2009.

[23] H. W. Swift, Plastic instability under plane stress, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-18, 1952.

[24] A. H. Mahmoudi, S. M. Pezeshki-Najafabadi, H. Badnava, Parameter determination of Chaboche kinematic hardening model using a multi objective Genetic Algorithm, *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 3, pp. 1114-1122, 2011.

[25] B. K. Chun, J. T. Jinn, J. K. Lee, Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory, *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 571-595, 2002.

[26] J. L. Chaboche, Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, No. 3, pp. 247-302, 1989.

[27] J. L. Chaboche, Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-188, 1986.

[28] J.-M. Collin, T. Parenteau, G. Mauvoisin, P. Pilvin, Material parameters identification using experimental continuous spherical indentation for cyclic hardening, *Computational Materials Science*, Vol. 46, No. 2, pp. 333-338, 2009.

[29] N. Huber, C. Tsakmakis, A neural network tool for identifying the material parameters of a finite deformation viscoplasticity model with static recovery, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, No. 3-5, pp. 353-384, 2001.

[30] B. W. Williams, C. H. M. Simha, N. Abedrabbo, R. Mayer, M. J. Worswick, Effect of anisotropy, kinematic hardening, and strain-rate sensitivity on the predicted axial crush response of hydroformed aluminium alloy tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 652-661, 2010.

[31] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, T. Altan, Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 343-351, 2007.

پیش کرنش	ε_0
کرنش در نمونه کشش در راستای طولی لوله	ε_2
کرنش پلاستیک	ε_p
کرنش ضخامتی لوله	ε_t
کرنش محیطی لوله	ε_θ
کرنش طولی لوله	ε_φ
تنش (MPa)	σ
تنش مؤثر ون میزز (MPa)	$\bar{\sigma}$
تنش در نقاط منحنی برونمایی شده (MPa)	$\bar{\sigma}_i$
تنش تسلیم اولیه (MPa)	σ_0
تنش در نمونه کشش در راستای طولی لوله (MPa)	σ_2
تنش تسلیم (MPa)	σ_y
تنش محیطی در لوله (MPa)	σ_θ
تنش طولی در لوله (MPa)	σ_φ
زبرنویس‌ها	
پلاستیک	P
تسلیم	Y

10 - مراجع

[1] M. Koç, T. Altan, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 123-138, 2002.

[2] M. Ahmetoglu, T. Altan, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 25-33, 2000.

[3] P. Ray, B. J. Mac Donald, Experimental study and finite element analysis of simple X- and T-branch tube hydroforming processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1498-1518, 2005.

[4] F. C. Lin, C. T. Kwan, Application of abductive network and FEM to predict an acceptable product on T-shape tube hydroforming process, *Computers & Structures*, Vol. 82, No. 15-16, pp. 1189-1200, 2004.

[5] S. Y. Ahmadi Brooghani, K. Khalili, S. E. Eftekhari Shahri, B. S. Kang, Loading path optimization of a hydroformed part using multilevel response surface method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1523-1531, 2014.

[6] A. Ben Abdesslem, E. Pagnacco, A. El-Hami, Increasing the stability of T-shape tube hydroforming process under stochastic framework, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5-8, pp. 1343-1357, 2013.

[7] M. Kadkhodayan, A. Moghadam, Optimization of load paths in X- and Y-shaped hydroforming, *International Journal of Material Forming*, Vol. 6, No. 1, pp. 75-91, 2013.

[8] B. Teng, K. Li, S. Yuan, Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5-8, pp. 1079-1086, 2013.

[9] K. Mori, A. U. Patwari, S. Maki, Improvement of Formability by Oscillation of Internal Pressure in Pulsating Hydroforming of Tube, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 215-218, 2004.

[10] K. Mori, T. Maeno, S. Maki, Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tubes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 6, pp. 978-984, 2007.

[11] T. Hama, M. Asakawa, H. Fukiharuru, A. Makinouchi, Simulation of