

## بررسی نقش ضربی اصطکاک و نیروی تکه‌دارنده در فرآیند بازگشت فنری

## در خمش U شکل ورق‌های غیر ایزوتروپ\*

\*باداشت پژوهشی

مهران کدخدایان<sup>(۱)</sup> ریحانه اکبری<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در فرآیندهای شکل دهن ورق‌های فلزی، پیش‌بینی دقیق میزان بازگشت فنری برای طراحی ابزار شکل دهن، بسیار ضروری می‌باشد. در بسیاری از عملیات شکل دهن که قطعه تحت بارگذاری‌های مختلف است، شکل پیچیده‌ای از بازگشت فنری اتفاق می‌افتد. علت این پدیده، حلقه پخش الاستیک کریش‌های داخلی در طول عملیات بارگذاری می‌باشد. در فرآیند شکل دهن U شکل صفحات، قفعه در ابتدا تحت کشش و خمش و سپس رها سازی آن‌ها قرار می‌گیرد؛ از این‌رو، شکل نسبتاً پیچیده‌ای از بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی در آن رخ می‌دهد. در این مقاله، خمش U شکل یک ورقه غول‌ادی با استحکام بالا و دارای خاصیت غیر ایزوتروپی نرم‌مال با نرم‌افزار ELFEN شبیه‌سازی گردیده است و تأثیر عواملی مانند ضربی اصطکاک و نیروی تکه‌دارنده بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تأثیرات ضربی اصطکاک و نیروی تکه‌دارنده‌ی تقطعه کار در این فرآیند، قابل توجه می‌باشد؛ به طوری که با افزایش آن‌ها در ابتدا مقادیر برگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی افزایش می‌یابد، ولی پس از رسیدن به حد اکثر خود، مجدداً کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی** بازگشت فنری، غیر ایزوتروپ، شبیه‌سازی، ضربی اصطکاک، نیروی تکه‌دارنده.

## An Investigation into the Effect of Friction and Blank Holden Force on the Springback of U-bending of an Isotropic Plates

M. Kadkhodayan

R. Akbary

**Abstract** Accurate prediction of springback is essential for the design of tools used in sheet metal forming. One of the major causes for the production of inconsistent part is springback, the elastic recovery in the material after the tooling is removed. In this paper, the numerical simulation of springback and side wall curl in U-bending has been performed. This operation presents a complex form of springback and side wall curl occurring in sheet metal forming since the sheet undergoes stretching, bending and unbending deformations. The effects of some parameters such as coefficient of friction and blank-holder force on the springback and side wall curl are studied. The results show that the role of friction and blank-holder force in the U-bending process is considerable. For instance, springback and side-wall curl initially increase with raising the coefficient of friction and blank-holder force but they decrease again when they go beyond certain values.

**Key Words** Springback, Anisotropy, Simulation, Friction Coefficient, Blank-Holder Force.

\*نسخه اول مقاله در تاریخ ۱۱/۳/۸۳ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۲۸/۱۰/۸۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

پیچیده ارائه داد [8].

علاوه بر روش‌های تحلیلی، از روش‌های عددی و آزمایشگاهی نیز برای تعیین میزان بازگشت فنری استفاده شده است. با این حال، به کارگیری روش‌های آزمایشگاهی جهت بررسی کلیه عوامل مؤثر بر میزان بازگشت فنری، پر هزینه و گاهی بسیار دشوار است؛ لذا کاربرد روش‌های عددی بیش از پیش در حال توسعه می‌باشد. با بررسی تحقیقات انجام گرفته در سال‌های اخیر به خوبی می‌توان دریافت که در میان روش‌های عددی، روش‌های اجزای محدود (FEM) نقش عمده‌ای در مطالعه مسائل شکل دهنده داشته‌اند. با استفاده از این روش‌ها، رفتار ماده و فرآیند تغییر شکل تا سطح قابل قبولی شبیه سازی می‌شود. از این رو، به کارگیری آن‌ها در زمان طراحی ابزار شکل دهنی، هزینه‌ی تولید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینه‌ی شبیه سازی عددی انواع فرآیندهای پیچیده‌ی شکل دهنی صفحات نازک انجام شده است. از آن جمله، می‌توان به تحقیقات زو (Zhou) و هم‌کارانش در جهت کاهش زمان محاسبات (Element Bending Group) EBG [9] و روشی به نام Membrane اشاره نمود [9]. در این روش از المان (Siriam) و هم‌کارانش روش فوق را در بررسی مسائل شکل دهنی در حالت سه بعدی توسعه دادند [10]. با این حال، کاربرد این روش در تعیین مقاومت خمشی صفحات و محاسبه میزان بازگشت فنری برای مسائل سه بعدی مناسب تشخیص داده نشد. در ادامه‌ی فعالیت‌های یاد شده، پوربورگرات (Pourboghrat) و هم‌کارانش از روش هیرییدی با المان‌های Shell و Membrane برای محاسبه بازگشت فنری در فرآیندهای شکل دهنی تحت بار مقارن محوری استفاده نمودند [11].

یکی از قطعاتی که در صنعت شکل دهنی و از جمله اتومبیل سازی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد،

در فرآیندهای شکل دهنی ورقه‌ای نازک فلزی، یکی از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت قطعه‌ی کار، پدیده‌ی بازگشت فنری (Springback) است. این پدیده به صورت تغییر در شکل قطعه‌ی کار، بعد از برداشتن ابزار، نمایان می‌گردد و برای موادی که نسبت مقاومت ماده به مدلول الاستیستیته آن‌ها بالاتر است (مانند فولاد با استحکام بالا)، محسوس نر می‌باشد.

محققین بسیاری پدیده‌ی بازگشت فنری را برای ورقه‌های ایزوتروپ مورد مطالعه قرار دادند [4-1]. در برخی از این بررسی‌ها به منظور استفاده از روش‌های تحلیلی به ناچار از فرضیات ساده کننده‌ی بسیاری از قبیل وجود رابطه‌ی ساده بین تنش و کرنش، عدم وجود اصطکاک، نادیده گرفتن کم شدن ضخامت ماده، چشم‌پوشی از اثر بوشینگر و بزرگ بودن شعاع خمش در مقایسه با ضخامت استفاده شده است.

با نوآوری‌هایی که در سال‌های اخیر در فرآیندهای شکل دهنی صفحات نازک ایجاد شده است و تأکیدی که بر طراحی قطعات با کمترین وزن وجود دارد، نیاز به مواد با استحکام بالا و یا نوارهای کامپوزیتی با خواص متنوع افزایش یافته است. در این راستا یوئن (Yuen) رابطه‌ای را برای شعاع خمش بعد از بازگشت فنری، برای نوارهای چندین لایه، تعیین نمود [5]. پس از آن لیو (Leu) روشی را برای محاسبه بازگشت فنری و قابلیت خمش در حالت الاستیک-پلاستیک ورقه‌های فلزی غیرایزوتروپ در شرایط کرنش صفحه‌ای و خمش خالص ارائه داد [6]. زنگ و هو (Hu and Zhang) به این نکته اشاره نمودند که اثر بارگذاری سیکلی ماده و روش‌های محاسبه بازگشت فنری بر مقدار تنش‌ها و تنش‌های باقیمانده بسیار زیاد می‌باشد [7]. در همین رابطه گو (Gau) براساس فرضیات مدل سخت شوندگی ایزوتروپ و سینماتیکی و مدل سطح چندگانه Mroz، مدل جدیدی را برای پیش‌بینی میزان بازگشت فنری در بارگذاری‌های

کنترلی برای یک پرس هیدرولیکی کوچک، میزان برگشت پذیری را در خمین L شکل، اندازه گیری نمود [21]. هاما (Hama) از تکنیکی به نام (Nagata) در فرایند فرم دهن فلات استفاده نمود و اثر دقت در مدل سازی ابزار قالب و پانچ را در شبیه سازی برگشت پذیری فولاد با استحکام بالا مورد بررسی قرار داد [22]. اگرچه فرآیند خمین-کشش دو بعدی، توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است، با این حال هنوز هم این زمینه از نقطه نظر پژوهشی باز می باشد و انجام هرگونه تحقیقی برای مدل سازی این فرآیند در صورت تطبیق نتایج با داده های تجربی حائز اهمیت علمی و کاربردی فراوان خواهد بود. از آنجایی که فولادهای با استحکام بالا بسیار در صنعت به کار می روند و دارای برگشت پذیری های قابل ملاحظه ای می باشند، لذا در تحقیق جاری، این ماده به عنوان قطعه کار مورد تحلیل در خمین-کشش دو بعدی قرار گرفت. با توجه به نتایج انتشار یافته ای قبلی توسط سایر محققین، در این تحقیق از روش دینامیکی برای فرآیند خمین-کشش روشی را برای محاسبه ای بازگشت مدل سازی و شبیه سازی فرآیند بارگذاری و تلفیقی از روش های استاتیکی و دینامیکی برای فرآیند باربرداری استفاده شده است. هم چنین اثر بعضی از پارامترها نظری ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده بر میزان بازگشت فرنی و احنای دیواره جانبی، بررسی گردیده است.

### چگونگی رفتار ماده و مدل مکانیکی

فولاد با استحکام بالا دارای سخت شوندگی کرنشی است و رابطه ای بین تنش مؤثر و کرنش پلاستیک به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (6)$$

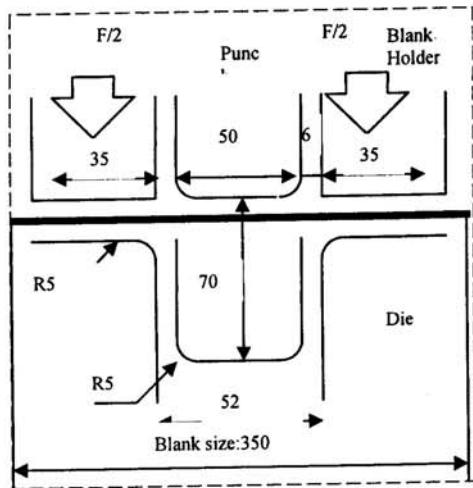
در این معادله  $\sigma$  تنش مؤثر، K ضریب مقاومت ماده،  $\epsilon_p$  کرنش پلاستیک،  $\epsilon_0$  ثابت تجربی و n توان کار سختی ماده است. رفتار ماده، ایزوتروپیک صفحه ای و غیر ایزوتروپیک نرمال فرض گردیده است که با پارامتر ۲ به شکل ذیل تعریف می گردد:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (7)$$

قطعات L شکل می باشد. دو اثر نامطلوب بازگشت فرنی و احنای دیواره جانبی (Side – Wall Curl) بر بسیاری را متوجه رفع این اثرات نموده است. احنای دیواره جانبی، پدیده ای است که نتیجه ای تغییر شکل پیچیده کشش، خمین و رها سازی آنها می باشد و در دیواره قطعات تغییر شکل یافته رخ می دهد. مطالعات بسیاری در مورد چگونگی مدل سازی این نوع فرآیند شکل دهن و علل دو پدیده مذکور و عوامل مؤثر بر آنها انجام گردیده است. ابتدا پوربقراط (Pourboghrat) و هم کارانش با استفاده از روش هیبریدی سعی در شبیه سازی این فرآیند به عمل آوردن [12,13]. میلسن (Mattiasson) نیز در سال ۱۹۹۵ فرآیند خمین به همراه کشش را برای مواد مختلف شبیه سازی کرد [14]. در سال های اخیر، لی (Li) و هم کارانش روشی را برای محاسبه ای بازگشت فرنی براساس مدل اجزای محدود با استفاده از حل کننده دینامیکی ارائه دادند [15]. در نتیجه ای تحقیق، آنها رابطه ای بین بازگشت فرنی و برخی پارامترهای طراحی براساس مدل آماری آنالیز رگرسیون تعاملی تعیین گردید. در فعالیت هایی نزدیک به موضوع تحقیق جاری، ساموئل (Samuel) اثر شعاع پانچ، شعاع قالب و مقدار غیرایزوتروپی را بر میزان بازگشت فرنی و احنای دیواره بررسی نمود [16]. لیو (Liu) و هم کارانش نیز برای جبران کاهش احنای دیواره جانبی و بازگشت فرنی در خمین کشش قطعات U شکل، استفاده از نیروی نگهدارنده متغیر را پیشنهاد نمودند [17,18]. راگایی (Ragai) اثر مقدار غیر ایزوتروپی را در برگشت پذیری و رقه های فولاد ضد زنگ، ۴۰ به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داد [19]. دان جوان (Dongjuan) با استفاده از یک روش تحلیلی، اثر روابط مختلف سخت شوندگی ماده و نیروی اصطکاک و نیروی نگهدارنده را بر میزان برگشت پذیری، مورد مطالعه قرار داد [20]. سان (Sun) با استفاده از یک سیستم

ب: نیروی پانچ (**Punch movement**). از تابع زیر برای جابه‌جایی پانچ استفاده گردیده است[23]:

$$u(t) = \frac{u(p)}{T_1} \left( t - \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right) \right)$$



شکل ۱ شماتیک هندسی مسئلهٔ خمث کشی دو بعدی

مزایای استفاده از تابع فوق، این است که در ابتدا و انتهای حرکت پانچ، شتاب صفر است و در نتیجهٔ اثرات دینامیکی، شتاب مثبت و منفی کاهش می‌یابد. شبیه سازی فرآیند شکل دهی می‌تواند با زمان‌های مختلفی برای حرکت پانچ انجام شود، ولی از آن‌جا که زمان مورد نیاز برای آنالیز مسئله با زمان کل حرکت پانچ یعنی  $T_p$  متناسب است، مقدار آن باید تا حد ممکن کاهش یابد. زمان واقعی فرآیند قالب زنی، معمولاً یک دقیقه است که استفاده از آن باعث می‌شود زمان محاسبات زیاد گردد. معمولاً زمان شبیه سازی بین  $10^{-4}$  تا  $10^{-3}$  ثانیه انتخاب می‌شود.

در این مقاله کل زمان جابه‌جایی پانچ  $s = 0.0145$  و سرعت جابه‌جایی  $m/s = 5$  انتخاب شد که در نتیجهٔ تابع جابه‌جایی پانچ به صورت زیر می‌باشد:

$$u(t) = \frac{70}{0.0145} \left( t - \frac{0.0145}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{0.0145}\right) \right)$$

اندیس‌های  $w$  و  $a$  به ترتیب نشان دهندهٔ جهت عرض و ضخامت در صفحهٔ می‌باشد. مقدار متوسط  $r$  عبارت است از:

$$R = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (8)$$

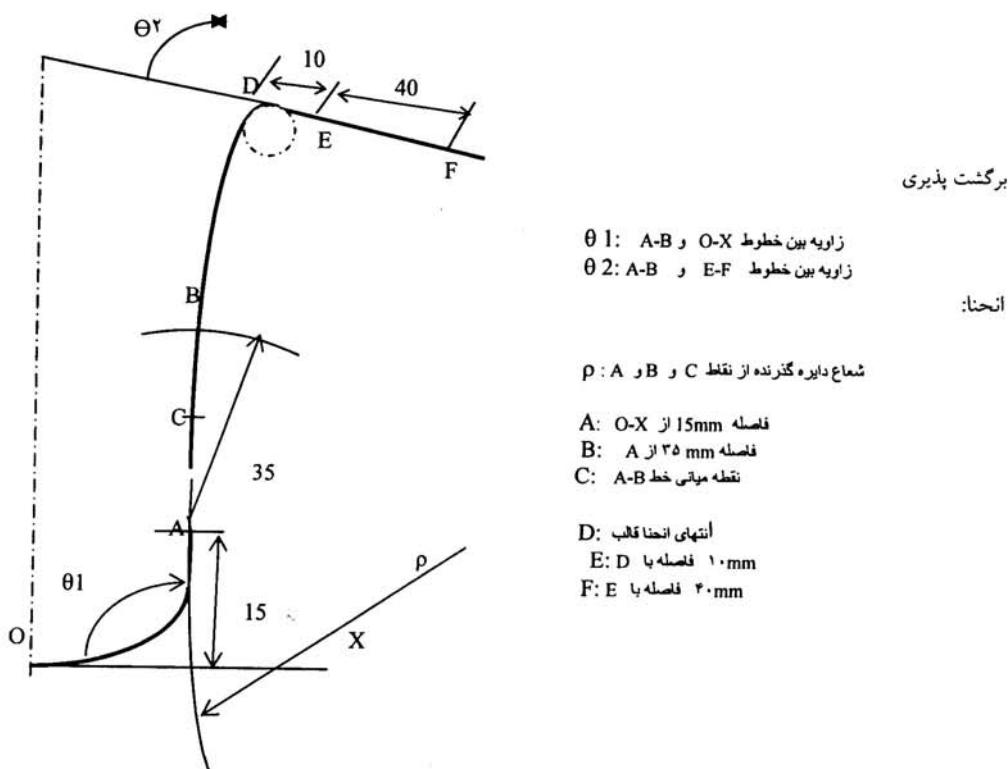
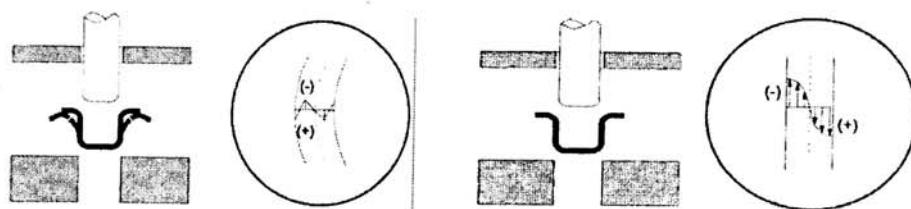
در این رابطه  $r_0$ ,  $r_{45}$  و  $r_{90}$  به ترتیب مقادیر پارامتر  $r$  در جهت‌های صفر، چهل و پنج و نود درجه نسبت به جهت نورده صفحه است.

### شبیه سازی فرآیند شکل دهی

در شکل (۱) شماتیک مسئلهٔ خمث کشی و در شکل (۲) سه کمیت معرف بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی شامل  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_m$  نشان داده شده‌اند. نقطه‌ی C بر روی دیواره‌ی قطعه‌ی بازگذاری شده قرار دارد و نشان دهندهٔ چگونگی تغییرات انحنای دیواره است. در شکل (۳) علت ایجاد انحنا در دیواره‌ی جانبی پس از برداشتن قطعه از قالب در شکل نشان داده شده است. به دلیل شکل و هندسهٔ مسئلهٔ مورد نظر می‌توان آن را به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل کرد و در این‌جا به علت تقارن مسئله، نیمی از آن مدل شده است.

در مسئلهٔ جاری ابتدا مدل هندسی مسئله ساخته می‌شود و سپس به تعریف موضوعات که عبارتند از: پانچ، قالب، نگهدارنده، ضلع بالای قطعه و ضلع پایین قطعه پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی بعد، گروههای بارگذاری تعریف می‌شوند. در این مدل سازی، ۵ گروه بارگذاری (۲ گروه جهت بارگذاری و ۳ گروه جهت بارگذاری) ایجاد شده است. این گروه‌ها عبارتند از :

**الف: فرآیند بارگذاری نیروی نگهدارنده (Blank holder pressure)** نگهدارنده به صورت جسم تغییر شکل پذیر مدل شده است و نیروی نگهدارنده به صورت یک بار فشاری بر سطح بالای آن اعمال می‌شود.

شکل ۲ روش اندازه‌گیری سه کمیت معرف برگشت پذیری و انحنای دیواره‌ی جانبی شامل:  $\theta_1$  و  $\theta_2$  و  $\rho$ 

شکل ۳ چگونگی توزیع تنش در دیواره (الف) قبل از برگشت پذیری (ب) بعد از برگشت پذیری

روش دیگری که برای محاسبه‌ی برگشت پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد به این صورت است که به ابزار حرکتی در خلاف جهت شکل دهی اعمال می‌شود و محاسبات ادامه می‌یابد تا هیچ تماسی بین ابزار و قطعه کار وجود نداشته باشد.

در این مقاله، راهکار دوم مورد استفاده قرار

تعیین میزان برگشت پذیری در فرآیندهای شکل دهی با دو روش امکان پذیر است. در روش اول ابزارها برداشته می‌شود و در هیچ گرهی تماسی وجود ندارد. این روش ظاهراً ساده به نظر می‌رسد، ولی برای جلوگیری از حرکت قطعه به صورت جسم صلب، لازم است تا شرایط مرزی جدیدی به قطعه کار اعمال شود.

جدول ۱ خواص مورد نیاز قطعه

مدول پانگ	206000 N/mm <sup>2</sup>
ضریب پراسون	0.3
دانسیته	7.8E-8 kg/mm <sup>3</sup>
تنش تسلیم محوری	261.6 N/mm <sup>2</sup>
K	680.61 N/mm <sup>2</sup>
n	0.2182
$\epsilon_0$	0.0125
R	1.66
ضخامت	2 mm

نگهدارنده به صورت ماده‌ی الستیک مدل شده و قالب و پانچ به صورت جسم صلب مدل فرض گردیدند. در این جا جهت مش بندی قطعه، المان خطی ۴ ضلعی مورد استفاده قرار گرفت. برای این‌که نتایج مدل‌سازی دقت لازم را داشته باشد، اندازه‌ی المان برای قطعه ورق R 0.2R (معادل ۱۷۵ المان) در طول ورق و ۳ المان در جهت ضخامت در نظر گرفته شد. برای قالب و پانچی که به صورت صلب در نظر گرفته شده است، در محل‌های خطی، ۱ المان در نظر گرفته شد، ولی در قسمت انحنای آن از آن‌جا که طبق مطالعات انجام شده تعداد المان‌ها بسیار مهم می‌باشد، برای هر انحنای، ۵ المان و در جهت ضخامت نیز ۱ المان انتخاب گردید. چون کمان دایره‌ای از دو انحنای تشکیل شده است، دارای ۱۰ المان می‌باشد. برای نگهدارنده، تعداد المان‌ها در ضلع افقی ۵ و در ضلع عمودی ۱۰ انتخاب شد.

### نتایج بدست آمده و بررسی آن‌ها

نتایج شبیه سازی برگشت پذیری و انحنای دیواره. شکل (۵-الف) اولین مرحله‌ی بارگذاری، یعنی اعمال نیروی نگهدارنده را نشان می‌دهد. این نیرو بر ضلع بالای نگهدارنده اعمال شده است. در شکل‌های (۵-ب) و (۵-پ) مراحل تغییر شکل قطعه در اثر اعمال نیروی پانچ مشاهده می‌گردد. همان طور که قبل اشاره شده، از حل کننده‌ی دینامیکی در فرآیند بارگذاری استفاده گردید، زیرا در این نوع حل کننده، می‌توان به صورت

گرفت، بنابراین سه مرحله دیگر شامل بازگشت پانچ، حرکت نگهدارنده و آزاد سازی قطعه انجام گرفت.

ج: بازگشت پانچ (*Punch-remove*). حرکت پانچ ابتدا با سرعت پایین انجام می‌شود تا تماس پانچ با قطعه کار از بین برود و بعد از حذف تماس، سرعت بالاتری به پانچ داده می‌شود.

د: برداشتن نگهدارنده (*Bholder-remove*). در این مرحله نگهدارنده حرکت داده می‌شود و باعث ایجاد تغییر شکل مشهودی در قطعه کار می‌گردد.

ه: آزاد سازی قطعه کار (*Ejection*). در این مرحله قطعه کار کاملاً از قالب بیرون می‌آید، سپس نوع ماده (الستیک-پلاستیک-ارتوتربوپ و یا صلب) انتخاب می‌گردد و از میان معیارهای موجود، فن مایزز ارتوتربوپ انتخاب می‌شود.

در این مقاله از فولاد با استحکام بالا برای جنس قطعه، مورد استفاده قرار گرفت. این فولادها غالباً به روش نورد تولید می‌شوند که حالت خاصی از غیر ایزوتروپی (ارتوبروپ) را دارا می‌باشند. با استفاده از تئوری هیل اگر مقدار غیر ایزوتروپی R و جهات: او ۲ و ۳، به ترتیب نشان دهنده‌ی طول و عرض و ضخامت ورق باشد، مقدار تنش تسلیم در جهات مختلف به صورت زیر خواهد بود [24]:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_Z$$

$$\sigma_{33} = \sigma_Y \sqrt{\frac{1+R}{2}}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = \frac{\sigma_Z}{\sqrt{3}}$$

برخی از خواص مورد نیاز در جدول (۱) نشان داده شده است. فرض می‌شود ماده دارای سخت شوندگی غیر خطی است و رابطه‌ی بین تنش مؤثر و کرنش پلاستیک به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$$

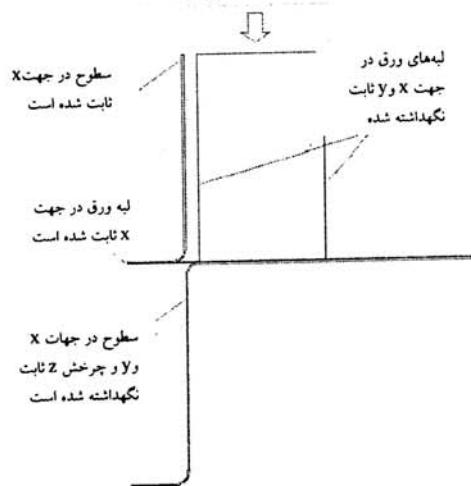
[14] This study	96.665	82.41	202.6
--------------------	--------	-------	-------

### اثر ضریب اصطکاک بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره

تأثیر اثر ضریب اصطکاک بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره در شکل های (۱) و (۷) نشان داده شده است. چنان‌چه از نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد، در مقادیر کوچک ضریب اصطکاک، با افزایش ضریب اصطکاک، به تدریج میزان برگشت پذیری نیز افزایش می‌یابد. با این حال با عبور ضریب اصطکاک از مقادیر معینی ( $0.15 = \text{م}$ ) بازگشت فنری شروع به کاهش می‌کند که در مقایسه با افزایش قبلی آن، روند کندتری دارد. با ملاحظه شکل (۷)، روش می‌گردد که شعاع انحنای در دیواره خمس ( نقطه C در شکل (۲)) نیز از روند مشابهی پیروی می‌کند و مطابق با تغییرات در میزان بازگشت فنری در قطعه کار، دچار افزایش می‌شود که این نتیجه با هندسه‌ی قطعه‌ی نهائی نیز سازگار می‌باشد. بنابراین به منظور کاهش پیدا شده ناخواسته بازگشت فنری، در مواردی که کاهش ضریب اصطکاک به مقادیر خیلی کوچک امکان پذیر نباشد، با افزایش ضریب اصطکاک می‌توان آن را تا حدودی کاهش داد. در توجیه علت فرآیند فوق، می‌توان به ترتیب ذیل استدلال کرد:

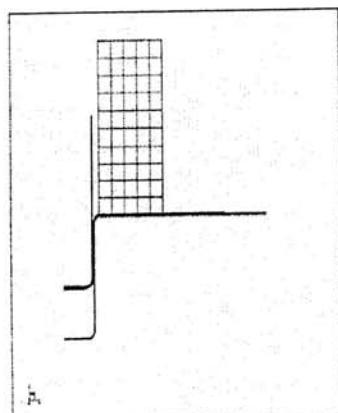
در ابتدا با افزایش ضریب اصطکاک، نیروهای غشایی- کششی ایجاد شده در قطعه، سبب محدوده شدن منطقه‌ی پلاستیک حاصل بر روی قطعه کار می‌گردد که به دلیل خمش قطعه و تنش‌های فشاری ایجاد شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، تنش‌های غشایی- کششی حاصل از اصطکاک توسعه می‌یابد و با گسترش منطقه‌ی پلاستیک، کاهش بازگشت فنری اتفاق خواهد افتاد.

مصنوعی سرعت پانچ را افزایش داد که در نتیجه زمان فرآیند شکل دهی نسبت به حل کننده استاتیکی بسیار کوتاه تر می‌شود. پس از تکمیل فرآیند بارگذاری برای تعیین شکل نهایی قطعه از روش بار برداری طبیعی استفاده شده است (به ابزار حرکتی در خلاف جهت حرکت شکل دهی اعمال می‌شود و محاسبات ادامه می‌یابد تا هیچ تعاضی بین ابزار و قطعه کار وجود نداشته باشد). در شکل (۵-ت) مرحله بازگشت پانچ نشان داده شده است و در شکل‌های (۵-ث) و (۵-ج) عمل برداشت نگهدارنده انجام شده است. با جابه‌جایی نگهدارنده، قطعه اجازه‌ی تغییر شکل پیدا می‌کند که در نهایت در شکل (۵-ج) مرحله آزادسازی قطعه کار نمایش داده شده است. در جدول زیر نتایج مدل سازی با نتایج تجربی ارائه شده در کنفرانس شکل دهی ۹۵ [14] مقایسه گردیده است.

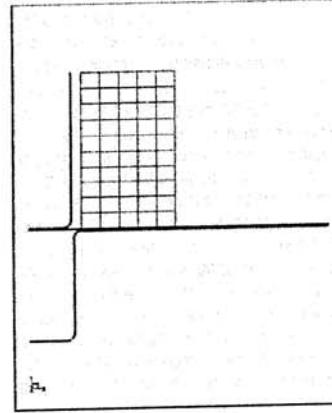
فشار اعمالی معادل  $5.091 \text{ MPa}$ 

شکل ۴ مدل ساخته شده و شرایط مرزی اعمال شده به مدل جدول ۲ مقایسه نتایج مدل سازی برگشت پذیری و انحنای دیواره

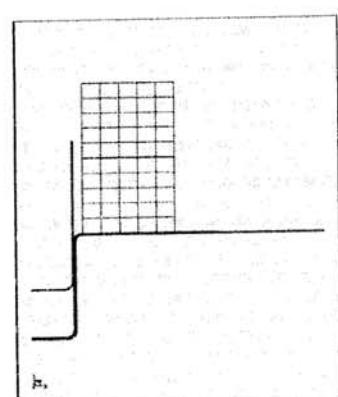
Result	$\theta_1$	$\theta_2$	P
Experimental (NUMIFORM95)	101.8	80.4	181.8



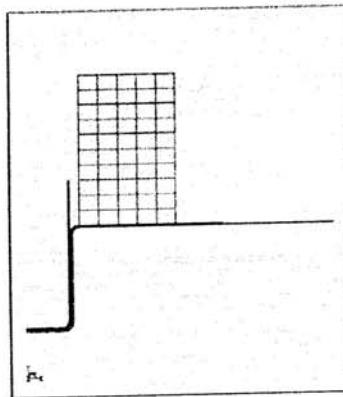
شکل ۵-ب



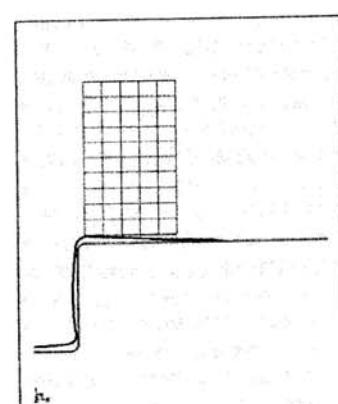
شکل ۵-الف



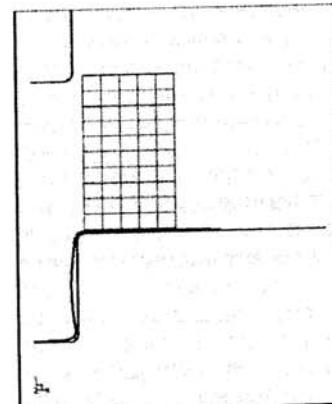
شکل ۵-ت



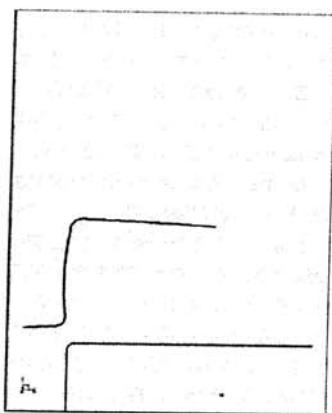
شکل ۵-پ



شکل ۵-ج

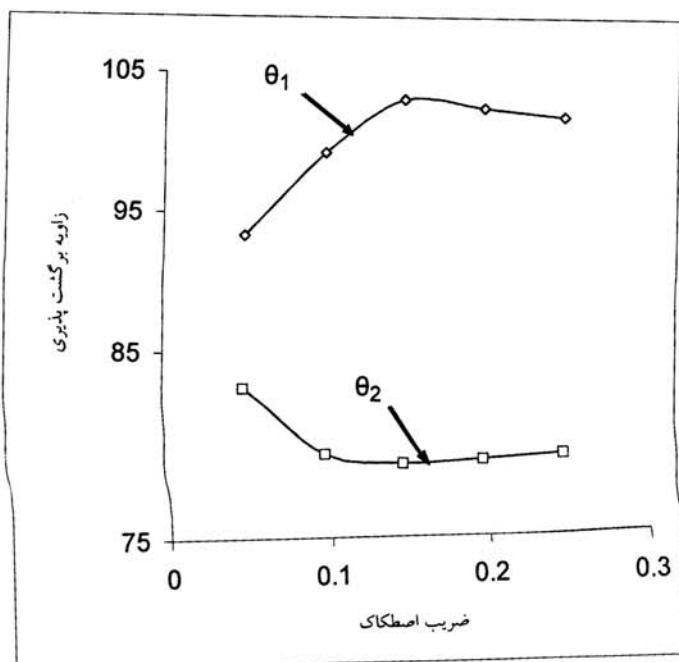


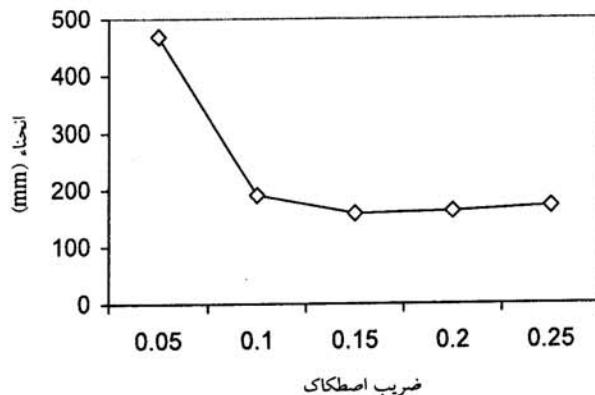
شکل ۵-ث



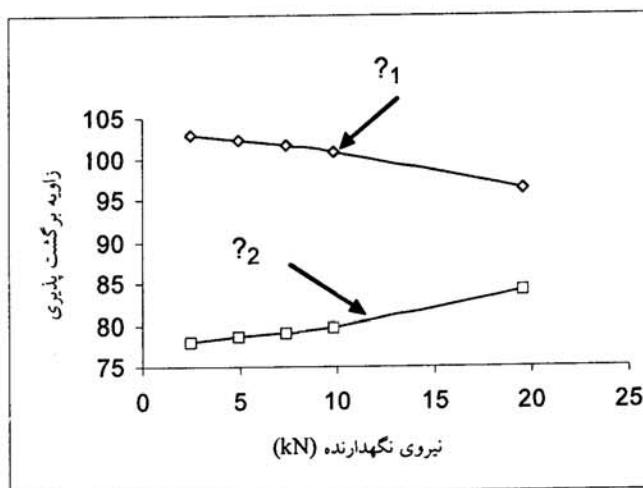
شکل ۵-ج

شکل ۵ فرآیند بارگذاری و باربرداری: (الف) اعمال نیروی نگهدارنده (مرحله اول)، (ب) اعمال نیروی پانچ (مرحله دوم)، (ب) انتهای حرکت پانچ (مرحله دوم)، (ت) بازگشت پانچ (مرحله سوم)، (ث) برداشت نگهدارنده (مرحله چهارم)، (ج) انتهای حرکت نگهدارنده (مرحله چهارم)، (ج) پس از باربرداری نهایی (مرحله پنجم).

شکل ۶ تغییرات زاویه‌های برگشت پذیری  $\theta_1$  و  $\theta_2$  نسبت به ضریب اصطکاکی



شکل ۷ نمودار تغییرات انحنا نسبت به ضریب اصطکاک

شکل ۸ تغییرات زاویه‌های برگشت پذیری  $\theta_1$  و  $\theta_2$  نسبت به نیروی نگهدارنده

مستقیمی با محدوده‌ی منطقه‌ی پلاستیک دارد. بدین ترتیب که هرچه این منطقه گسترش یافته‌تر و سطح تنش‌ها بالاتر باشد، مقدار بازگشت فنری در قطعه کاهش خواهد یافت؛ اما از آنجا که سطح تنش مؤثر خود تابعی از کرنش مؤثر است، مشاهده‌ی تغییرات کرنش نسبت به مقدار نیروی نگهدارنده می‌تواند به روشن‌تر شدن نتایج نشان داده شده در شکل (۸) منجر گردد. شکل (۹) تغییرات کرنش مؤثر در کف قطعه کار (در راستای نصف النهاری) نسبت به فاصله‌ی آن از مرکز ورق را نشان می‌دهد که برای دو نیروی

#### اثر نیروی نگهدارنده بر میزان برگشت فنری و انحنای دیواره

از آنجا که با افزایش نیروی نگهدارنده نیروهای غشایی-کششی در ورق افزایش می‌یابد، روند کاهشی برای مقدار بازگشت فنری رخ خواهد داد. استدلال ذکر شده در بخش قبل مبنی بر جگونگی افزایش منطقه‌ی پلاستیک به دلیل غلبه یافتن نیروهای غشایی-کششی در اینجا نیز کاملاً معتبر و قابل استناد می‌باشد. چنان که می‌دانیم، میزان بازگشت فنری در یک قطعه‌ی تحت تغییر شکل ایستیک-پلاستیک رابطه‌ی

بازگشت فنری و انحناء دیواره‌ی عمودی که در شکل دهی ورق‌های نازک ایجاد می‌گرددند، مورد بررسی واقع شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش ضریب اصطکاک بین قطعه کار و سطوح تماس، تا مقادیر معینی سبب افزایش بازگشت فنری می‌گردد و پس از آن، بازگشت فنری و انحناء دیواره‌ی عمودی را کاهش خواهد داد. نیروی اعمال شده از طرف نگهدارنده‌ها بر ورق نیز تأثیر نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد؛ لذا می‌توان با انتخاب مقادیر مناسبی برای ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده‌ها، پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند بازگشت فنری و نحه، بسیاری را خود داد. این بار کششی در حالی بر روی ورق قرار گرفته است که ورق هنوز تحت تنشی‌های فشاری ناشی از خمش می‌باشد؛ لذا در این قسمت و به صورت محلی، تنش‌های غشایی-کششی، منطقه‌ی پلاستیک را توجهی در شکل دهنده ورق‌های نازک فلزی باشند.

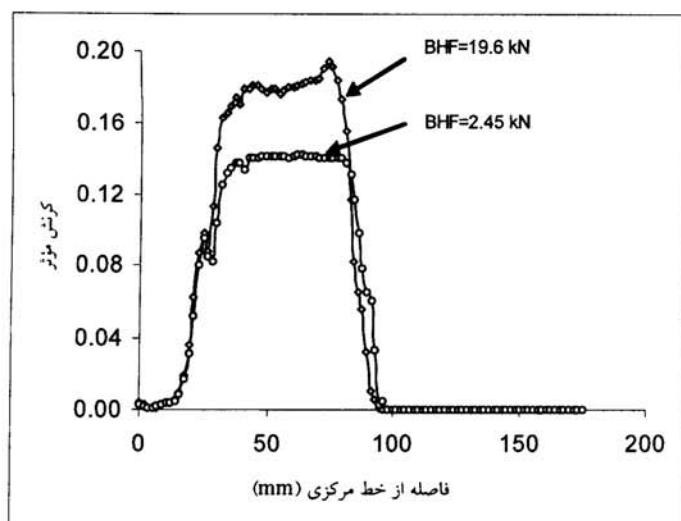
قدرتدانی از همکاری دپارتمان مکانیک دانشگاه سوانزی انگلستان به دلیل در اختیار قرار دادن نرم افزار ELFEN [25] در هنگام انجام این تحقیق، تشکر و سپاسگزاری می‌گردد.

نگهدارنده‌ی متفاوت رسم شده است.

به طور کلی می‌توان مشاهده نمود که با نیروی نگهدارنده‌ی بالاتر، کرنش مؤثر بیشتری در دیواره‌ی ورق ایجاد می‌گردد که این نتیجه در راستای نتایج اخذ شده از شکل (۸) می‌باشد و در حقیقت نشان دهنده درستی استدلال صورت گرفته در بخش پیشین است. با وجود این، بین فاصله‌ی ۸۳ تا ۹۸ میلی‌متر (در منطقه‌ی گوشی بالایی ورق) روند متفاوتی ملاحظه می‌گردد؛ بدین صورت که با اعمال نیروی نگهدارنده‌ی بزرگ‌تر (۱۹/۶ کیلو نیوتن) کشنش بیشتری در منطقه‌ی ذکر شده رخ خواهد داد. این بار کششی در حالی بر روی ورق قرار گرفته است که ورق هنوز تحت تنشی‌های فشاری ناشی از خمش می‌باشد؛ لذا در این قسمت و به صورت محلی، تنش‌های غشایی-کششی، منطقه‌ی پلاستیک را کاهش داده است.

#### نتیجه گیری

خمش U شکل اسستیک-پلاستیک ورق‌های غیر ایزوتروپیک در حالت کرنش صفحه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند



شکل ۹ تغییرات کرنش مؤثر در پایین ورق نسبت به فاصله از خط مرکزی آن

## مراجع

1. Gardiner, F.J., "The springback of metals", *Trans. ASME*, 79, pp. 1-9, (1957).
2. Johnson, W., and Yu, T.X., "Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam", *J. Mech. Work. Technol.* 6, pp. 5-21, (1982).
3. Johnson, W., and Yu, T.X., "On springback after the pure bending of beams and plates of elastic work hardening material", *Int. J. Mech. Sci.*, 23, pp. 687-696, (1981).
4. Yu, T.X., and Zhang, L.C., "Plastic Bending; Theory and Applications", World Scientific Publishing Co. Ltd, Singapore, (1996).
5. Yuen, W.Y.D., "A generalized solution for the prediction of springback in laminated strip", *J. Mats. Proc. Tech.*, 61, pp. 254-264, (1996).
6. Leu, Daw-Kwei., "A simplified approach for evaluating bend ability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", *J. Mats. Proc. Tech.*, 66, pp. 9-17, (1997).
7. Zhang, Z.T., and Hu, S.J., "Stress and Residual stress distributions in plane strain bending", *Int. J. Mech. Sci.*, 40, pp. 533-543, (1998).
8. Gau, J.T., and Kinzel, G.L., "An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback prediction", *J. Mats. Proc. Tech.*, 108, pp. 369-375, (2001).
9. Zhou, D., Sriram, S., Jinka, A., and Wagoner, R.H., "Bending and springback using membrane elements", Vol. 75, *Engineering Systems Design and Analysis*, Vol. 3, New York, ASME, pp.135-142, (1996).
10. Siriram, S., and Wagoner, R.H., "Adding bending stiffness to 3-D membrane FEM programs", *Int. J. Mech. Sci.*, 42, pp. 1753-1782, (2000).
11. Pourboghrat, F., Karabin, M., Becker, R., and Chung, K., "A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading", *Int. J. Plasticity*, 16, pp. 677-700, (2000).
12. Pourboghrat, F., and Chu, E., "Springback in plane strain stretch/draw sheet forming", *Int. J. Mech. Sci.*, 36(3), pp. 327-341, (1995a).
13. Pourboghrat, F., and Chu, E., "Prediction of springback and side wall curl in 2-D draw bending", *J. Mats. Proc. Tech.*, 50, pp. 361-374, (1995b).
14. Mattiasson, K., Strange, A., Thilderkvist, P., and Samuelsson, A., "Simulation of springback in sheet metal forming", NUMIFORM 95, pp. 115-124, (1995).
15. Li, G.Y., Tan, M.J., and Liew, K.M., "Springback analysis for sheet forming processes by explicit finite element method in conjunction with the orthogonal regression analysis", *Int. J. Solid Struc.*, 36, pp. 4653-4668, (1999).

16. Samuel, M., "Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals", *J. Mats. Proc. Tech.*, 105, pp. 382-393, (2000).
17. Liu, G., Lin, Z., Xu, W., and Bao, Y., "Variable blank holder force in U-shaped part forming for eliminating springback error", *J. Mats. Proc. Tech.*, 120, pp. 259-264, (2002).
18. Liu, G., Lin, Z., and Bao, Y., "Improving dimensional accuracy of a U-shaped part through an orthogonal design experiment", *Finite Element. Anal . Des .*, 39(2), PP.116-127,(2005).
19. Ragai, I., Lazim, D., and Nemes, A., "Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study", *J. Mats. Proc. Tech.*, 166, pp. 116-127, (2005).
20. Dongjuan, Z., Zhenshan, C., Xueyu, R., and Yuqiang, L., " An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending". *Comp. Mats Sci.*38,pp 707-715, (2007).
21. Sun. P.. Gracio, J.J., and Ferreira, J.A., "Control system of a mini hydraulic press for evaluating springback in sheet metal forming". *J. Mats. Proc. Tech.*, 176, pp. 55-61, (2006).
22. Hama, T., Nagata, T., Teodosiu, C., Makinouchi, A., and Takuda, H., "Finite-element simulation of springback in sheet metal forming using local interpolation for tool surfaces". *Int. J. Mech. Sci.*,50(2), pp.175-192, (2008).
23. Apostolos, P., Karafilis, M. and Boyce, C., "Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36(4), pp. 503-526, (1996).
24. Hill, R., "*The Mathematical Theory of Plasticity*", The Oxford University Press, Oxford, London, pp. 729-734, (1985).
25. ELFEN Level 3.0.03., "*Manual and worked examples*", Rockfield software Ltd., University of Wales Swansea, Swansea, (1998).