



بررسی تحلیلی پیش بینی برگشت فنری ورق‌های دو فاز در فرآیند خمش U شکل بر اساس مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی ناهمسانگرد

اصغر زاجکانی^{1*}، حمید حاج براتی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، صندوق پستی 34148 - 96818، zajkani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

یک عامل نامطلوب که بر روی شکل نهایی و دقت ابعادی قطعات فلزی تولید شده در فرآیند شکل‌دهی سرد تأثیر می‌گذارد پدیده برگشت فنری است. یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی برگشت فنری خمش U شکل فولاد دوفازی DP780 ارائه شده است. این مدل تحلیلی بر اساس معیار تسلیم هیل 48 و شرایط کرنش صفحه‌ای است. در این مدل، تأثیر تاریخچه شکل‌دهی، نازک‌شوندگی ورق و تغییر مکان تار خنثی بر روی برگشت فنری فرآیند خمش U شکل در نظر گرفته شده است. از مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی ناهمسانگرد برای بررسی تأثیر تغییر شکل‌های پیچیده که شامل کشش، خمش و معکوس است استفاده شده است. این مدل قادر به بررسی رفتار سخت‌شوندگی پیچیده ماده شامل اثر بوشینگر، رفتار گذرا و نرم‌شوندگی ماندگار را دارد. تأثیر نیروی نگه‌دارنده ورق، ضریب اصطکاک، ضخامت ورق، ناهمسانگردی ماده و پارامترهای سخت‌شوندگی بر روی برگشت فنری ورق بررسی شده است. مشاهده می‌شود که مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله دارای دقت مطلوبی در مقایسه با حل روش اجزای محدود است و نتایج به دست آمده به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که نیروی نگه‌دارنده ورق، ضریب اصطکاک، ضخامت ورق و ناهمسانگردی ماده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پیش‌بینی برگشت فنری دارند. از آنجایی که در طول فرآیند شکل‌دهی، ورق بارگذاری معکوس را تجربه می‌کند، پارامترهای سخت‌شوندگی ماده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پیش‌بینی برگشت فنری دارند. مشاهده می‌شود که اثر بوشینگر در مقایسه با رفتار گذرا و نرم‌شوندگی ماندگار تأثیر بیشتری بر پیش‌بینی برگشت فنری دارند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 خرداد 1395
پذیرش: 18 مرداد 1395
ارائه در سایت: 16 شهریور 1395
کلید واژگان:
برگشت فنری
اثر بوشینگر، فولاد دو فاز
فرآیند خمش U شکل
سخت‌شوندگی ناهمسانگرد

Analytical consideration of springback predicting dual-phase steels sheets during U- form bending process based on anisotropic nonlinear kinematic hardening model

Asghar Zajkani*, Hamid Hajbarati

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* P.O.B. 34148 – 96818, Qazvin, Iran, zajkani@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 June 2016
Accepted 08 August 2016
Available Online 06 September 2016

Keywords:

Springback, Bauschinger Effect
Dual-Phase Steel
U-Shaped Bending Process
Anisotropic Hardening

ABSTRACT

An undesirable factor that affects the dimensional precision and final shape of metallic parts produced in cold forming processes is springback phenomenon. An analytical model is introduced to predict springback in U-shaped bending process of DP780 dual phase steel sheet. This analytical model is based on the Hill48 yield criterion and plane strain condition. In this model, the effect of forming history, sheet thinning and the motion of the neutral surface on the springback of U-shaped bending process is taken into account. The anisotropic nonlinear kinematic hardening model is used to consider the impact of complex deformation, including stretching, bending and reverse bending. This model is able to investigate the complex hardening behavior of material such as Bauschinger effect, transient behavior and permanent softening. The effect of the sheet holder force, the coefficient of friction, thickness, material anisotropy and hardening parameters on the sheet springback is studied. It can be seen that analytical model which is presented in this paper has good accuracy in the springback prediction in comparison with FEM method and results are close to experimental data. The results show that the sheet holder force, the coefficient of friction, thickness and material anisotropy have considerable influence on the springback prediction. Since, the sheet experiences a reverse loading during the forming process, hardening parameters of the material have a significant influence on the springback prediction. It can be seen that the Bauschinger effect has more influence on the springback prediction than the permanent softening and transient behavior.

Please cite this article using:

A. Zajkani, H. Hajbarati, Analytical consideration of springback predicting dual-phase steels sheets during U- form bending process based on anisotropic nonlinear kinematic hardening model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 293-302, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Zajkani, H. Hajbarati, Analytical consideration of springback predicting dual-phase steels sheets during U- form bending process based on anisotropic nonlinear kinematic hardening model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 293-302, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

یکی از مشکلات رایج در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی، تغییر شکل‌های نامطلوب ناشی از آزاد شدن تنش‌های الاستیک می‌باشد. مواد دارای استحکام بالاتر و مدول الاستیسیته پایین‌تر دارای برگشت فنری بیشتری می‌باشند. برای مثال، فولادهای استحکام بالا¹ در مقایسه با فولادهای متداول به دلیل داشتن استحکام بالاتر دارای برگشت فنری بیشتری می‌باشند. از فرآیند خمش U شکل برای تولید قطعاتی مانند کانال‌ها و قاب‌ها استفاده می‌شود. در این فرآیند ورق فلزی تغییر شکل‌های پیچیده شامل کشش-خمش و خمش معکوس را تجربه می‌کند؛ بنابراین بعد از باربرداری علاوه بر برگشت فنری، انحنای دیواره جانبی² نیز مشاهده می‌شود. روش‌های مختلفی شامل روش‌های تحلیلی [1-5]، نیمه‌تحلیلی³ [6-8] و روش‌های اجزای محدود⁴ [9-12] برای پیش‌بینی پدیده برگشت فنری استفاده می‌شوند. روش‌های اجزای محدود در مقایسه با روش‌های تحلیلی زمان‌گیر می‌باشند و همچنین نسبت به پارامترهای عددی شامل نوع و اندازه المان‌ها نیز حساس هستند. دقت پیش‌بینی برگشت فنری هنگامی که رفتار مکانیکی ماده به خوبی توصیف شود افزایش می‌یابد بنابراین میزان برگشت فنری به دو عامل اصلی وابسته است که عبارت‌اند از: تنش‌ها در ماده قبل از باربرداری و مدول باربرداری [3, 10, 13, 14]. شکل 1 منحنی تنش جاری در سطح بیرونی ورق هنگامی که حول انحنای قالب خم می‌شود را نشان می‌دهد. چهار ویژگی در این منحنی مشاهده می‌شوند که عبارت‌اند از: اثر بوشینگر⁵ [15]، رفتار گذرا⁶، نرم‌شوندگی ماندگار⁷ [16] و رکود کار سختی⁸ [5].

مدل‌های تحلیلی قبلی به دلیل استفاده از مدل ساده سخت‌شوندگی، قادر به مدل‌سازی رفتار پیچیده ماده در بارگذاری معکوس شامل رفتار گذرا و نرم‌شوندگی ماندگار نمی‌باشند. مدل تحلیلی ارائه‌شده در این مقاله از یک مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی ناهمسانگرد⁹ پدیدارشناختی استفاده کرده است که توانایی توصیف این رفتارهای پیچیده ماده را دارد. هدف اصلی در این مقاله بررسی کارایی یک مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی در یک فرآیند شکل‌دهی عملی فلزات است. برای این منظور، یک مدل تحلیلی مبتنی بر توصیف هندسه تغییر شکل و مدل سخت‌شوندگی ناهمسانگرد غیرخطی جنبشی [17]، معیار تسلیم هیل 48¹⁰ و شرایط کرنش صفحه‌ای ارائه شده است. همچنین از روش انتگرال‌گیری عددی سیمپسون¹¹ برای محاسبه برگشت فنری استفاده شده است.

2- رابطه بین تنش و کرنش در مدل سخت‌شوندگی

در مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله از مدل سخت‌شوندگی جنبشی ناهمسانگرد برای بررسی تأثیر تغییر شکل‌های پیچیده که شامل کشش، خمش و خمش معکوس است بر روی برگشت فنری فرآیند خمش U شکل استفاده شده است. این مدل سخت‌شوندگی قادر است تا اثر بوشینگر، نرم‌شوندگی ماندگار و رفتار گذرا را در طول فرآیند شکل‌دهی ماده مدل‌سازی کند. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است رابطه بین تنش و کرنش پلاستیک مؤثر در طول بارگذاری رفتی به‌صورت زیر است [17]:

$$\bar{\sigma}_{fow} = \sigma^0 + H_{iso} + \alpha_{fow} \quad (1)$$

که در آن σ^0 تنش تسلیم اولیه ماده و H_{iso} مربوط به سخت‌شوندگی همسانگرد¹² است که توسط معادله زیر محاسبه می‌شود [17]:

$$H_{iso} = Q(1 - e^{-b\bar{\epsilon}_{fow}^p}) - \frac{C_1}{\gamma_1}(1 - e^{-\gamma_1\bar{\epsilon}_{fow}^p}) \quad (2)$$

همچنین α_{fow} تنها مؤلفه غیر صفر تانسور پیش تنش¹³ در طول بارگذاری تک‌محوره است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [17]:

$$\alpha_{fow} = \frac{C_1}{\gamma_1}(1 - e^{-\gamma_1\bar{\epsilon}_{fow}^p}) + C_2\bar{\epsilon}_{fow}^p \quad (3)$$

در معادله بالا $\bar{\epsilon}_{fow}^p$ کرنش پلاستیک مؤثر¹⁴ در بارگذاری رفتی است و همچنین C_1 ، C_2 ، γ_1 و Q پارامترهای سخت‌شوندگی ماده می‌باشند که مقادیر آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.

رابطه نهایی بین تنش و کرنش پلاستیک معادل در بارگذاری تک‌محوره رفتی با جایگذاری معادله (2) و (3) در معادله (1) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma}_{fow} = \sigma^0 + Q(1 - e^{-b\bar{\epsilon}_{fow}^p}) + C_2\bar{\epsilon}_{fow}^p \quad (4)$$

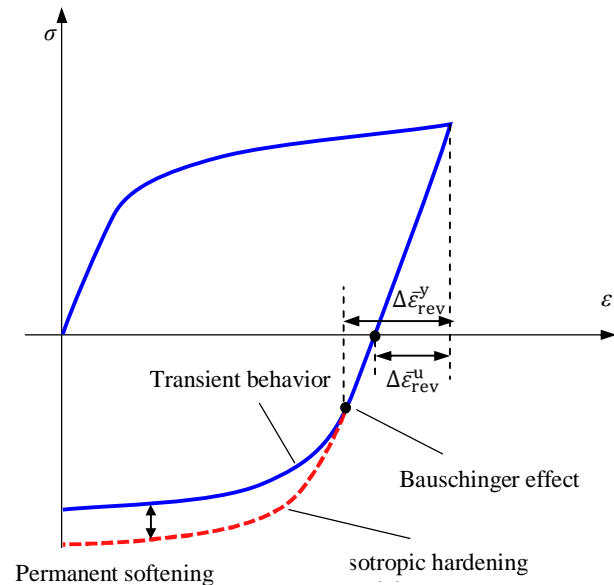


Fig. 1 Unloading curve under reverse loading to show hardening behavior, including Bauschinger effect, transient behavior and permanent softening

شکل 1 منحنی باربرداری تحت بارگذاری معکوس برای نشان دادن رفتار سخت‌شوندگی ماده شامل اثر بوشینگر، رفتار گذرا و نرم‌شوندگی ماندگار

جدول 1 پارامترهای مربوط به مدل سخت‌شوندگی ANK برای فولاد دوفازی DP780

پارامتر [14]	مقدار	واحد
b	29.9	-
Q	402	MPa
γ_1	44.1	-
C_2	124.2	MPa
C_1	10154.1	MPa
σ^0	527	MPa
$\bar{\epsilon}$	0.781	-
$\bar{\epsilon}_{lim}$	0.198	-

¹² Isotropic hardening

¹³ Backstress tensor

¹⁴ Effective plastic strain

¹ Advanced High-Strength Steels

² Sidewall curl

³ Semi-analytical

⁴ Finite element method (FEM)

⁵ Bauschinger effect

⁶ Transient behavior

⁷ Permanent softening

⁸ Work hardening stagnation

⁹ Anisotropic nonlinear kinematic hardening model (ANK)

¹⁰ Hill's 1948

¹¹ Simpson's rule

4- نازک شدگی ورق پس از فرآیند کشش-خمش

کرنش‌های مهندسی² مماسی و شعاعی در طول ضخامت ورق توسط معادلات زیر بیان می‌شوند [4]:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{r}{R_n} - 1 \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{t}{t_0} - 1 \quad (9)$$

که در آن r و R_n بیانگر شعاع انحنای سطح تحت خمش و سطح خنثی است همچنین t_0 و t به ترتیب ضخامت پیش و بعد از فرآیند کشش-خمش است. کرنش‌های مماسی و شعاعی توسط قانون بقای حجم به صورت زیر به هم مرتبط می‌شوند [4]:

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_r = 0 \quad (10)$$

بر اساس رابطه هندسی در شکل 3 معادله زیر به دست می‌آید [4]:

$$\frac{R_n}{R_m} = \frac{t}{t_0} \quad (11)$$

در معادله بالا R_m شعاع انحنای سطح میانی ورق همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_m = R_i + \frac{t}{2} \quad (12)$$

در معادله بالا R_i شعاع انحنای سطح مقعر ورق همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده می‌باشد.

5- محاسبات بعد از فرآیند کشش-خمش ورق

با استفاده از معیار تسلیم هیل 48 و فرض شماره 4 معادله زیر به دست می‌آید [18, 19]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{1+2\bar{r}}}{1+\bar{r}} |\sigma_{\theta}| = \frac{1}{G} |\sigma_{\theta}| \quad (13)$$

که در آن $\bar{\sigma}$ و σ_{θ} به ترتیب تنش مماسی و ضریب ناهمسانگردی عرضی ماده می‌باشند. ضریب G مربوط به مربوط به ناهمسانگردی در شرایط کرنش صفحه‌ای است. ضریب ناهمسانگردی عرضی در جدول 1 آورده شده است.

همچنین کرنش مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\varepsilon} = G |\varepsilon_{\theta}| \quad (14)$$

با در نظر گرفتن R_0 به عنوان شعاع انحنای سطح محدب ورق و بر اساس معادلات (4)، (8)، (13) و (14) توزیع تنش مماسی در راستای ضخامت با معادلات زیر بیان می‌شود:

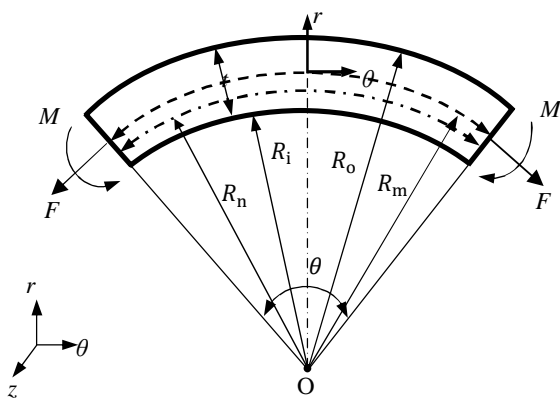


Fig. 3 The schematic of sheet stretch-bending

شکل 3 شماتیک کشش-خمش ورق

رابطه زیر برای تنش پلاستیک جاری در بارگذاری معکوس با در نظر گرفتن $\varepsilon_{\text{fow}}^p$ به عنوان کرنش پلاستیک مؤثر پیش از بارگذاری معکوس به دست می‌آید [14]:

$$\bar{\sigma}_{\text{rev}} = -\sigma_0 - H_{\text{iso}} + \alpha_{\text{rev}} \quad \varepsilon_{\text{rev}}^p > \varepsilon_{\text{fow}}^p \quad (5)$$

که در آن $\varepsilon_{\text{rev}}^p$ کرنش پلاستیک مؤثر و α_{rev} تنها مؤلفه غیر صفر تانسور پیش تنش در بارگذاری معکوس می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$\alpha_{\text{rev}} = -\frac{C_1}{\gamma_1} (1 - 2e^{-\gamma_1(\varepsilon_{\text{rev}}^p - \varepsilon_{\text{fow}}^p)} + e^{-\gamma_1 \varepsilon_{\text{rev}}^p}) - C_2 (\varepsilon_{\text{rev}}^p - 2\varepsilon_{\text{fow}}^p) \quad \varepsilon_{\text{rev}}^p > \varepsilon_{\text{fow}}^p \quad (6)$$

با جایگذاری معادلات (6) و (2) در معادله (5) رابطه نهایی زیر برای تنش پلاستیک جاری در بارگذاری معکوس به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma}_{\text{rev}} = -\sigma_0 - Q(1 - e^{-b\varepsilon_{\text{rev}}^p}) - C_2 \varepsilon_{\text{rev}}^p + \frac{2C_1}{\gamma_1} (e^{-\gamma_1(\varepsilon_{\text{rev}}^p - \varepsilon_{\text{fow}}^p)} - e^{-\gamma_1 \varepsilon_{\text{rev}}^p}) + 2C_2 \varepsilon_{\text{fow}}^p \quad \varepsilon_{\text{rev}}^p > \varepsilon_{\text{fow}}^p \quad (7)$$

3- تحلیل فرآیند کشش-خمش ورق

تغییر شکل ورق در گوشه‌های سنبه و قالب می‌تواند به صورت یک فرآیند کشش-خمش همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است با فرضیات زیر در نظر گرفته شود:

- 1- بر اساس تئوری کلاسیک ورق¹، خطوط مستقیم عمود بر تار خنثی در طول فرآیند کشش-خمش ثابت باقی می‌ماند.
- 2- عرض ورق در مقایسه با ضخامت آن به اندازه کافی بزرگ است بنابراین کرنش در راستای عرضی ε_z صفر است.
- 3- از تنش شعاعی σ_r صرف نظر می‌شود.
- 4- قانون پایستگی حجم در طول فرآیند کشش-خمش در نظر گرفته می‌شود.
- 5- در طول فرآیند خمش معکوس، ضخامت دیواره جانبی و نیروی کششی در دیواره جانبی بدون تغییر می‌ماند.

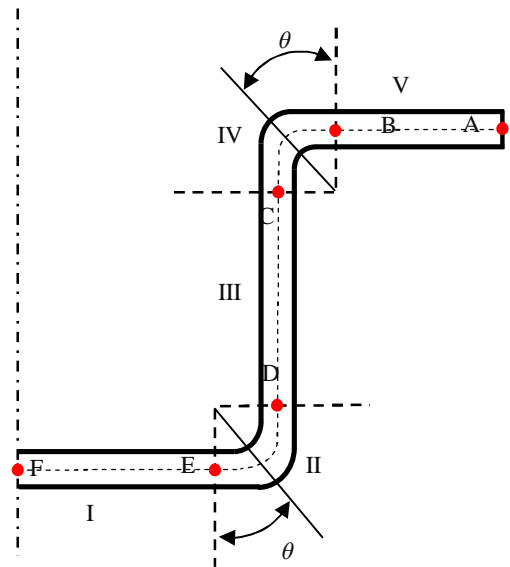


Fig. 2 The schematic of the sheet U-bending part and different regions

شکل 2 شماتیک بخش ورق خمیده شده U شکل و نواحی مختلف آن

² Engineering strain

¹ Kirchhoff-Love plate theory

که در آن M_j^e و M_j^p به ترتیب گشتاور الاستیک و پلاستیک بخش z ام ورق می‌باشند و با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$M_j^e = \int_{R_{nj}-c_j}^{R_{nj}+c_j} (\sigma_{\theta j} - \sigma_{m\theta j})(r - R_{mj}) dr \quad (20)$$

$$M_j^p = \int_{R_{ij}}^{R_{nj}-c_j} (\sigma_{\theta j} - \sigma_{m\theta j})(r - R_{mj}) dr + \int_{R_{nj}+c_j}^{R_{oj}} (\sigma_{\theta j} - \sigma_{m\theta j})(r - R_{mj}) dr \quad (21)$$

6- فرآیند کشش-خمش معکوس ورق

ورق ابتدا توسط نیروی کششی اعمال شده توسط سنبه کشیده می‌شود و سپس حول انحنای قالب خم می‌شود و سرانجام به دلیل جدا شدن از سطح تماس صاف خواهد شد. در طول فرآیند خمش معکوس، نیروی کششی به صورت یکنواخت توزیع شده است. به دلیل وجود تغییر شکل‌های پیچیده، تنش مماسی و گشتاور خمشی وابسته به مدل سخت‌شوندگی ماده است.

بر اساس فرض شماره 5، رابطه زیر برای شعاع انحنای ورق در مختصات مربوط به سنبه و قالب همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است به دست می‌آید:

$$r_p + r_d = R_{ip} + R_{id} + t_{sw} = Cv \quad (22)$$

در معادله بالا، Cv یک مقدار ثابت است و t_{sw} ضخامت دیواره جانبی است که برابر با ضخامت ورق در پایان فرآیند خمش حول انحنای قالب است. کرنش پلاستیک مؤثر که به علت خمش حول گوشه‌ی قالب در طول بارگذاری رفتی ایجاد می‌شود بر اساس معادلات (8) و (22) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\epsilon}_{fow}^p = |G\epsilon_{\theta d}| = \left| G \left(\frac{r_d}{R_{nd}} - 1 \right) \right| \quad (23)$$

همچنین، کرنش مؤثر بعد از بارگذاری معکوس که به دلیل خمش حول گوشه‌ی سنبه ایجاد می‌شود می‌تواند با استفاده از معادله زیر بیان شود:

$$\bar{\epsilon}_{rev} = |G\epsilon_{\theta p}| = \left| -G \left(\frac{r_p}{R_{nd}} - 1 \right) \right| \quad (24)$$

با در نظر گرفتن $\bar{\epsilon}_{rev}^p$ به عنوان کرنش پلاستیک مؤثر در طول بارگذاری معکوس معادله زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\epsilon}_{rev}^p = \bar{\epsilon}_{rev} - \Delta\bar{\epsilon}_{rev}^y + \bar{\epsilon}_{fow}^p \quad (25)$$

در معادله (25) $\Delta\bar{\epsilon}_{rev}^y$ معادل با تغییرات کرنش در مرحله بارگذاری معکوس است که در آن تنش جاری به مقدار تنش تسلیم در بارگذاری معکوس همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است می‌رسد. بر اساس

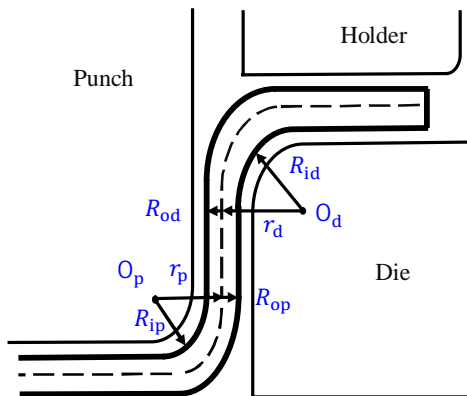


Fig. 5 Relation between blank parameters in the die and punch coordinates

شکل 5 رابطه بین پارامترهای ورق اولیه در مختصات قالب و سنبه

$$\sigma_{\theta} = \begin{cases} G(\sigma_s + Q(1 - e^{-Gb(\frac{r}{R_n}-1)})) + GC_2(\frac{r}{R_n} - 1), & R_n + c \leq r \leq R_o \\ \frac{E}{1 - \nu^2} \epsilon_{\theta} = E_1 \frac{r - R_n}{R_n}, & R_n - c \leq r \leq R_n + c \\ -G(\sigma_s + Q(1 - e^{-Gb(\frac{r}{R_n}-1)})) - GC_2(\frac{r}{R_n} - 1), & R_i \leq r \leq R_n - c \end{cases} \quad (15)$$

که در آن C نصف ضخامت ناحیه الاستیک است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \frac{G\sigma_s R_n}{E_1} \quad (16)$$

همچنین $E_1 = E/(1 - \nu^2)$ مدول یانگ در شرایط کرنش صفحه‌ای و ν نسبت پواسون¹ است.

مطابق شکل 4 تنش مماسی در صفحه میانی $\sigma_{m\theta}$ برابر با تنش ایجاد شده توسط نیروی کششی ($F = \sigma_{m\theta} \cdot t$) است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

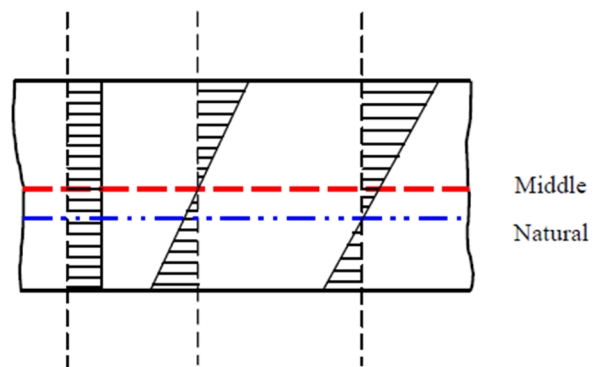
$$F = \begin{cases} G(\sigma_s + Q(1 - e^{-Gb(\frac{R_m}{R_n}-1)})) + GC_2(\frac{R_m}{R_n} - 1)t, & R_n + c \leq R_m \leq R_o \\ E_1 \frac{R_m - R_n}{R_n} t, & R_n \leq R_m \leq R_n + c \end{cases} \quad (17)$$

با جایگذاری معادله (11) در معادله (17) خواهیم داشت:

$$F = \begin{cases} G(\sigma_s + Q(1 - e^{-Gb(\frac{t_0}{t}-1)})) + GC_2(\frac{t_0}{t} - 1)t, & R_n + c \leq R_m \leq R_o \\ E_1 \frac{t_0 - t}{t} t = E_1(t_0 - t), & R_n \leq R_m \leq R_n + c \end{cases} \quad (18)$$

ضخامت ورق پس از فرآیند کشش-خمش توسط معادله (18) به دست می‌آید. همچنین شعاع تار خنثی، تنش مماسی و توزیع کرنش با استفاده از معادلات (8)، (11) و (15) به دست می‌آید. در نهایت ممان خمشی می‌تواند با استفاده از معادله زیر به دست آید:

$$M_j = M_j^e + M_j^p, \quad (j = II, IV) \quad (19)$$



$$\text{Strain of Stretching force } (F) + \text{Strain of Bending } (M) = \epsilon_{\theta}$$

Fig. 4 Scheme of stress distribution in sheet thickness during the stretch-bending process

شکل 4 طرح توزیع تنش در ضخامت ورق در فرآیند کشش-خمش

¹ Poisson's ratio

گشتاور خمشی دیواره جانبی در نقطه C همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، بر اساس معادلات (29-34) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M_C = \int_{R_{id}}^{R_{od}} (\sigma_{\theta sw} - \sigma_{m\theta}) (r - R_{md}) dr \quad (35)$$

انتگرال معادله (35) با استفاده از روش تحلیلی قابل حل نیست لذا از روش انتگرال‌گیری عددی سیمپسون در طول ضخامت استفاده می‌شود.

7- تحلیل خمش U شکل ورق

تغییر شکل در فرآیند خمش U شکل همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است به پنج ناحیه مختلف تقسیم‌بندی می‌شود.

نیروی کششی و گشتاور خمشی که به هر ناحیه اعمال می‌شود در شکل 6 نشان داده شده است. ناحیه I و V مستقیم و در تماس با لبه‌های صاف قالب و سنبه هستند.

اگرچه در واقعیت، این نواحی باید دارای انحنا باشند اما برای ساده‌سازی به دلیل صرف‌نظر کردن از گشتاور خمشی که به این دو قسمت وارد می‌شود مستقیم فرض شده‌اند. نواحی II و IV تحت کشش-خمش حول گوشه‌های سنبه و قالب می‌باشند. ناحیه III آزاد است و تغییر شکل‌های پیچیده‌ای را تجربه می‌کند. ناحیه IV ابتدا حول گوشه‌ی قالب خم می‌شود و سپس صاف می‌شود و به دیواره جانبی ورق تبدیل می‌شود. به دلیل گشتاور خمشی که به ناحیه III اعمال می‌شود این ناحیه باید دارای انحنا باشد اما در نظر گرفتن این واقعیت که فاصله بین قالب و سنبه در مقایسه با فاصله‌ی که سنبه در طول فرآیند شکل‌دهی طی می‌کند کوچک است این ناحیه مستقیم فرض می‌شود. به‌هرحال، بعد از باربرداری این ناحیه از ورق به پدیده‌ی برگشت فنری دارای انحنای نسبتاً بزرگی است.

8- محاسبه‌ی نیروی کششی ورق در نواحی مختلف آن

به منظور محاسبه‌ی نیرویی که به هر سطح مقطع عرضی ورق با زاویه θ در ناحیه IV وارد می‌شود از معادله زیر استفاده می‌شود [4]:

$$F_{IV} = \mu_d P_b e^{\mu_d \theta} \quad (36)$$

در معادله بالا، μ_d و P_b به ترتیب ضریب اصطکاک بین ورق و ابزار و نیروی نگه‌دارنده ورق می‌باشند. این معادله نشان می‌دهد که نیروی کششی ورق در گوشه‌ی قالب افزایش می‌یابد تا به مقدار بیشینه در نقطه C برسد که برابر است با:

$$F_C = \mu_d P_b e^{\mu_d \phi} \quad (37)$$

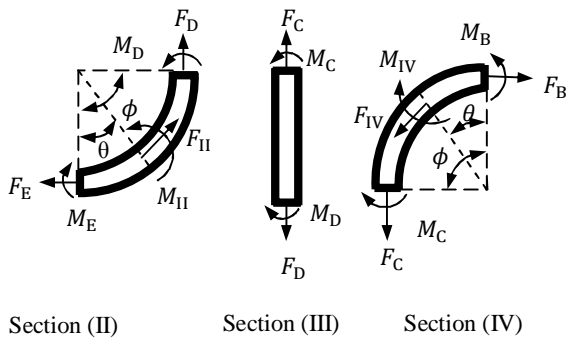


Fig. 6 Forces and momentum for different regions of sheet

شکل 6 نیروها و گشتاور در نواحی مختلف ورق

معادلات (4)، (7) و (23) مقدار آن را با استفاده از رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$\Delta \varepsilon_{rev}^y = \frac{2G \left[\sigma_c + Q \left(1 - e^{-b \bar{\varepsilon}_{fow}^p} \right) - \frac{C_1}{\gamma_1} \left(1 - e^{-\gamma_1 \bar{\varepsilon}_{fow}^p} \right) \right]}{E_1} \quad (26)$$

هم‌چنین $\Delta \varepsilon_{rev}^u$ برابر است با کرنشی که در آن تنش جاری در طول فرآیند باربرداری همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است به مقدار صفر می‌رسد. بر اساس معادلات (4) و (23) مقدار آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta \varepsilon_{rev}^u = \frac{\sigma_c + Q \left(1 - e^{-b \bar{\varepsilon}_{fow}^p} \right) + C_2 \bar{\varepsilon}_{fow}^p}{E_1} \quad (27)$$

هم‌چنین بر اساس معادلات (4)، (7)، (25-27) تنش پلاستیک مماسی در بارگذاری معکوس در قسمت دیواره جانبی ورق با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\theta rev} = G \left[\sigma_c + Q \left(1 - e^{-b \bar{\varepsilon}_{rev}^p} \right) + C_2 \bar{\varepsilon}_{rev}^p - \frac{2C_1}{\gamma_1} \left(e^{-\gamma_1 (\bar{\varepsilon}_{rev}^p - \bar{\varepsilon}_{fow}^p)} - e^{-\gamma_1 \bar{\varepsilon}_{rev}^p} \right) - 2C_2 \bar{\varepsilon}_{fow}^p \right] \quad (28)$$

برای محاسبه گشتاور خمشی، ضخامت ورق را به سه زیر بازه به صورت زیر تقسیم می‌کنیم:

1-6- زیر بازه اول:

$$R_{id} < r_d < R_{nd} - c$$

الف) چنانچه $R_{nd} - c > R_{rev}^y$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma_{\theta sw} = \begin{cases} E_1 (\varepsilon_{\theta p} - \Delta \varepsilon_{rev}^u), & R_{rev}^y < r_d < R_{nd} - c \\ \sigma_{\theta rev}, & R_{id} < r_d < R_{rev}^y \end{cases} \quad (29)$$

ب) چنانچه $R_{nd} - c < R_{rev}^y$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma_{\theta sw} = \sigma_{\theta rev}, \quad R_{id} < r_d < R_{nd} - c \quad (30)$$

در معادله بالا R_{rev}^y معادل شعاع انحنایی است که تسلیم در ناحیه پلاستیک در طول فرآیند بارگذاری کششی معکوس اتفاق می‌افتد. از آنجایی که در طول بارگذاری معکوس تسلیم هنگامی اتفاق می‌افتد که $\bar{\varepsilon}_{rev}^p = \bar{\varepsilon}_{fow}^p$ و بر اساس معادلات (24) و (26) مقدار آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\left| \left(\frac{r_d}{R_{nd}} - 1 \right) \right| = \Delta \varepsilon_{rev}^y \quad (31)$$

2-6- زیر بازه دوم:

$$R_{nd} - c < r_d < R_{nd} + c$$

$$\sigma_{\theta sw} = 0, \quad R_{nd} - c < r_d < R_{nd} + c \quad (32)$$

3-6- زیر بازه سوم:

$$R_{nd} + c < r_d < R_{od}$$

الف) چنانچه $R_{rev}^y > R_{nd} + c$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma_{\theta sw} = \begin{cases} \sigma_{\theta rev}, & R_{rev}^y < r_d < R_{od} \\ E_1 (\varepsilon_{\theta p} + \Delta \varepsilon_{rev}^u), & R_{nd} + c < r_d < R_{rev}^y \end{cases} \quad (33)$$

در معادلات بالا، R_{rev}^y برابر با شعاع انحنایی است که تسلیم در طول بارگذاری معکوس فشاری رخ می‌دهد و با حل معادله (31) به دست می‌آید.

ب) چنانچه $R_{rev}^y < R_{nd} + c$ باشد آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma_{\theta sw} = \sigma_{\theta rev}, \quad R_{nd} + c < r_d < R_{od} \quad (34)$$

بر اساس فرض شماره پنج در طول بارگذاری معکوس، ضخامت ورق ثابت باقی می‌ماند و تنش در صفحه میانی ورق بدون تغییر باقی می‌ماند.

هنگامی که نیروی کششی ورق از F_{lim} بیشتر شود موجب پارگی آن می‌شود. نیروی کششی را می‌توان با استفاده از نیروی نگه‌دارنده ورق و اصطکاک بین ورق و ابزار به دست آورد. با مقایسه نیروی کششی در نواحی مختلف ورق مشاهده می‌شود که کشش در ناحیه III بیشترین مقدار است. بیشینه نیروی نگه‌دارنده ورق را می‌توان با جایگذاری معادله (45) در معادله (37) به دست آورد:

$$P_{bmax} = \frac{F_{lim}}{\mu_d e^{\mu_a \phi}} \quad (46)$$

11- نتایج و بحث در مورد آن

از مدل تحلیلی ارائه‌شده در این مقاله می‌توان برای تحلیل فرآیند کشش-خمش دوبعدی پیشنهاد شده در مسئله معیار استفاده کرد [20]. از آنجایی که دیواره جانبی ورق خمش معکوس را تجربه می‌کند این مسئله برای آزمودن قابلیت مدل‌سازی رفتار مکانیکی ماده در بارگذاری معکوس توسط معیارهای سخت‌شوندگی مختلف مناسب است.

فرض می‌شود که زاویه برگشت فنری در نواحی II و III و IV به ترتیب برابر با θ_1 و θ_{sw} و θ_2 همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است باشند. زوایای θ_1 و θ_2 با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند [4]:

$$\theta_1 = 90^\circ + \Delta\theta_1 + \frac{\Delta\theta_{sw}}{2} \quad (47)$$

$$\theta_2 = 90^\circ + \Delta\theta_2 - \frac{\Delta\theta_{sw}}{2} \quad (48)$$

که در آن $\Delta\theta_1$ ، $\Delta\theta_2$ و $\Delta\theta_{sw}$ به ترتیب تغییرات زاویه برگشت فنری مربوط به نواحی II، III و IV ورق می‌باشند و با استفاده از معادلات (41) و (42) به دست می‌آیند. هندسه و ابعاد مسئله کشش-خمش U شکل معیار در شکل 8 نمایش داده شده است.

ورق از جنس فولاد دو فاز DP780 با ضخامت 1.4 میلی‌متر در این آزمایش استفاده شده است. نمونه‌های مستطیلی بدون پیش کرنش با عرض 30 میلی‌متر و طول 360 میلی‌متر استفاده شده‌اند [20]. در طول فرآیند شکل‌دهی، نیروی نگه‌دارنده ورق برابر با 2.94 کیلو نیوتون می‌باشد. سرعت سنبه برابر با 1 متر بر ثانیه است. همچنین میزان جابجایی سنبه پس از اولین تماس بین ورق و سنبه برابر با 71.8 میلی‌متر می‌باشد. ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق برابر با 0.1 می‌باشد. بر اساس معادله (51) بیشترین نیروی نگه‌دارنده ورق معادل 336.7 کیلو نیوتون می‌باشد. در ادامه رابطه بین

که در آن ϕ کل زاویه انحنای قالب و سنبه است. مقدار نیروی کششی در هر نقطه از ناحیه II با زاویه انحنای θ با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{II} = F_D e^{\mu_p(\theta - \phi)} \quad (38)$$

در معادله بالا، μ_p ضریب اصطکاک سنبه است. این معادله نشان می‌دهد که نیروی کششی در ناحیه II در سطح مقطع E به مقدار کمینه خود می‌رسد که برابر است با:

$$F_E = F_D e^{-\mu_p \phi} \quad (39)$$

از آنجایی که ناحیه III آزاد و بدون نیروی خارجی است، معادله زیر حاکم است:

$$F_D = F_C \quad (40)$$

توزیع نیروی کششی در راستای ضخامت ورق را می‌توان با استفاده از معادلات بالا به دست آورد. بنابراین، ضخامت ورق، شعاع تار خنثی و توزیع تنش و کرنش و گشتاور خمشی سطح مقطع را می‌توان با استفاده از معادلات مربوط به کشش-خمش مستقیم و کشش-خمش معکوس ورق به دست آورد.

9- محاسبه برگشت فنری ورق بعد از خمش U شکل

توزیع غیریکنواخت تنش در سطح مقطع عرضی ورق در طول فرآیند شکل‌دهی باعث ایجاد تغییر شکل و برگشت فنری در طول فرآیند باربرداری می‌شود. برگشت فنری در فرآیند خمش U شکل ورق در نواحی II و III و IV اتفاق می‌افتد در حالی که نواحی I و V قبل و بعد از باربرداری مستقیم باقی می‌مانند. می‌توان فرض کرد که برگشت فنری در نواحی مختلف ورق برابر با تغییر شکل ناشی از گشتاور خمشی معکوس $M(\theta)$ است. زاویه برگشت فنری در ناحیه II و IV با معادله زیر محاسبه می‌شود [4]:

$$\Delta\theta = \int_0^\phi \frac{M(\theta)}{E_1 I} R_m d\theta \quad (41)$$

از آنجایی که ورق در ناحیه III مستقیم فرض شده است بنابراین تغییر زاویه در این ناحیه با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [4]:

$$\Delta\theta_{sw} = \frac{M_C L}{E_1 I} \quad (42)$$

در اینجا $I = t^3/12$ ممان اینرسی خمشی بر واحد عرض ورق است و L طول سطح جانبی ورق است. همچنین برای محاسبه شعاع انحنای دیواره جانبی از رابطه زیر استفاده می‌شود [4]:

$$\frac{1}{\rho_{sw}} = \frac{M_C}{E_1 I} \quad (43)$$

10- محاسبه نیروی نگه‌دارنده بحرانی ورق

قابلیت خمش ورق توسط کرنش نهایی آن مشخص می‌شود. افزایش نیروی نگه‌دارنده موجب کاهش برگشت فنری می‌شود اما باعث نازک شدن ورق و افزایش کرنش کششی می‌شود. همچنین ممکن است که کرنش کششی در سطح خارجی ورق از مقدار کرنش نهایی بیشتر شود و باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح خارجی ورق شود. کمترین ضخامت ورق با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$G \left(\frac{R_{od}}{R_{nd}} - 1 \right) = \bar{\epsilon}_{lim} \quad (44)$$

معادله بالا دارای یک مقدار بیشینه در سطح خارجی است. پس از آنکه ضخامت بحرانی با استفاده از معادله بالا به دست آمد با جایگذاری آن در معادله (18) به معادله زیر می‌رسیم:

$$F_{lim} = Gb \left(\sigma_0 + Q \left(1 - e^{-Gb \left(\frac{t_0}{t_{lim}} - 1 \right)} \right) + GC_2 \left(\frac{t_0}{t_{lim}} - 1 \right) \right) t_{lim} \quad (45)$$

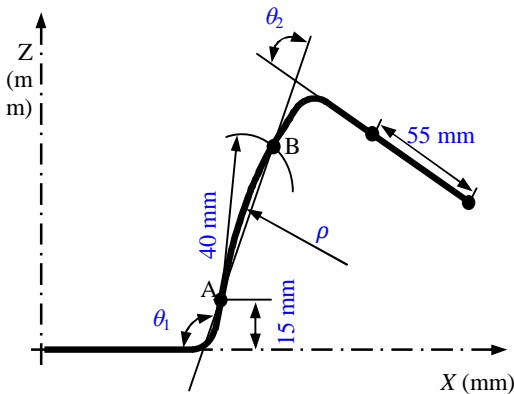


Fig. 7 Schematic for springback measurement method

شکل 7 شماتیک روش اندازه‌گیری برگشت فنری

جدول 2 زوایای برگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی بر حسب پارامترهای

مکانیکی و هندسی مختلف

Table 2 Springback angles and sidewall curvature radius for different mechanical and geometrical parameters

ρ_{sw} (mm)	θ_2 (°)	θ_1 (°)	پارامتر
112.3106	78.3076	112.5129	ضریب ناهمسانگردی
110.1944	78.0839	112.9460	0.5
108.0945	77.8534	113.3924	0.6
106.0373	77.6189	113.8470	0.7
			0.8
			ضریب اصطکاک قالب
106.4241	77.6637	113.7602	0.1
106.4165	77.6623	113.7614	0.2
106.4065	77.6605	113.7629	0.3
106.3938	77.6582	113.7648	0.4
			نیروی نگه دارنده ورق (kN)
106.3732	77.6544	113.7679	30
106.3205	77.6446	113.7758	60
106.2716	77.6353	113.7828	90
106.2267	77.6264	113.7892	120
			ضخامت ورق (mm)
80.1379	73.4281	121.3470	1
86.6491	73.4281	119.0374	1.1
93.1996	75.8218	117.0403	1.2
99.7916	76.7994	115.2962	1.3
			C_1 (MPa)
104.1815	77.2581	114.2048	5077.1
105.3152	77.4653	113.9781	7615.65
107.5073	77.8535	113.5508	12692.75
108.5643	78.0352	113.3497	15231.3
			C_2 (MPa)
106.3942	77.6280	113.7347	62.1
106.4091	77.6458	113.7475	93.15
106.4390	77.6815	113.7729	155.25
106.4539	77.6994	113.7856	186.3
			γ_1
125.1638	80.4849	110.5353	22.05
111.1685	78.4679	112.8619	33.075
104.3948	77.2974	114.1630	55.125
103.4005	77.1127	114.3645	66.15

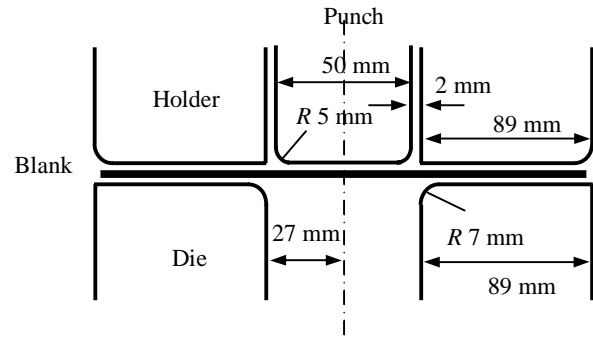


Fig. 8 Schematic of Numisheet 2011 benchmark problem 2-D draw bending

کشش-خمش دو بعدی 2011 شماتیک مسئله معیار نامیشیت شکل 8

پارامترهای برگشت فنری پیش بینی شده و پارامترهای مسئله بررسی می‌شود همچنین نتایج عددی مربوط به زوایای برگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی بر حسب پارامترهای مختلف مکانیکی و هندسی مسئله در جدول 2 آورده شده است.

شکل 9 رابطه بین پارامترهای برگشت فنری و نیروی نگه‌دارنده ورق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش نیروی نگه‌دارنده ورق تا مقادیر کمتر از 270 کیلو نیوتون تأثیری بر روی پارامترهای پیش بینی شده برگشت فنری ندارد. افزایش نیروی نگه‌دارنده ورق زوایای برگشت فنری را کاهش می‌دهد درحالی‌که شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد. چنانچه نیروی نگه‌دارنده ورق از مقدار بحرانی خود تجاوز کند موجب پاره شدن ورق می‌شود.

شکل 10 رابطه بین پارامترهای برگشت فنری و اصطکاک قالب را نشان می‌دهد. رابطه بین ضریب اصطکاک و پارامترهای برگشت فنری مشابه رابطه آن‌ها با نیروی نگه‌دارنده ورق می‌باشد. چنانچه ضریب اصطکاک ورق از مقدار بحرانی خود تجاوز کند موجب پاره شدن ورق می‌شود.

شکل 11 رابطه بین اصطکاک سنبه و زاویه برگشت فنری θ_1 را نشان می‌دهد. تغییرات ضریب اصطکاک سنبه فقط باعث تغییرات زاویه برگشت فنری در ناحیه II می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضریب اصطکاک، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد.

شکل 12 رابطه بین ضخامت اولیه ورق و پارامترهای برگشت فنری را

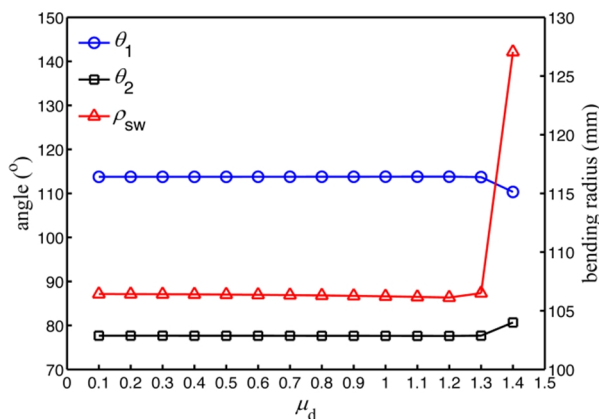


Fig. 10 Effect of the die friction coefficient on the springback parameters prediction

شکل 10 اثر ضریب اصطکاک قالب بر پیش‌بینی پارامترهای برگشت فنری

نشان می‌دهد. زوایای برگشت فنری با افزایش ضخامت اولیه ورق کاهش می‌یابد و شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد.

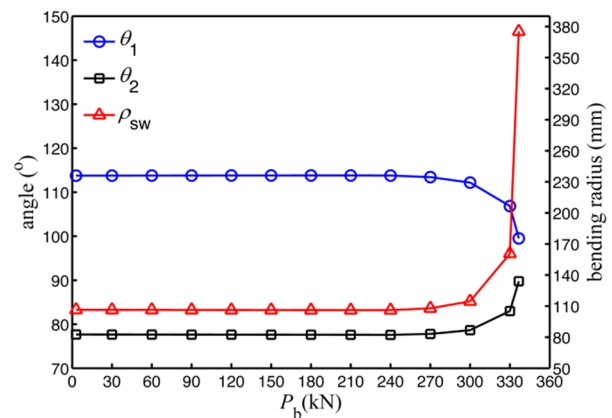


Fig. 9 Influence of the blank holding force (P_b) on the springback parameters prediction

شکل 9 اثر نیروی نگه‌دارنده ورق P_b بر پیش‌بینی پارامترهای برگشت فنری

برای ارزیابی دقت مدل تحلیلی ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده و نتایج ارائه شده در مقالات [14, 21] در شکل 14 ارائه شده است. همه پارامترهای هندسی و مکانیکی مشابه مسئله معیار می‌باشد. مشاهده می‌شود که همه پارامترهای برگشت فنری پیش‌بینی شده به غیر از انحنای دیواره جانبی به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌باشند.

پارامترهای سخت‌شوندگی C_1 و C_2 و γ_1 مربوط به رفتار سخت‌شوندگی ماده شامل اثر بوشینگر، رفتار گذرا و نرم شونده می‌باشند. بنابراین تأثیر رفتار سخت‌شوندگی بر روی برگشت فنری را می‌توان با تغییر این پارامترها بررسی کرد.

شکل 15 رابطه بین γ_1 و پارامترهای برگشت فنری را نشان می‌دهد. تغییرات پارامترهای برگشت فنری با افزایش γ_1 کاهش می‌یابند درحالی‌که با کاهش پارامتر γ_1 افزایش می‌یابند. از آنجایی‌که بخش دیواره جانبی ورق تغییر شکل‌های پیچیده شامل بارگذاری- باربرداری و بارگذاری معکوس را تجربه می‌کند می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رفتار سخت‌شوندگی ماده تحت کرنش معکوس تأثیر بیشتری بر پارامترهای برگشت فنری دارد.

شکل 16 تأثیر تغییر C_1 بر روی پارامترهای برگشت فنری را نشان می‌دهد. در مقایسه با ضرایب γ_1 و ضریب C_1 تأثیر کمتری بر روی

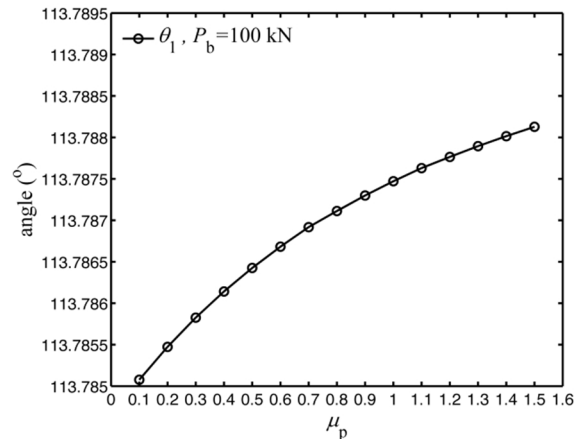


Fig. 11 Effect of the punch friction coefficient on the angle θ_1

شکل 11 اثر اصطکاک سنبه بر پیش‌بینی زاویه θ_1

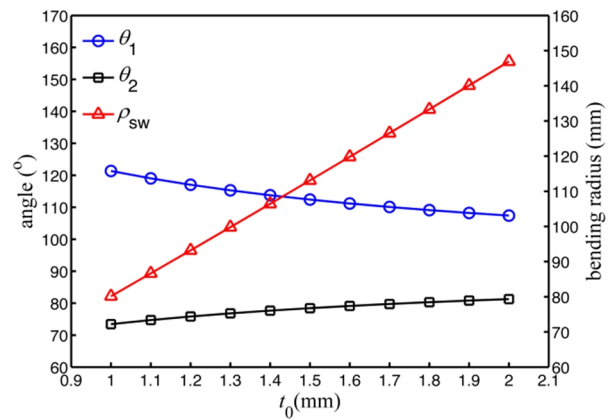


Fig. 12 Effect of the sheet thickness on the springback parameters prediction

شکل 12 اثر ضخامت ورق بر پیش‌بینی پارامترهای برگشت فنری

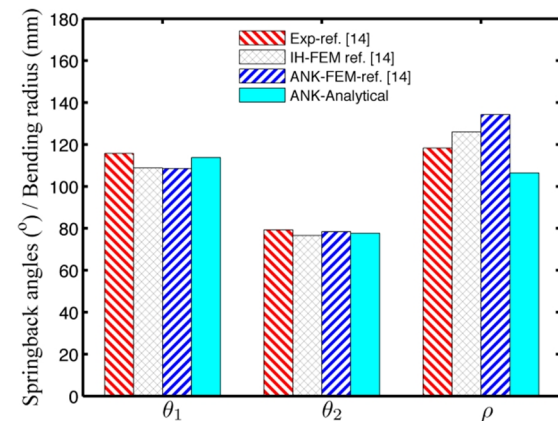


Fig. 14 Comparison of several experimental and theoretical predictions of the springback parameters based on FEM method and analytical method

شکل 14 مقایسه چندین پیش‌بینی تجربی و نظری پارامترهای برگشت فنری بر اساس روش اجزای محدود و روش تحلیلی

شکل 13 تأثیر ضریب ناهمسانگردی را بر پارامترهای برگشت فنری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که زوایای برگشت فنری با یک شیب بسیار کم افزایش می‌یابند و شعاع انحنای دیواره جانبی با افزایش ضریب ناهمسانگردی کاهش می‌یابد.

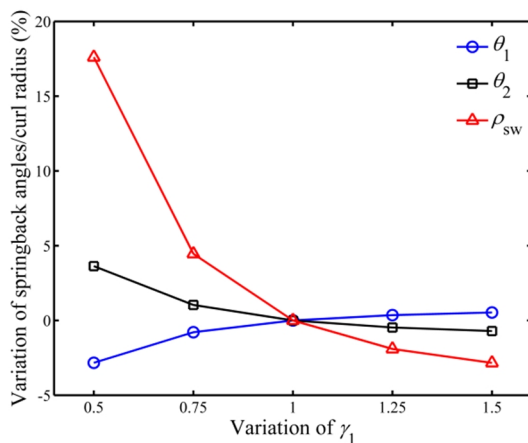


Fig. 15 Influence of γ_1 variation on the springback parameters

شکل 15 اثر تغییرات ضریب γ_1 بر پارامترهای برگشت فنری

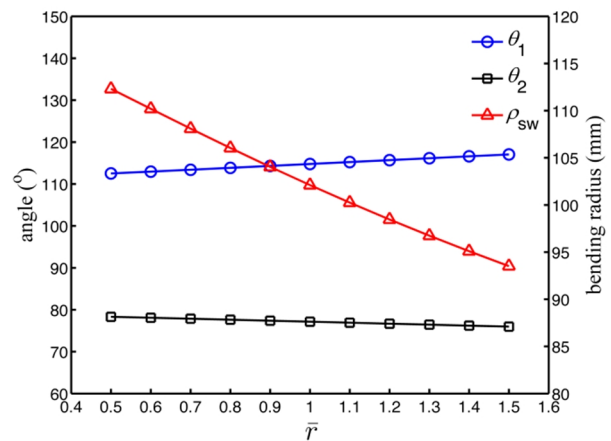


Fig. 13 Effect of the anisotropy coefficient on the springback parameters prediction

شکل 13 اثر ضریب ناهمسانگردی ورق بر پیش‌بینی پارامترهای برگشت فنری

تأثیر پارامترهای سخت‌شوندگی ماده شامل C_1 ، C_2 و γ_1 و همچنین پارامترهای هندسی و مکانیکی ماده بر روی پیش‌بینی برگشت فنری بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پارامترهای C_1 و C_2 شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش γ_1 شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش پارامترهای γ_1 و C_2 زوایای برگشت فنری افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش C_1 زوایای برگشت فنری کاهش می‌یابد. افزایش نیروی نگهدارنده ورق و ضریب اصطکاک بین قالب و ورق باعث کاهش زوایای برگشت فنری می‌شود. اصطکاک سنبه تنها بر روی زوایای برگشت فنری در ناحیه II تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش آن می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که با کاهش ضخامت اولیه ورق میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد درحالی‌که با افزایش ضریب ناهمسانگردی افزایش پیدا می‌کند.

13- فهرست علائم

C	نصف ضخامت ناحیه الاستیک
Cv	مقدار ثابت
E	مدول یانگ (GPa)
F	نیروی کششی ورق
G	ضریب ناهمسانگردی ورق در شرایط کرنش صفحه‌ای
H_{iso}	سخت‌شوندگی همسانگرد
I	ممان اینرسی سطحی ورق بر واحد عرض (mm^3)
M	گشتاور خمشی ورق
P_b	نیروی نگهدارنده ورق (kN)
r	شعاع انحنای سطح تحت خمش (mm)
\bar{r}	ضریب ناهمسانگردی ورق
t	ضخامت ورق (mm)
$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر
$\bar{\epsilon}$	کرنش مؤثر
ϕ	زاویه انحنای گوشه قالب و سنبه (degree)
θ	زاویه انحنای سطح مقطع عرضی ورق (degree)
ρ	شعاع انحنای دیواره جانبی ورق پس از برگشت فنری (mm)
ϑ	نسبت پواسون

بالانویس‌ها

p	پلاستیک
e	الاستیک

زیرنویس‌ها

rev	بارگذاری معکوس
fow	بارگذاری رفتی
p	مختصات سنبه
d	مختصات قالب
sw	دیواره جانبی ورق

14- مراجع

- [1] H.-J. Jiang, H.-L. Dai, A novel model to predict U-bending springback and time-dependent springback for a HSLA steel plate, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 5-8, pp. 1055-1066, 2015.

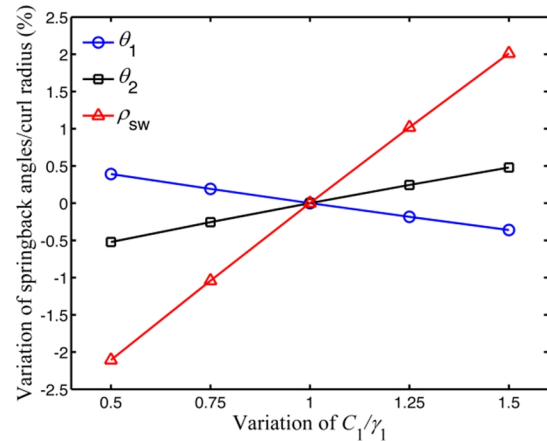


Fig. 16 Influence of C_1/γ_1 variation on the springback parameters

شکل 16 اثر تغییر پارامتر C_1/γ_1 بر پارامترهای برگشت فنری

پارامترهای برگشت فنری دارد و تغییرات تقریباً به صورت خطی می‌باشد اما تغییرات انحنای دیواره جانبی قابل ملاحظه می‌باشد. شکل 17 رابطه بین C_2 و پارامترهای برگشت فنری را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که تقریباً یک رابطه خطی بین ضریب C_2 و تغییرات زوایای برگشت فنری وجود دارد و مقدار تغییرات نسبت به دو پارامتر C_1 و γ_1 کمتر می‌باشند.

12- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل تحلیلی جدید بر اساس معیار تسلیم هیل 48 و شرایط کرنش صفحه‌ای برای پیش‌بینی پدیده برگشت فنری در فرآیند خمش U شکل ارائه شده است. از این مدل تحلیلی برای حل مسئله معیار خمش U شکل استفاده شده است و نتایج دارای دقت مطلوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. همچنین از مدل سخت‌شوندگی جنبشی غیرخطی ناهمسانگرد که دارای قابلیت توصیف رفتار سخت‌شوندگی ماده مانند اثر بوشینگر، نرم‌شوندگی ماندگار و رفتار گذرا در بارگذاری معکوس می‌باشد استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این مدل تحلیلی با نتایج حاصل از حل اجزای محدود مقایسه شده است و مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله در مقایسه با حل اجزای محدود دارای دقت مطلوبی می‌باشد.

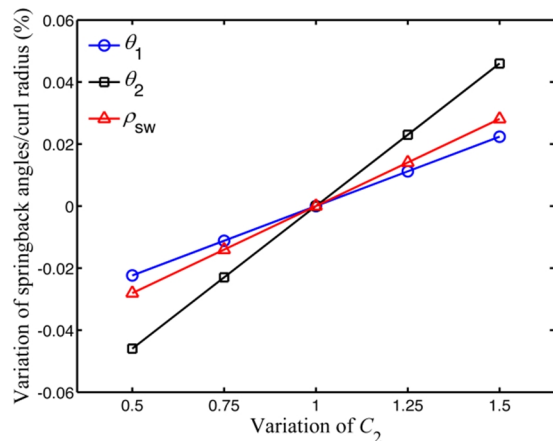


Fig. 17 Influence of C_2 variation on the springback parameters

شکل 17 اثر تغییر پارامتر C_2 بر پارامترهای برگشت فنری

2013. (in persian فارسی)
- [12] V. Panahizadeh Rahimloo, H. Moslemi Naeni, G. H. 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 فارسی)
- [13] J. Lee, J.-Y. Lee, F. Barlat, R. Wagoner, K. Chung, M.-G. Lee, Extension of quasi-plastic-elastic approach to incorporate complex plastic flow behavior-application to springback of advanced high-strength steels, *International Journal of Plasticity*, Vol. 45, No.1, pp. 140-159, 2013.
- [14] S.-I. Zang, M.-g. Lee, J. H. Kim, Evaluating the significance of hardening behavior and unloading modulus under strain reversal in sheet springback prediction, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 77, No. 1, pp. 194-204, 2013.
- [15] B. Chun, J. Jinn, J. Lee, Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory, *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, No. 5, pp. 571-595, 2002.
- [16] I. Gutierrez-Urrutia, J. Del Valle, S. Zaeferrer, D. Raabe, Study of internal stresses in a TWIP steel analyzing transient and permanent softening during reverse shear tests, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 24, pp. 6604-6610, 2010.
- [17] S. Zang, C. Guo, S. Thuillier, M. Lee, A model of one-surface cyclic plasticity and its application to springback prediction, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 53, No. 6, pp. 425-435, 2011.
- [18] R. Wagoner, Measurement and analysis of plane-strain work hardening, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 11, No. 1, pp. 165-175, 1980.
- [19] R. Hill, *The mathematical theory of plasticity*, pp. 334-345, London: Oxford, 1950.
- [20] P. D. Barros, M. Oliveira, J. Alves, L. Menezes, Pre-strain effect on springback of 2D draw bending, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, Vol. 4, No. 2, pp. 187-211, 2013.
- [21] J.-Y. Lee, J.-W. Lee, M.-G. Lee, F. Barlat, An application of homogeneous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained U-draw/bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 25, pp. 3562-3572, 2012.
- [2] N. Nanu, G. Brabie, Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 64, No. 1, pp. 11-21, 2012.
- [3] X. Yang, C. Choi, N. K. Sever, T. Altan, Prediction of springback in air-bending of Advanced High Strength steel (DP780) considering Young' s modulus variation and with a piecewise hardening function, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 105, No. 1, pp. 266-272, 2016.
- [4] D. Zhang, Z. Cui, X. Ruan, Y. Li, An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending, *Computational Materials Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 707-715, 2007.
- [5] F. Yoshida, T. Uemori, A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, No. 5, pp. 661-686, 2002.
- [6] G. Le Quilliec, P. Breitenkopf, J.-M. Roelandt, P. Juillard, Semi-analytical approach for plane strain sheet metal forming using a bending-under-tension numerical model, *International Journal of Material Forming*, Vol. 7, No. 2, pp. 221-232, 2014.
- [7] M.-G. Lee, D. Kim, R. Wagoner, K. Chung, Semi-analytic hybrid method to predict springback in the 2D draw bend test, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 74, No. 6, pp. 1264-1275, 2007.
- [8] S. Panthi, N. Ramakrishnan, Semi analytical modeling of springback in arc bending and effect of forming load, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 10, pp. 2276-2284, 2011.
- [9] C.-q. GUO, J. CHEN, J.-s. CHEN, D.-k. XU, Y.-c. BAI, Numerical simulation and experimental validation of distortional springback of advanced high-strength steel sheet metal forming, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, Vol. 44, No. 4, pp. 468-472, 2010.
- [10] H. Kim, M. Kimchi, Numerical modeling for springback predictions by considering the variations of elastic modulus in stamping advanced high-strength steels (AHSS), *The 8th International Conference and Workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes (NUMISHEET 2011)*, Seoul, Republic of Korea, June 21-26, 2011.
- [11] M. Shafiee Alavijeh, H. Torabian, S. Nazari, Investigation on parameters which affect on springback and side wall curl of U-bending of dual-phase steel plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 13-23,