



محاسبه برگشت فنری با لحاظ نمودن مدل سخت شونددگی یوشیدا یومری در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد ورق فولادی

جهاد نوفل^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*} و سیامک مزدک^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳

چکیده

یکی از چالش‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برگشت‌فنری است. دقت شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی ورق فلزات برای پیش‌بینی برگشت‌فنری به معادلات بیان‌کننده رابطه تنش - کرنش، تابع تسلیم و مدل سخت شونددگی انتخاب شده و ناهمسانگردی ماده بستگی دارد. در این مقاله، بوسیله آزمایش تجربی کشش - فشار متناوب و با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-OPT، متغیرهای مدل سخت شونددگی یوشیدا یومری برای فولاد St37 بدست آمده است. از آنجا که در نظر گرفتن مدل سخت شونددگی در برگشت فنری مهم است، مدل‌های مختلفی از مدل سخت شونددگی برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار ماده پیشنهاد شده است. یکی از مدل‌های دقیق در پیش‌بینی رفتار فلز، مدل سخت شونددگی یوشیدا یومری است. آزمایش‌های تجربی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد کمانی کردن ورق و همچنین شبیه‌سازی در نرم‌افزار Lsdyna شبیه‌سازی‌های با و بدون در نظر گرفتن سخت شونددگی یوشیدا یومری انجام شد. نشان داده شد، پیش‌بینی برگشت فنری با در نظر گرفتن مدل یوشیدا یومری از دقت بالاتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: برگشت فنری؛ سخت شونددگی؛ شکل‌دهی غلتکی سرد؛ یوشیدا-یومری.

Calculation of Springback with Considering of Youshida Uemori Hardening Model in the Cold Roll Forming Process of the Steel Plate

J. Naofal¹, H. Moslemi Naeini^{2,*}, S. Mazdak³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Tafresh University of Technology, Tafresh, Iran.

Abstract

springback is one of the challenges in the final shape of the steel in the cold roll forming process of the steel plate. The precision of the simulation of sheet metal forming processes for prediction of the springback depends on the stress-strain relationship, the yield function the selected hardening model and the anisotropy of the material. In this paper, using alternating tension-compression experiment and using simulation in software LS-OPT, the variables of the Yoshida-Uemori hardening model have been obtained for St37 steel. Springback in the final shape of steel plate deformation is a challenge of the roll forming process. Since consideration of the hardening law is important in the springback, various models of hardening law are proposed for more accurate prediction of material behavior. One of the most accurate models in predicting metal behavior is the Yoshida-Uemori hardening model. The experimental tests were also carried out as well as the simulations in the Ls-dyna simulation software with and without Yoshida-Uemori hardening model. It was shown that the prediction of springback with using the Yoshida-Uemori hardening model was more accurate.

Keywords: Springback; Roll Forming; Yoshida-Uemori Hardening; Hardening Model.

۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزات همراه با معضلات زیادی همچون نازک‌شدگی، چروکیدگی و برگشت‌فنری است که ساخت محصولی بدون عیب را مشکل می‌سازد [۱]. محققین زیادی عیوب نازک‌شدگی و برگشت‌فنری [۲] چروکیدگی و نازک‌شدگی [۳] را در شکل‌دهی ورق بررسی کرده‌اند. عیب برگشت‌فنری دقت ابعادی محصول نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و پدیده‌ای رایج و اجتناب‌ناپذیر است. برگشت‌فنری به علت بازگشت ناحیه کشسانی در نواحی تغییر شکل یافته رخ می‌دهد. رفتار تنش کرنش ماده هنگام باربرداری و بارگذاری به خصوص در ناحیه فشاری تغییر می‌کند که این تغییر روی برگشت‌فنری موثر است [۴]. دقت شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزات برای پیش‌بینی برگشت‌فنری به معادلات بیان‌کننده رابطه تنش - کرنش، تابع تسلیم و مدل سخت‌شوندگی انتخاب شده و ناهمسانگردی ماده بستگی دارد. در بیشتر فلزات تغییر شکل مومسانی، منجر به افزایش ناحیه کشسانی یا افزایش تنش تسلیم می‌شود؛ این پدیده سبب بزرگ شدن یکنواخت سطح تسلیم می‌شود. مدل بیان‌کننده این پدیده سخت‌شوندگی همسانگرد نامیده می‌شود [۵]. در برخی از فلزات مانند فولاد در بارگذاری معکوس^۱ استحکام تسلیم فشاری کاهش می‌یابد، این پدیده اثر باشینگر^۲ نامیده می‌شود. مدل سخت‌شوندگی همسانگرد در بارگذاری معکوس، اثر باشینگر را لحاظ نمی‌کند. در بارگذاری چرخه‌ای، مدل سخت‌شوندگی سینماتیک پیشنهاد شده توسط پراگر و زیگلر با در نظر گرفتن تانسور تنش برگشتی α اثر باشینگر و سخت‌شوندگی لحاظ می‌شود. در این مدل در بارگذاری فرض می‌شود، تنش برگشتی در جهتی یکسان با مقدار کرنش مومسانی افزایش می‌یابد [۶]. مدل سخت‌شوندگی سینماتیک آرمسترانگ و فردیک [۷]، تغییر تنش برگشتی را به صورت نمایی لحاظ می‌کند که تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. چابوچه [۸] به این نتیجه رسید، اضافه کردن عبارت غیر خطی تنش برگشتی برای توصیف کار سختی در کرنش زیاد مناسب نیست به این منظور از چند تنش برگشتی به طور همزمان

استفاده کرد. مدل چابوچه مدل ترکیبی نامیده می‌شود؛ این مدل دقت بالایی در تخمین نرم‌شدگی ناپایدار را دارد. ویسکل و همکاران [۹] با استفاده از سه مدل سخت‌شوندگی مواد (همسانگرد، سینماتیک و ترکیبی) مدلی ریاضی برای پیش‌بینی برگشت‌فنری ورق در خمش U شکل ارائه دادند. به دلیل نادیده گرفتن اثر اصطکاک، این مدل فقط محدود به فرآیند خمش همگن است. ژانگ و همکاران [۱۰] مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی برگشت‌فنری در خمش V شکل ارائه دادند. این مدل بر اساس تابع تسلیم هیل و شرایط کرنش صفحه‌ای تدوین شده است. با استفاده از این مدل اثر فشار تماسی، تاثیر طول بازوی خم بین سنبه و قالب، تنش عرضی، سخت‌شوندگی ترکیبی، جابجایی صفحه خنثی و نازک‌شدگی ورق روی برگشت‌فنری بررسی شده است. نشان داده شد، فشار تماس بیشترین تاثیر در مقدار برگشت‌فنری دارد. طاهری‌زاده و همکاران [۱۱]، به روش شبیه‌سازی و آزمایش تجربی برگشت‌فنری را در فرآیند شکل‌دهی مقطع کانالی با ترمز کشش برای ورق‌های آلومینیومی با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی بررسی کردند. در این بررسی از تابع تسلیم هیل ۴۸ درجه ۲ و دو مدل سخت‌شوندگی همسانگرد و ترکیبی غیرخطی استفاده شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که هنگام بارگذاری چرخه‌ای سخت‌شوندگی همسانگرد نمی‌تواند به درستی برگشت‌فنری را پیش‌بینی کند، در صورتی که سخت‌شوندگی ترکیبی غیرخطی برگشت‌فنری را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. لی و همکاران [۱۲]، تاثیر معادلات ساختاری را روی دقت پیش‌بینی برگشت‌فنری در آهنگری کاری سرد با حالات تغییر شکل مختلف بررسی کردند. آنها برای توصیف رفتار تسلیم مواد مورد آزمایش از دو تابع تسلیم هیل ۴۸ و بارلات Yld2000-2d استفاده کردند. برای توصیف رفتار سخت‌شوندگی نیز از دو مدل سخت‌شوندگی همسانگرد و سینماتیک استفاده شده است. نشان دادند که نتایج پیش‌بینی برگشت‌فنری معیار Yld2000-2d دقیق‌تر از معیار هیل ۴۸ است. لیو و همکاران [۱۳]، برگشت‌فنری لوله جدارنازک با مقطع مستطیلی را در فرآیند خمش کششی دورانی با در نظر گرفتن تغییرات ضریب کشسانی در اثر بارگذاری و باربرداری را بررسی کردند. نشان دادند در نظر گرفتن تغییرات ضریب کشسانی و مدل

¹ Reverse Loading

² Bauschinger Effect

منحنی تنش- کرنش در بارگذاری و باربرداری نشان داده شده است.

این مدل دو سطح را فرض می‌کند، سطح تسلیم f و سطح محصور کننده F ، برای سطح تسلیم از مدل سخت شونده تنه سینماتیک و برای سطح محصور کننده از مدل سخت شونده ترکیبی همسانگرد و سینماتیک استفاده کردند. معادلات (۱) و (۲) به ترتیب سطح تسلیم و سطح محصور کننده را بیان می‌کنند [۱۷].

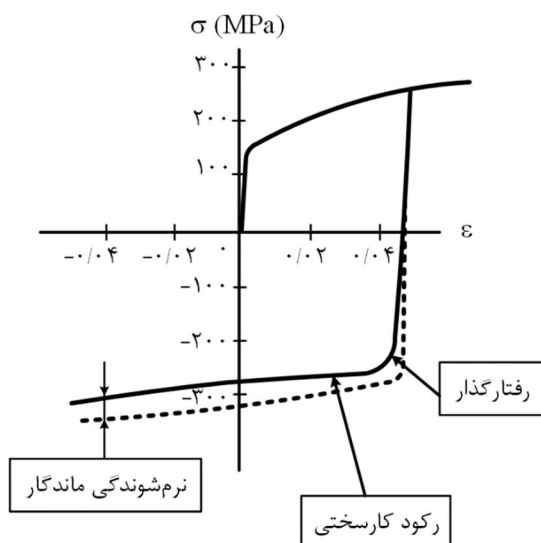
$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} \|S - \alpha\| - \sigma_0 = 0 \quad (1)$$

$$F = \sqrt{\frac{3}{2}} \|S - \beta\| - (R - B) = 0 \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، S تانسور تنش کوشی، β مرکز سطح محصور کننده، α تنش برگشتی، σ_0 تنش تسلیم اولیه، B اندازه اولیه سطح محدود کننده و R اندازه اولیه سخت‌شوندگی همسانگرد است. معادله (۳) قانون جریان را نشان می‌دهد که ε_p نرخ کرنش مومسانی است. معادله (۴) تنش برگشتی را نشان می‌دهد که α_* جابجایی نسبی سطح تسلیم نسبت به سطح محصور کننده است [۱۷].

$$\varepsilon_p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_* + \beta \quad (4)$$



شکل ۱- نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش در یک تغییر شکل رفت و برگشت در حالت تک محوره

سخت شونده‌گی همسانگرد سويفت دقت پيش‌بینی برگشت‌فتری نسبت به حالت ضریب کشسانی ثابت در حدود ۱۸/۰۲ درصد بهبود می‌یابد. لیو و همکاران [۱۴]، یک ضریب ریاضی با در نظر گرفتن ضریب کشسانی غیر ثابت برای پیش‌بینی برگشت فتری در فرآیند شکل‌دهی سرد توسعه دادند. نشان دادند که مقدار ضریب کشسانی مربوط به فولاد DP980 تا ۲۷ درصد در کرنش مومسانی ۰/۱ کاهش یافت. دقت برگشت‌فتری محاسبه شده با استفاده از ضریب کشسانی غیرخطی به صورت قابل توجهی تا ۱۸٪ مدل ماده سويفت بهبود پیدا کرد.

در این مقاله، با استفاده از آزمایش کشش- فشار تناوبی به صورت تجربی و استفاده از نرم‌افزار LS-OPT پارامترهای مدل سخت‌شونده‌گی یوشیدا یومری برای فولاد St37 بدست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna، اثر مدل سخت‌شونده‌گی یوشیدا یومری بر پیش‌بینی برگشت فتری و شکل نهایی یک مقطع کمانی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد بررسی شد. نشان داده شد، در نظرگرفتن مدل یوشیدا یومری باعث پیش‌بینی دقیق برگشت‌فتری و شکل نهایی می‌شود.

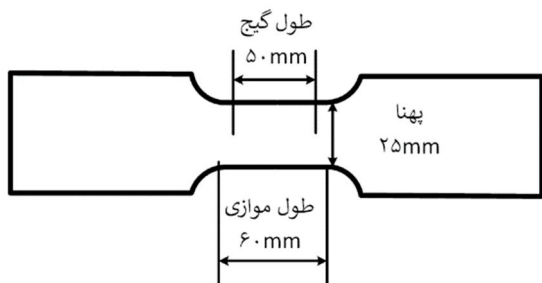
۲- انتخاب تابع تسلیم

توابع تسلیم زیادی برای بررسی رفتار کشسانی-مومسانی ورق فلزی ارائه شده است. توابع تسلیم با توجه به مدل کردن رفتار همسانگرد و ناهمسانگرد متفاوت هست. طبق نتایج محققین دیگر از جمله چنگ و همکاران [۱۵]، در نظر گرفتن رفتار ناهمسانگردی بر دقت پیش‌بینی برگشت فتری تاثیرگذار است و تابع تسلیم هیل ۴۸ را پیشنهاد داده‌اند. با توجه به قابلیت اعمال هیل ۴۸ و مدل سخت شونده‌گی یوشیدا یومری در نرم‌افزار LS-Dyna در این مقاله از هیل ۴۸ استفاده شد.

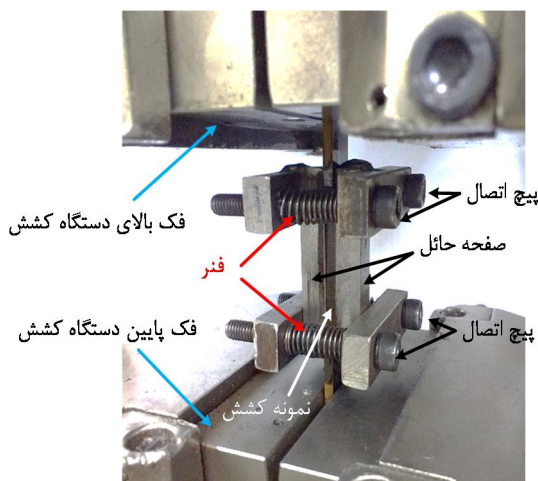
۳- مدل سخت شونده‌گی یوشیدا یومری

یوشیدا یومری [۱۶] به مدل سخت‌شونده‌گی چابوچه رکود کارسختی و مومسانی شدن زود هنگام در بارگذاری مجدد را اضافه کردند. مدل یوشیدا یومری، یک مدل سخت شونده‌گی دو سطحی است که قادر به توصیف پدیده رکود کارسختی (اثر باشینگر و نرم‌شونده‌گی) است. در شکل ۱ نمونه‌ای از

$$\dot{\alpha}_* = \frac{2}{3} c(B + R - \sigma_0) \left(\frac{S - \alpha}{\|(S - \alpha)\|} - \sqrt{\frac{\frac{3}{2} \|\alpha_*\|}{B + R - \sigma_0}} \frac{\alpha}{\|\alpha\|} \right) \|\dot{\epsilon}_p\| \quad (5)$$



شکل ۲- ابعاد نمونه استفاده شده در آزمون کشش - فشار



شکل ۳- نحو قرارگیری نمونه در دستگاه کشش - فشار

بارگذاری در آزمایش کشش ابتدا تا کرنش ۰/۰۶ به صورت کششی سپس بارگذاری فشاری تا کرنش صفر و دوباره بارگذاری کششی تا کرنش ۰/۰۶ اعمال گردید. برای اطمینان از نتایج آزمایش، آزمایش ۳ بار تکرار شد. علاوه بر این به منظور تعیین پارامترهای مدل سخت‌شوندهگی یوشیدا یومری فرایند کشش متناوب به صورت المان محدود توسط نرم افزار Ls-opt برای یک المان انجام شد، انتخاب المان و اندازه آن به پیشنهاد نرم افزار Ls-opt برای آزمون تناوب انتخاب شد. ابعاد المان در صفحه المان برابر ۱ mm و ضخامت آن برابر ۰/۱ mm در نظر گرفته شد. Ls-opt ثوابت یوشیدا-یومری را به گونه‌ای تغییر

سخت شوندهگی سینماتیک برای سطح محصور کننده از معادله (۶) بدست می‌آید. m و b ثوابت ماده هستند [۱۷].

$$\dot{\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} m \left(\sqrt{\frac{2}{3}} b \frac{S - \alpha}{\|(S - \alpha)\|} - \beta \right) \|\dot{\epsilon}_p\| \quad (6)$$

معادله (۷) سخت‌شوندهگی همسانگرد را تعریف می‌کند که R_{sat} مقدار R اشباع را نشان می‌دهد [۱۶].

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2}{3}} m (R_{sat} - R) \|\dot{\epsilon}_p\| \quad (7)$$

۳-۱- رکود کارسختی در مدل یوشیدا یومری

یوشیدا یومری برای بیان رکود کارسختی، سطح محصور کننده را به صورت معادله (۸) تعریف کردند که r و q به ترتیب مرکز و اندازه سطح محصور کننده است [۱۷].

$$g = \sqrt{\frac{3}{2}} \|S - q\| - r = 0 \quad (8)$$

۳-۲- اثر باشینگر در مدل یوشیدا یومری

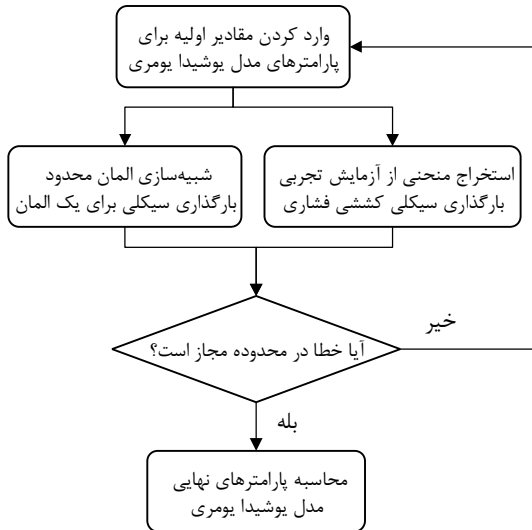
معادله (۹) اثر باشینگر را در مدل یوشیدا یومری را بیان می‌کند [۱۷].

$$\dot{q} = \frac{3(\beta - q)}{2r} \dot{\beta} (\beta - q) \quad (9)$$

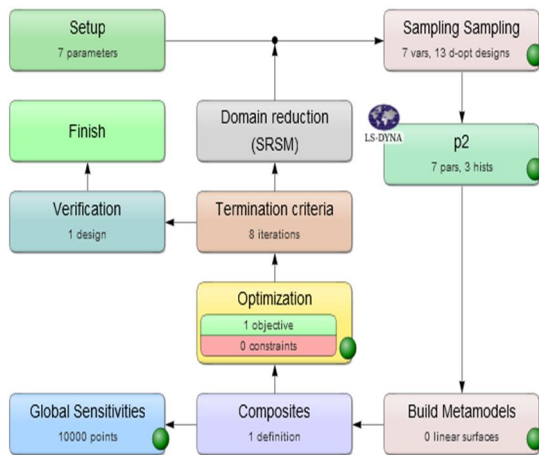
۴- آزمون فشار - کشش

برای بدست آوردن رفتار سخت‌شوندهگی و پارامترهای مدل سخت شوندهگی یوشیدا یومری فولاد St-37 از آزمایش کشش - فشار سیکلی بر اساس استاندارد ASTM E8 استفاده شد. مطابق شکل ۲ نمونه‌ای با طول گیج ۵۰ mm آماده شد.

در آزمایش کشش - فشار، قیدی مطابق شکل ۳ طراحی شد. قید طراحی شده شامل دو صفحه که توسط چهار پیچ به همراه فنر، نمونه آزمایش کشش - فشار را محصور کرده تا از پدیده کماتش جلوگیری شود.



شکل ۴- الگوریتم تعیین پارامترهای سخت شونده



شکل ۵- الگوریتم تعریف شده در نرم افزار LS-OPT

جدول ۱ - ضرایب ناهمسانگردی بدست آمده از آزمایش تجربی

نام ماده	r_{90}	r_{45}	r_0
St37	۰/۶۹۷	۰/۸۲۲	۰/۸۹۳

۶- آزمایش تجربی کمافی کردن ورق به روش شکل دهی غلتکی سرد

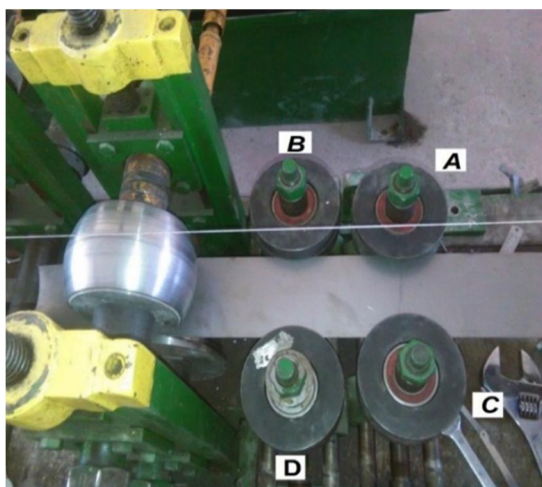
به منظور بررسی تاثیر مدل یوشیدا یومری در دقت نتایج برگشت فتری، آزمایشی تجربی فرایند شکل دهی

می دهد تا در شبیه سازی آزمایش کشش برای یک المان منحنی بدست آمده از یوشیدا یومری با منحنی بدست آمده از آزمایش تجربی کشش برابر شود. پارامترهای مدل یوشیدا یومری به گونه ای تغییر داده شد تا منحنی تنش کرنش بدست آمده از شبیه سازی کمترین اختلاف با نمودار تجربی داشته باشد. الگوریتم تعیین پارامترهای سخت شونده در شکل (۴) نشان داده شده است. در فرایند تعیین پارامترها، روش پاسخ سطح ترتیبی (SRSM) [۱۸] به عنوان مسیر تعیین پارامترها (metamodel-based) مورد استفاده قرار گرفت تا نقاط بدست آمده برای متغیرها با کمترین خطای ممکن به دست آیند [۱۹]. لازم به ذکر است، روش ترتیبی طبق پیشنهاد نرم افزار LS-top، مناسب ترین روش موجود در نرم افزار برای بدست آوردن پارامترها است. اختلاف دو منحنی بر اساس کمینه مربعات خطا بدست آمده از شبیه سازی و آزمایش تجربی، از یکدیگر به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. کمینه سازی این تابع هدف برای تعیین پارامترها مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین پارامترهای شکل (۵) الگوریتم تعریف شده در نرم افزار LS-OPT را نشان می دهد. الگوریتم تعیین پارامترها برای ۱۰ بار تکرار تنظیم شد که با تکرار ۶ بار به جواب رسید.

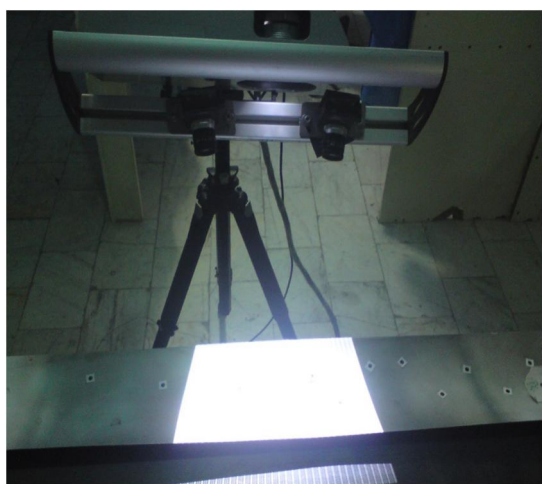
۵- آزمایش کشش برای تعیین ضرایب معیار هیل

برای بدست آوردن ضرایب معیار هیل، ضرایب ناهمسانگردی و تنش تسلیم را در راستای ۰ و ۴۵ و ۹۰ درجه نیاز است. به این منظور ۶ نمونه از ورق در راستای نورد راستای ۴۵° با راستای نورد و راستای عمود بر نورد تهیه شد. سه نمونه را تا مرحله شکست در آزمایش کشش کشیده و تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش نهایی بدست آمد، سه نمونه دیگر را تا ۲۰٪ کرنش نهایی کشیده و مقدار کرنش در راستای طولی و عرضی اندازه گیری شد و با استفاده از رابطه لنک فورد مقادیر ضرایب ناهمسانگردی r_0, r_{45}, r_{90} مطابق جدول ۱ بدست آمد. از آزمایش کشش ضریب کشسانی برابر ۲۰۲GPa، تنش تسلیم ۲۳۵MPa ضریب مقاومت (K) ۳۴۰ و ضریب کارسختی برابر ۰/۲ بدست آمد.

شکل ۱۰ توزیع تنش ون‌میسز را در انتهای شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۶- دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد مورد استفاده برای آزمایش تجربی



شکل ۷- اندازه‌گیری هندسه قطعه شکل داده شده توسط روش نوری



شکل ۸- نمونه‌ای از قطعه شکل داده شده به روش تجربی

غلتکی سرد انجام شد. غلتک‌ها از جنس M040 بوده و استحکام لازم در مقابل نیروها و فشارهای شکل‌دهی را دارد. مجموعه توسط کوپلینگ به موتوری با توان ۴۵kw و یک جعبه‌دنده متصل است. برای کنترل ورق در راستای عرضی از چهار غلتک (A-D) استفاده شده است؛ همچنین با استفاده از دو غلتک در یک دروازه ورق به صورت پروفیل کمافی شکل.

هندسه نهایی قطعات پس از برگشت فنری مهم است. هندسه قطعات شکل داده شده به روش اسکنر نوری با دستگاه به مدل Range Vision 3D scanner standard Plus اندازه‌گیری شد. این دستگاه دارای دقت 0.03mm است. در شکل ۷ دستگاه اندازه‌گیری به همراه قطعه اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. در شکل ۸ نمونه‌ای از قطعه شکل داده شده به روش تجربی نشان داده شده است.

۷- شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

برای شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد کمافی کردن ورق از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شد. به این منظور در دو مرحله شبیه‌سازی انجام شد؛ در مرحله اول شکل‌دهی به صورت صریح و در مرحله دوم برای محاسبه برگشت فنری به صورت ضمنی شبیه‌سازی انجام شد. غلتک‌ها به صورت صلب و ورق به صورت پوسته مطابق شکل ۹ مدل شدند. شعاع پروفیل سطح غلتک 150mm و پهنای غلتک 150mm در نظر گرفته شد. تماس غلتک و ورق به صورت سطح به سطح تعریف شد. ضریب اصطکاک [۲۰] برابر 0.15 در نظر گرفته شد. شرایط مرزی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که دو غلتک افقی با حرکت چرخشی خود ورق را بین خود می‌کشند. درجات آزادی غلتک به غیر از چرخش حول محور مقید شدند.

تعداد المان به گونه‌ای انتخاب شد که عدم وابستگی به مش‌بندی حاصل شود. برای بررسی عدم وابستگی به مش‌بندی بیشینه کرنش لبه معیار مقایسه مدل‌های با تعداد المان متفاوت در نظر گرفته شد، از تعداد المان کم به زیاد شبیه‌سازی تکرار شد. تعداد المانی که در دو مرحله افزایش تعداد المان تفاوت ۵ درصدی در بیشینه کرنش لبه داشت، به عنوان تعداد المان مناسب انتخاب شد. در نهایت با تعداد المان ۸۰۰۰ عدم وابستگی به مش‌بندی حاصل شد. در

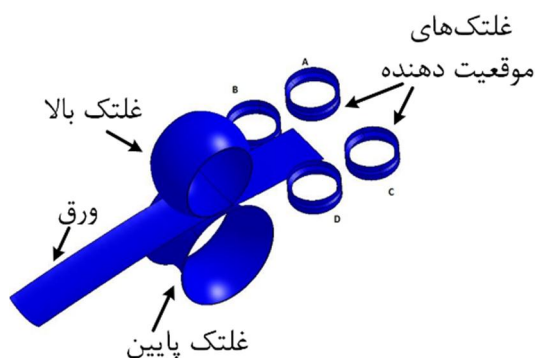
می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد.

۸-۲- تاثیر در نظر گرفتن مدل یوشیدا یومری بر پیش‌بینی برگشت فنری

برای بررسی اثر اعمال مدل یوشیدا یومری بر پیش‌بینی شکل‌نهایی پس از برگشت‌فنری در شکل‌دهی غلتکی سرد، شبیه‌سازی‌هایی با در نظر گرفتن مدل سختی شون‌دگی همسانگرد و مدل یوشیدا یومری توسط نرم‌افزار المان‌محدود Lsdyna انجام شد؛ همچنین به صورت تجربی در یک ایستگاه، ورقی به صورت کمانی شکل داده شد. در شکل ۱۲ پروفیل بدست آمده از کار تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزا محدود با در نظر گرفتن مدل سختی شون‌دگی همسانگرد و یوشیدا یومری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با در نظر مدل یوشیدا یومری نتایج شبیه‌سازی به تجربی نزدیک‌تر است.

جدول ۲- ضرایب مدل سخت شون‌دگی یوشیدا یومری بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

H	SB	RSAT	K	C	CB
۰/۱	۶۰۰	۱۹۷/۱	۳/۹	۲۷۹	۲۷۹/۱۶

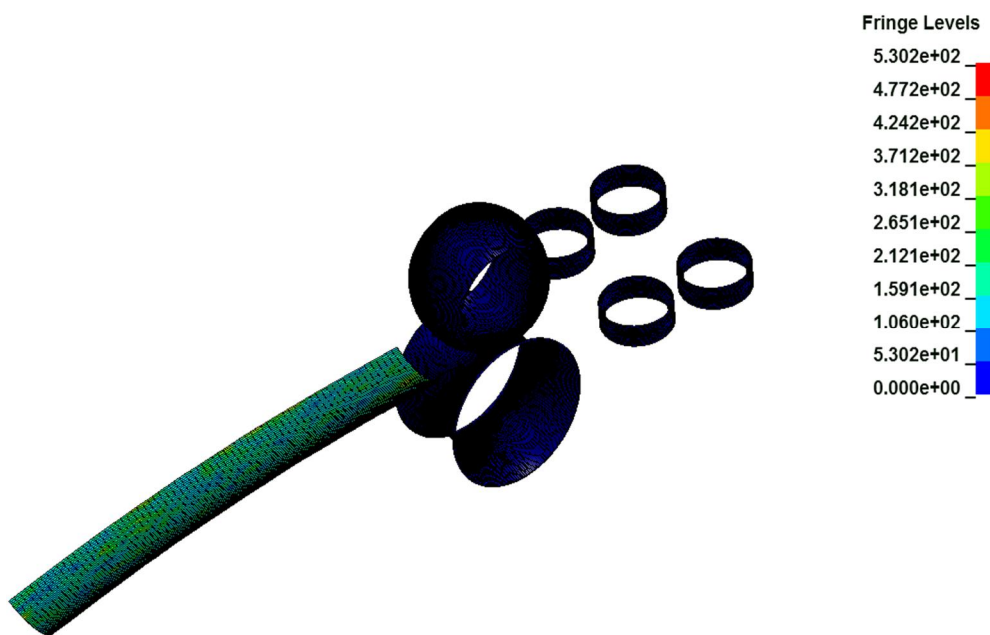


شکل ۹- مدل ایجاد شده در نرم افزار Lsdyna

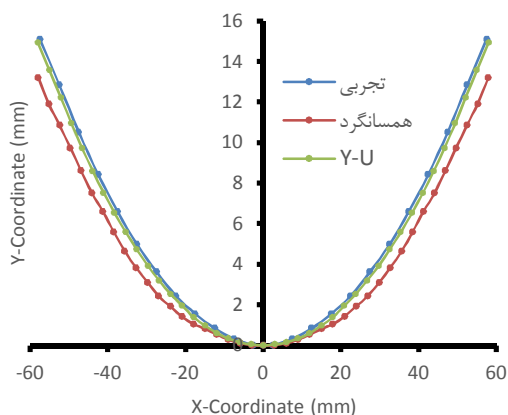
۸- نتایج و بحث

۸-۱- ضرایب مدل سخت شون‌دگی یوشیدا یومری

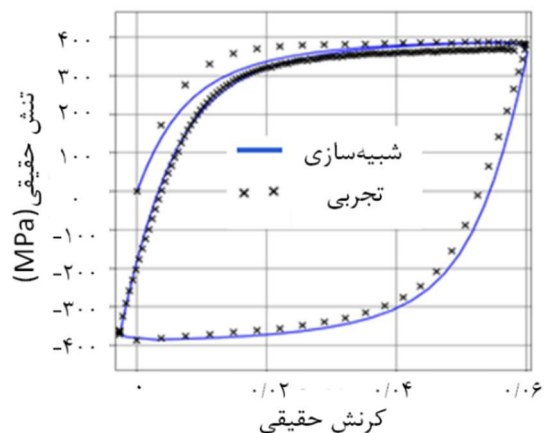
همانطور که پیشتر بیان شد، برای بدست آوردن ضرایب مدل یوشیدا یومری ورق فولادی St37 ابتدا آزمایش کشش تکراری انجام شد، سپس شبیه‌سازی اجزا محدودی با یک المان برای آزمایش کشش با استفاده از نرم‌افزار Ls-opt انجام شد. با استفاده از الگوریتم تعریف شده در نرم‌افزار Ls-opt ضرایب مدل سخت شون‌دگی یوشیدا یومری مطابق جدول ۲ بدست آمد. در شکل ۱۱ نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار Ls-opt نشان داده شده است همانطور که مشاهده



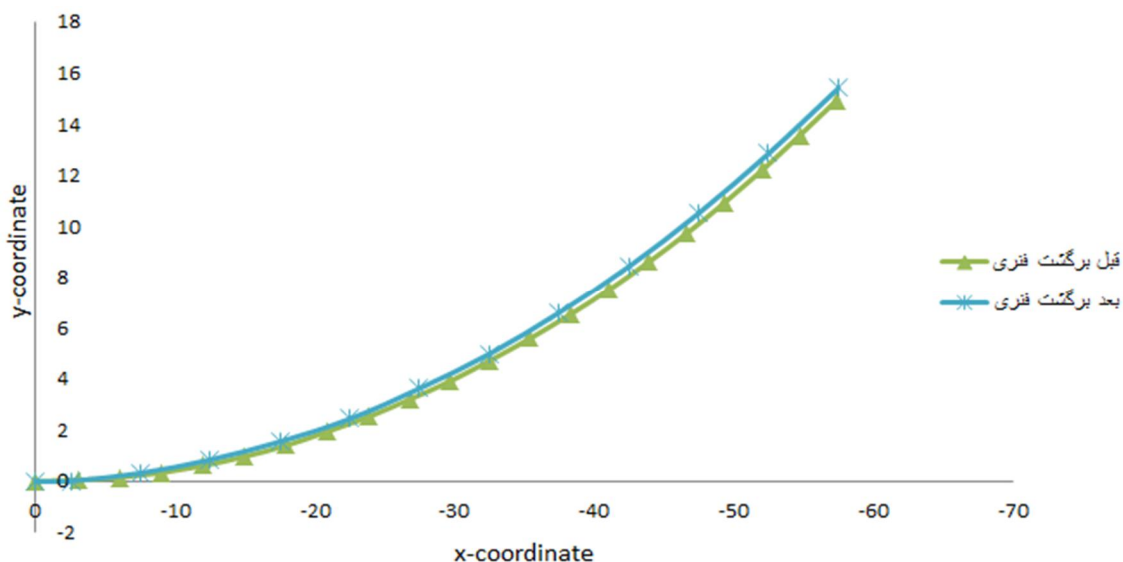
شکل ۱۰- توزیع تنش ون‌میسز در انتهای شبیه‌سازی



شکل ۱۲- مقایسه شکل هندسی روی سطح قطعه با در نظر گرفتن مدل سختی شوندهگی همسانگرد و یوشیدا یومری و کار تجربی



شکل ۱۱- منحنی تنش-کرنش بارگذاری متناوب در آزمایش تجربی و شبه سازی



شکل ۱۳- مقایسه مقطع قطعه قبل و بعد از محاسبه برگشت فنری

برای دو ضخامت ۲ و ۳ میلی کیلویی کردن ورق به روش شکل دهی غلتکی با در نظر گرفتن مدل کارسختی همسانگرد و یوشیدا یومری تکرار شد. در شکل ۱۳ نتایج تاثیر ضخامت بر خطای برگشت فنری در دو مدل کارسختی همسانگرد و یوشیدا یومری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در هر دو ضخامت مدل یوشیدا یومری خطای کمتری نسبت به مدل کارسختی همسانگرد دارد.

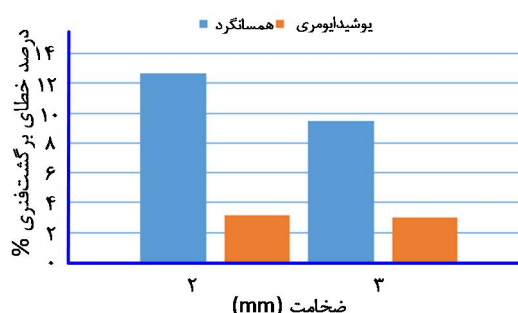
در شکل ۱۳ پروفیل مقطع قبل و بعد از محاسبه برگشت فنری با در نظر گرفتن مدل سخت شوندهگی یوشیدا یومری نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می شود، پدیده برگشت فنری کاملاً مشهود است.

در جدول ۳ مختصات لبه ورق در راستای افقی و عمودی و درصد خطای آن نسبت به واقعیت آن نشان داده شده است همانطور که مشاهده می شود، با در نظر گرفتن مدل سخت شوندهگی یوشیدا یومری خطای محاسبات کمتر شده است.

مدل یوشیدا یومری برگشت فنی و شکل‌نهایی ورق شکل داده شده از جنس St37 با دقت بالاتری نسبت به حالت همسانگرد پیش‌بینی می‌کند.

۱۰- مراجع

- [1] Perme M, Hosseinipour SJ, Jamshidi Aval H (2016) GTN damage model parameters for ductile fracture simulation in aluminum alloy 5083-O. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(1): 129-142.
- [2] Dadgar Asl Y, Tajdari M, Moslemi Naeini H, Davoodi B, Azizi Tafti R, Panahizadeh Rahimloo V (2015) Prediction of required torque in cold roll forming process of a channel sections using artificial neural networks. *Modares Mechanical Engineering* 15(7): 209-214.
- [3] Naofal J, Naeini HM, Mazdak S (2019) Effects of hardening model and variation of elastic modulus on springback prediction in roll forming. *Metals* 9(9): 1005.
- [4] Chatti S, Fathallah R (2014) A study of the variations in elastic modulus and its effect on springback prediction. *Int J Mater Form* 7(1): 19-29.
- [5] Panahizadeh V (2014) Theoretical, numerical and experimental investigation of spring bach and Prediction of fracture on cold roll forming of channel section. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran.
- [6] Banabic D (2010) Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation. Springer Science & Business Media.
- [7] Armstrong PJ, Frederick CO (1996) A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. GEGB Report RD/B/N731. Berkeley Nuclear Laboratories
- [8] Chaboche JL (2008) A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int J Plasticity* 24(10): 1642-1693.
- [9] Wiskel JB, Rieder M, Henein H (2004) Kinematic behaviour of microalloyed steels under complex forming conditions. *Can Metall Quart* 43(1): 125-136.
- [10] Zhang DJ, Cui ZS, Chen ZY, Ruan XY (2007) An analytical model for predicting sheet springback after V-bending. *J Zhejiang Univ-Sc A* 8(2): 237-244.
- [11] Taherizadeh A, Ghaei A, Green DE, Altenhof WJ (2009) Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models. *Int J Mech Sci* 51(4): 314-325.



شکل ۱۳- تاثیر مدل کارسختی بر خطای برگشت فنی در کمانی کردن ورق برای دو ضخامت ۲mm و ۳mm

جدول ۳- مقایسه نتایج موقعیت لبه ورق برای مدل‌های سخت شونده همسانگرد و یوشیدا یومری با آزمایش

تجربی

مختصات لبه ورق		درصد خطا		
مدل سخت شونده	عمودی (mm)	افقی (mm)	راستای عمودی %	راستای افقی %
تجربی	۱۵/۱	۵۷/۵	-	-
یوشیدا یومری	۱۴/۹	۵۷/۷	۰/۳	۱/۲
همسانگرد	۱۳/۲	۵۷/۹	۰/۴	۱۳/۲

۹- نتیجه گیری

مدل یوشیدا یومری به علت توصیف پدیده رکود، رفتار گذار و نرم‌شوندگی ماندگار مورد توجه محققان است. در این مقاله به منظور بررسی رفتار این مدل در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در این مقاله با استفاده از آزمایش کشش - فشار تناوبی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار LS-OPT ضرایب مدل سخت شونده یوشیدا-یومری بدست آمد. نشان داده شد که مدل یوشیدا یومری با دقت قابل قبولی منحنی تنش کرنش تناوبی را مدل می‌کند؛ همچنین ثوابت مدل یوشیدا یومری برای فولاد St37 بدست آمد. سپس برای بررسی تاثیر در نظر گرفتن مدل سخت شونده یوشیدا یومری و مقایسه با نتایج تجربی، شبیه‌سازی‌هایی با و بدون در نظر گرفتن مدل یوشیدا یومری برای فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با مقطع کمانی شکل انجام شد نشان داده شد که با در نظر گرفتن

- [16] Yoshida F, Uemori T, Fujiwara K (2002) Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *Int J Plasticity* 18(5-6): 633-659.
- [17] Yoshida F, Uemori T, Fujiwara K (2002) Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *Int J Plasticity* 18(5-6): 633-659.
- [18] Stander N, Craig KJ (2002) On the robustness of a simple domain reduction scheme for simulation-based optimization. *Eng Computation* 19(4): 431-450.
- [19] Toros S (2016) Parameters determination of Yoshida Uemori model through optimization process of cyclic tension-compression test and v-bending springback. *Lat Am J Solids Stru* 13(10): 1893-1911.
- [20] Lenard JG (2013) *Primer on flat rolling*. Newnes.
- [12] Lee MG, Kim JH, Kim D, Seo OS, Nguyen NT, Kim HY (2013). Anisotropic hardening of sheet metals at elevated temperature: Tension-compressions test development and validation. *Exp Mech* 53(6): 1039-1055.
- [13] Liu YL, Zhu YX, Dong WQ, Yang H (2013) Springback prediction model considering the variable Young's modulus for the bending rectangular 3A21 tube. *J Mater Eng Perform* 22(1): 9-16.
- [14] Liu X, Cao J, Chai X, Liu J, Zhao R, Kong N (2017) Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young's modulus variation in cold roll forming. *J Manuf Process* 29: 289-297.
- [15] Geng L, Wagoner RH (2002) Role of plastic anisotropy and its evolution on springback. *Int J Mech Sci* 44(1): 123-148.