

## تحلیل عددی و تجربی عیب برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از معیارهای تسلیم ناهمسان‌گرد

ولی اله پناهی زاده<sup>۱\*</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۲</sup>، فرزاد سعیدی<sup>۳</sup> و سولماز افشین<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دیپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

### چکیده

فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با قابلیت تولید قطعاتی با عرض و عمق متغیر، با هدف به‌کارگیری در صنایعی همچون، خودروسازی، ساختمان‌سازی و صنایع مشابه ایجاد شد. یکی از عیوب این فرایند، عیب برگشت فنری است. این عیب باعث عدم دستیابی به پروفیل مطلوب می‌شود. در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی پدیده برگشت فنری با استفاده از معیارهای تسلیم هیل و بارلات و فون میسر پرداخته شده است؛ همچنین تأثیر پارامترهای زاویه خم، جنس و ضخامت ورق بر روی این عیب بررسی شده است. به‌وسیله زیرروال VUMAT نرم‌افزار آباکوس، فرایند برای سه جنس آلومینیوم ۱۰۵۰، فولاد کم‌کربن، فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی‌ها برای هر ماده، سه ضخامت ۰/۴، ۰/۷ و ۱ میلی‌متر با زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، انجام گرفت. صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با مقایسه نتایج تجربی انجام گرفت. نتایج نشان داد، معیار بارلات نسبت به دو معیار دیگر، پیش‌بینی دقیق‌تری از برگشت فنری دارد؛ همچنین نتایج نشان دادند که نسبت برگشت فنری ورق‌های دارای ضخامت ۰/۴ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۱ میلی‌متر برای جنس‌های فولاد کم‌کربن، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ، به ترتیب ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۲ برابر است.

**کلمات کلیدی:** شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر؛ برگشت فنری؛ روش اجزا محدود؛ معیار تسلیم ناهمسان‌گردی.

## Numerical and Experimental Analysis of Spring-back Defect in Flexible Roll Forming Process using Anisotropic Yield Criteria

V. Panahizadeh<sup>1\*</sup>, Y. Dadgar Asl<sup>2</sup>, F. Saedi<sup>3</sup>, S. Afshin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assis. Prof., Dep. Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Dep. Mech. Eng., Tehran Branch, Faculty of Enghelab-e Eslami, Technical and vocational Univ., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Msc., Dep. Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

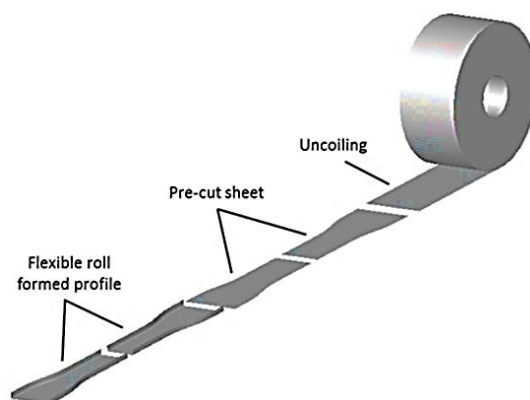
The Flexible Roll Forming (FRF) process with the ability to produce parts with variable width and depth was formed to be used in industries such as automotive, construction, and similar industries. One of the disadvantages of this process is the spring-back defect, which prevents the desired profile from being achieved. In this paper, experimental and numerical analysis of the spring-back phenomenon using Hill, Barlat, and Von Mises yield criteria. Also, the effect of bending angle, material, and sheet thickness parameters on this defect was investigated. The process for the three types of 1050 aluminum, low carbon steel, and 430 stainless steel was simulated using the VUMAT subroutine of Abaqus software. In these simulations, for each material, three thicknesses of 0.4, 0.7 and 1 mm with bending angles of 25 and 45 degrees were considered. Experimental experiments were performed using the FRF machine. Validation of numerical simulation results was performed by comparing experimental results. The results showed that the Barlat criterion has a more accurate prediction of spring-back than the other two criteria. The results also showed that the spring-back ratio of sheets with a thickness of 0.4 mm compared to 1 mm for low carbon, aluminum, and stainless steel are 1.5, 2.5, and 3.2, respectively.

**Keywords:** Flexible Roll Forming; Spring-Back; Finite Element Method; Anisotropic Yield Criteria.

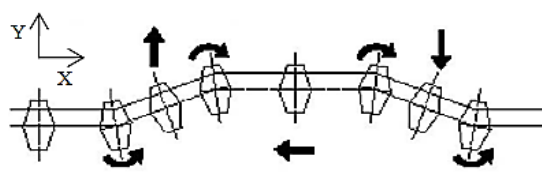
## ۱- مقدمه

برخی قطعات مورد استفاده در صنایعی همچون خودروسازی، ساختمان‌سازی و صنایع مشابه دارای عرض و عمق متغیر هستند، به همین دلیل فرایند جدیدی به نام فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> (FRF) بکار گرفته شد که قابلیت تولید چنین قطعاتی را دارد (شکل ۱).

یکی از تفاوت‌های مهم FRF با شکل‌دهی غلتکی سرد، حرکت عرضی و حرکت زاویه‌دار غلتک حین فرایند است. غلتک‌ها در راستای محور X حرکتی ندارند، بلکه ورق است که در راستای محور X حرکت می‌کند. غلتک، عمود بر جهت حرکت ورق، یعنی در راستای Y حرکت خطی داشته و حول محور Z (محور عمود بر صفحه) حرکت دورانی دارد، به این ترتیب در طول فرایند به طور صحیح روی خط خم باقی می‌ماند (شکل ۲).



شکل ۱- مراحل تولید انواع پروفیل، به روش شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر [۱]



شکل ۲- نحوه جابه‌جایی غلتک‌ها در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر [۲]

برای موقعیت‌دهی دقیق غلتک‌ها از سیستم کنترل عددی رایانه‌ای<sup>۲</sup> (CNC) استفاده می‌شود که می‌توان با تغییر در برنامه کنترلی دستگاه موقعیت غلتک‌ها را تغییر داده و با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن محصول جدیدی را تولید کرد، به همین دلیل به این فرایند، FRF می‌گویند.

به دلیل وجود شکل‌های خاص دارای تقعر و تحدب در بال پروفیل و پیچیدگی تنش - کرنش، عیوب خاصی در محصولات تولیدی به این روش مشاهده می‌شود که علت به وجود آمدن این عیوب، وجود دو منطقه کششی و فشاری در ناحیه انتقال (ناحیه‌ای که در آن عرض پروفیل تغییر می‌کند) است. پس از شکل‌دهی به اندازه مشخص، لبه ورق در ناحیه فشاری کاهش طول و در ناحیه کششی دچار افزایش طول می‌شود. از عیوب متداول این فرایند می‌توان به اعوجاج لبه، برگشت فنی، شمشیری شدن، انحراف از موقعیت مطلوب لبه، تابیدگی کف پروفیل و پارگی اشاره کرد [۳].

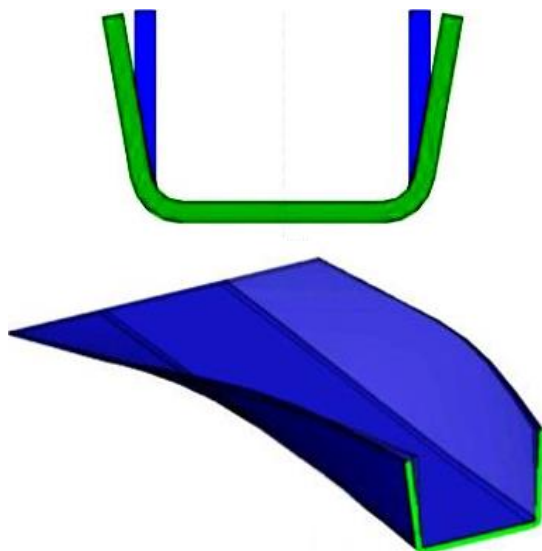
گولجن و همکاران [۴]، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ام اس سی مارک<sup>۳</sup> فرایند شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی را شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها موج‌دار شدن لبه جلو و عقب پروفیل با مقطع U شکل را نشان داد که در شکل‌دهی غلتکی مواد از پیش بریده‌شده معمول است. گروچ و همکاران [۵]، فرایند FRF را به‌عنوان روشی مناسب برای تولید قطعات مورد استفاده در بدنه خودرو از فولادهای با استحکام بالا معرفی کردند. لارائزا و گالدوس [۶]، به‌منظور بررسی عیب تابیدگی کف پروفیل، حین انجام شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، گرمایش موضعی اعمال کردند، بیشترین اثر گرمایش موضعی زمانی حاصل می‌شود که قبل از شروع شکل‌دهی، قسمت بال ورق در کل ناحیه، گرما داده شود. کسائی و همکاران [۷]، چین‌خوردگی لبه در منطقه انتقال را با استفاده از تجزیه و تحلیل المان محدود مورد مطالعه قرار دادند، نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر شکل نوار در ناحیه انتقال می‌تواند به عنوان ترکیبی از دو تغییر شکل نوار مشاهده شده در فرایند شکل‌دهی غلتکی ساده و دارای فلنج باشد. محمدی و همکاران [۸]، با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود به بررسی چگونگی ایجاد عیب تابیدگی کف پروفیل

<sup>2</sup> Computer Numerical Control (CNC)

<sup>3</sup> MSC Marc

<sup>1</sup> Flexible Roll Forming (FRF)

ضخامت ۰/۴، ۰/۷ و ۱ میلی‌متر با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده، صورت گرفت. چون در مقاله حاضر هدف نویسندگان بررسی تاثیر ناهمسانگردی ماده در نتایج شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی تطابق یا عدم تطابق آن‌ها با نتایج تجربی بود، ۲ معیار تسلیم ناهمسانگرد و یک معیار همسانگرد (جهت مقایسه‌ی با معیارهای ناهمسانگرد) انتخاب شدند. از بین معیارهای همسانگرد مناسب‌ترین معیار قابل انتخاب معیار تسلیم فون میسر بود که به عنوان معیار همسانگرد انتخاب گردید. از بین معیارهای ناهمسانگرد موجود دو معیار برای بررسی اثر ناهمسانگردی انتخاب شدند. اولین معیار ناهمسانگرد انتخاب شده، معیار هیل و دومین معیار ناهمسانگرد انتخاب شده، معیار بارلات بود. انتخاب سه معیار تسلیم همسانگرد و ناهمسانگرد امکان مقایسه بین معیارها و انتخاب مناسب‌ترین معیار را فراهم می‌کند. در نهایت با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با کار تجربی صحت‌سنجی نتایج عددی انجام شد؛ همچنین با مقایسه نتایج حاصل از معیارهای تسلیم با نتایج تجربی، مناسب‌ترین معیار تسلیم برای بررسی عیب برگشت فنری انتخاب گردید. پارامترهای هندسی از جمله شعاع خم داخلی، ضخامت ورق، روش شکل‌دهی (طراحی الگو جریان) بر مقدار برگشت فنری تأثیر چشم‌گیری دارند.



شکل ۳- طرح‌واره برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی [۱۱]

پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد، علت اصلی تابیدگی کف پروفیل اعمال نشدن مقدار کافی کرنش طولی در لبه بال پروفیل در ناحیه انتقال است. یان و همکاران [۹]، با استفاده از روش تحلیلی و شبیه‌سازی المان محدود فرایند FRF بررسی کردند. در این بررسی با معیار تسلیم هیل<sup>۱</sup> ۴۸ به مطالعه تنش‌های فشاری، تنش‌های کششی و تنش‌های برشی پرداختند، طبق نتایج به‌دست‌آمده، معیار هیل ۴۸، می‌تواند رفتار تغییر شکل مواد را در شرایط کرنش صفحه‌ای به‌خوبی منعکس کند. جنگسی و همکاران [۲] برای اولین بار، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی تابیدگی کف پروفیل در FRF ارائه کردند. مدل تحلیلی را به دو روش حداکثر تابیدگی کف با کرنش طولی صفر و حداکثر کرنش طولی با تاب صفر بررسی کردند. طبق نتایج به‌دست‌آمده عیب تابیدگی کف با کرنش طولی لبه رابطه عکس دارد. دادگر اصل و همکاران [۱۰]، به بررسی تجربی و عددی عیب پارگی در فرایند FRF پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، معیار شکست نرم آرگون، به‌عنوان مناسب‌ترین معیار برای تشخیص عیب پارگی بیان شد.

برگشت فنری پدیده‌ای رایج و اجتناب‌ناپذیر در شکل‌دهی ورق‌های فلزی است از این‌رو پارامترهای مربوط به ایجاد کرنش در مواد، طی فرایند بارگذاری و برابرداری بر رفتارهای برگشت فنری قسمت‌های شکل‌گرفته تحت فشار تأثیرگذار هستند. شکل ۳ طرح‌واره برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد را نشان می‌دهد.

با وجود مطالعات صورت‌گرفته در خصوص فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص تأثیر معیارهای تسلیم ناهمسان‌گرد بر میزان عیوب موجود در پروفیل‌های تولیدی در این فرایند صورت نگرفته است.

در این مقاله، به بررسی عددی و تجربی پدیده برگشت فنری و تأثیر پارامترهایی چون ضخامت ورق، جنس ورق و زاویه خم روی این عیب پرداخته می‌شود. بدین منظور، شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد. آزمایش‌های تجربی روی ۱۸ نمونه از پیش بریده شده از جنس فولاد زنگ‌نزن، فولاد کم‌کربن و آلومینیوم با سه

<sup>۱</sup> Hill

در رابطه ۳،  $f$  تابع تسلیم،  $M$  پارامتر مربوط به ساختار کریستالوگرافی ماده، ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  توسط رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2};$$

$$k_2 = \left[ \left( \frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

همچنین پارامترهای  $a$ ،  $c$ ،  $h$  و  $p$  پارامترهای شناخته شده ماده هستند که از روابط ۵ تا ۷ به دست می‌آیند:

$$a = 2 - c = \frac{2 \left( \frac{\sigma_e}{\tau_{s2}} \right)^M - 2 \left( 1 + \frac{\sigma_e}{\sigma_{90}} \right)^M}{1 + \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{90}} \right)^M - \left( 1 + \frac{\sigma_e}{\sigma_{90}} \right)^M} \quad (5)$$

$$h = \frac{\sigma_e}{\sigma_{90}} \quad (6)$$

$$p = \frac{\sigma_e}{\tau_{s1}} \left( \frac{2}{2a + 2M_c} \right)^{\frac{1}{M}} \quad (7)$$

$\tau_{s2}$  و  $\tau_{s1}$  تنش تسلیم برای ۲ نوع تست برشی مختلف است که شرایط  $\sigma_{12} = \tau_{s1}$  برای  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$  و  $\sigma_{12} = 0$  برای  $\sigma_{11} = -\sigma_{22} = \tau_{s2}$  برقرار است؛ همچنین  $\sigma_e$  تنش معادل و  $\sigma_{90}$  تنش در راستای عمود بر جهت نورد است. با استفاده از روش دیگر و بر پایه ضرایب لانکفورد (ناهمسان‌گردی)  $r_0$ ،  $r_{90}$  این ثابت‌ها به صورت روابط ۸ و ۹ به دست می‌آیند [۱۳]:

$$a = 2 - c = 2 - 2 \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{r_{90}}{1+r_{90}}} \quad (8)$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (9)$$

### ۳- شبیه‌سازی المان محدود

برای شبیه‌سازی فرایند FRF از حل‌گر دینامیک صریح نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.12 استفاده شده است.

برای مدل‌سازی سطح تماس نوع تماس غلتک بالایی با سطح ورق و همچنین نوع تماس غلتک پایینی با زیر ورق همچنین درجات آزادی و نحوه حرکت غلتک‌ها با توجه به شکل و پروفیل ورق تعیین شده و روی غلتک‌ها اعمال گردید. برای به دست آوردن مسیر دقیق حرکت غلتک‌ها و

### ۲- معیارهای تسلیم ناهمسانگردی

در این مقاله، به منظور بررسی دو معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل و بارلات، زیر برنامه‌ای در نرم‌افزار المان محدود نوشته شد و برای به دست آوردن پارامترهای ناهمسانگردی مربوط به هر معیار، آزمایش کشش صورت گرفت.

#### ۲-۱- معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل ۴۸

در سال ۱۹۴۸، معیار تسلیم ناهمسانگردی توسط هیل ارائه گردید که در این معیار فرض شده است، ماده دارای یک ناهمسانگردی با صفحات متقارن متعامد است. این معیار تسلیم به وسیله یک معادله درجه دو به صورت رابطه ۱ بیان شده است [۱۲]:

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $f$  تابع تسلیم،  $F$ ،  $G$ ،  $H$ ،  $L$  و  $N$  ثابت‌های ویژه ناهمسان‌گردی ماده،  $\sigma_{11}$ ،  $\sigma_{22}$  و  $\sigma_{33}$  تنش‌های نرمال در راستای محورهای مختصات و  $\sigma_{12}$ ،  $\sigma_{23}$  و  $\sigma_{31}$  تنش‌های برشی هستند. در حالت ورق فلزی، معمولاً محور ۱ موازی با جهت نورد، محور ۲ در جهت متعامد و محور ۳ در امتداد جهت نرمال است. اگر تنش‌های تسلیم کششی در جهات اصلی ناهمسانگردی با  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  نمایش داده شود، می‌توان با رابطه ۲ نشان داد که [۱۲]:

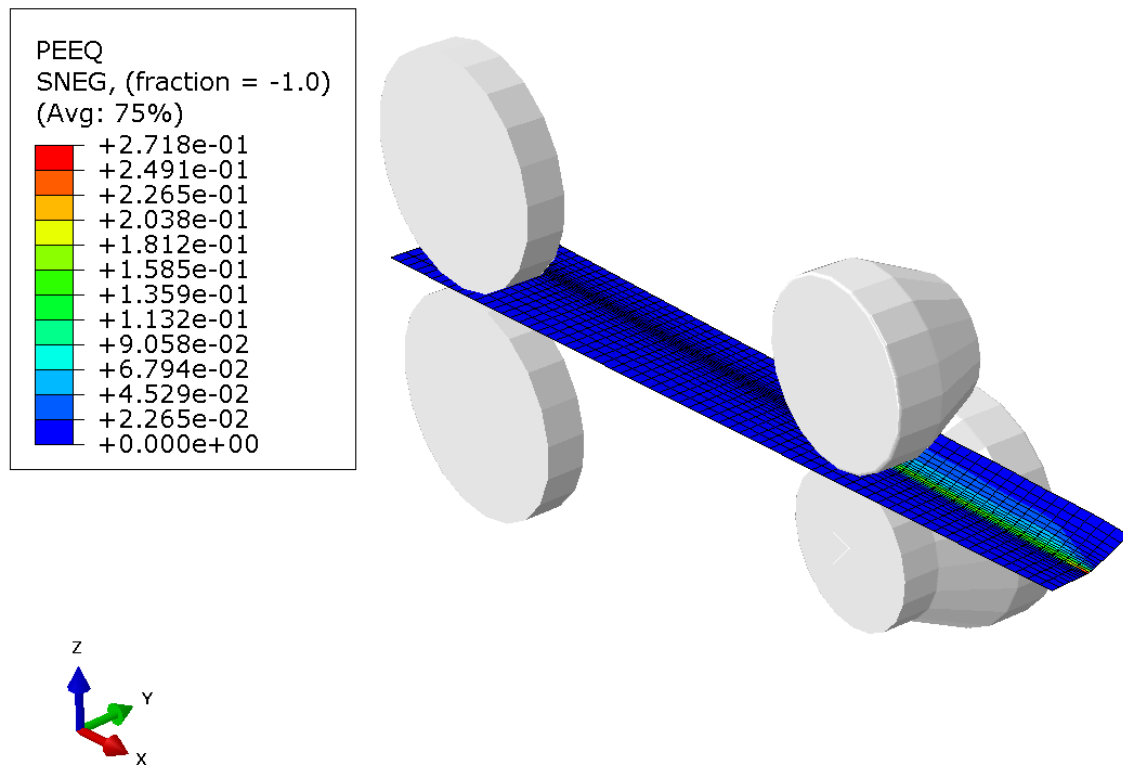
$$\frac{1}{X^2} = G + H; \quad \frac{1}{Y^2} = H + F; \quad \frac{1}{Z^2} = F + G \quad (2)$$

#### ۲-۲- معیار تسلیم ناهمسانگردی بارلات

تابع تسلیم بارلات، برای توصیف رفتار مکانیکی پوسته‌های فلزی در محدوده پلاستیک، با فرض ناهمسانگردی و بارگذاری تنش صفحه‌ای توسعه داده شده است. بررسی این نوع رفتار عمدتاً در مورد مسئله شکل‌دهی ورق‌های فلزی اهمیت پیدا می‌کند.

در سال ۱۹۸۹ بارلات و لین، یک معادله‌ای برای موادی که ناهمسان‌گردی صفحه‌ای از خود نشان می‌دهند را توسط تابع تسلیم نشان داده شده در رابطه ۳ ارائه کردند [۱۳]:

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (3)$$



شکل ۴- نمایی از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

برای توابع تسلیم چندین زیر روال VUMAT در آباکوس نوشته شد. تابع تسلیم هیل بر اساس قانون جریان غیر وابسته نتایج نسبتاً بهتری را ارائه می‌داد. سپس تابع تسلیم بارلات بر اساس قانون جریان وابسته و غیر وابسته با استفاده از زیر روال VUMAT در آباکوس پیاده‌سازی شد. این شبیه‌سازی‌ها شامل ۱۸ آزمایش برای سه جنس و سه ضخامت و دو زاویه خم است که در جدول ۳ آورده شده است.

### ۳-۱- مدل‌سازی

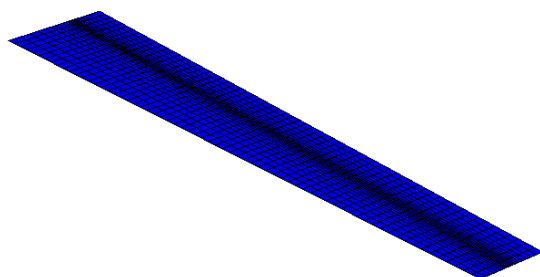
در این شبیه‌سازی، غلتک‌ها صلب و ورق به صورت پوسته شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی طول ورق ۶۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. مدل المان محدود با یک ایستگاه اولیه برای گرفتن اولیه ورق جهت هدایت ورق و یک ایستگاه شکل‌دهی (مطابق دستگاه تجربی) طراحی شد که جفت غلتک‌ها با زوایای مختلف وظیفه شکل‌دهی ورق را به عهده دارند. به دلیل تقارن، فقط نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شده‌اند. در این شبیه‌سازی ابتدا غلتک زیرین در جهت محور

برای انطباق دقیق آن با حرکت غلتک‌ها روی دستگاه که با سیستم کنترلی بصورت دقیق کنترل می‌شود، در نرم‌افزار سه‌بعدی شبیه‌سازی حرکتی آن انجام شده و خروجی این منحنی و حرکت غلتک‌ها عیناً هم به خود دستگاه و هم در نرم افزار آباکوس اعمال گردیده است.

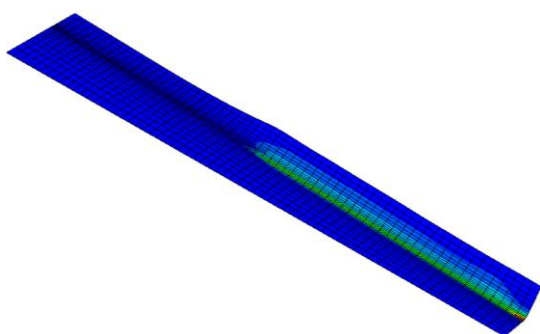
شکل ۴ نمایی از مدل شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. پارامترهای تأثیرگذار روی عیب برگشت فنی شامل ضخامت ورق، جنس ورق و زاویه خم هستند که جهت بررسی اثر این پارامترها، شبیه‌سازی‌ها بر اساس معیار عاملی کامل<sup>۱</sup> انجام شده است.

برای پیاده‌سازی توابع تسلیم در نرم‌افزارهای المان محدود باید از الگوریتم‌های ادغام تنش برای به دست آوردن تنش و کرنش الاستیک و پلاستیک در هر گام زمانی استفاده کرد که الگوریتم برگشتی اوپلر در آباکوس ضمنی پیاده‌سازی شدند.

<sup>۱</sup> Full Factorial

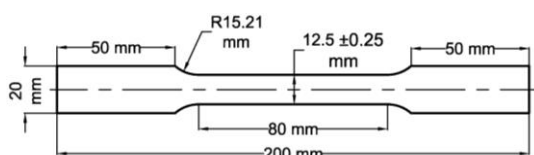


(الف)



(ب)

شکل ۶- ورق شبکه‌بندی شده (الف) قبل از شبیه‌سازی و (ب) بعد از شبیه‌سازی



(الف)



(ب)

شکل ۷- ابعاد نمونه آزمون کشش و (ب) نمونه‌های آماده شده آزمون کشش

### ۳-۳- خواص مواد

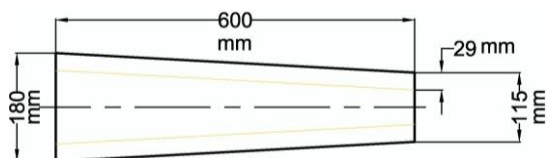
با توجه به اینکه در این مقاله، به بررسی اثر ناهمسانگردی ورق فلزی پرداخته می‌شود؛ لذا باید ضرایب ناهمسانگردی به دست آید که برای این منظور، نمونه‌های استاندارد مطابق

z حرکت کرده و ورق را می‌گیرد. با دوران غلتک‌ها حول محور y و همچنین تطبیق خود با خط خم به صورت تغییر زاویه حول محور z، باعث حرکت ورق در راستای x می‌شوند. با توجه به شکل پروفیل نهایی محصول، غلتک‌ها با جابه‌جایی عرضی در راستای y، ورق موردنظر را شکل می‌دهند تا به محصول نهایی برسند. در تمام شبیه‌سازی‌ها ضریب اصطکاک یک مقدار یکسان ۰/۳ در نظر گرفته شد. به طور خلاصه مراحل شبیه‌سازی بدین ترتیب است:

ابتدا مدل‌سازی هندسی و تعریف خواص مکانیکی مورد نظر برای ورق و غلتک‌ها انجام گرفت؛ سپس در مرحله بعدی نوع حلگر و گام‌های زمانی و سایر ملزومات حرکتی غلتک‌ها که قبلاً توضیح داده شد تعریف شد. در ادامه رفتار تماسی از نوع سطح به سطح<sup>۱</sup> بین ورق و غلتک تعریف گردید؛ سپس شرایط مرزی مورد نظر برای ورق و غلتک‌ها اعمال گردید. همچنین سرعت‌های مربوط به غلتک‌ها اعمال شد. در پایان آدرس مربوط به فایل برنامه زیرروال وارد شده و شبیه‌سازی اجرا گردید.

### ۳-۲- مشخصات شبکه‌بندی

برای شبیه‌سازی این فرایند، غلتک‌ها صلب و ورق شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. به همین منظور، المان بندی برای ورق، به صورت پوسته و از نوع S4R انتخاب گردید. پس از همگرا شدن جواب‌ها و کامل شدن شبیه‌سازی برای به دست آوردن جواب‌های دقیق‌تر اندازه‌ی مش کاهش می‌یابد تا جایی که کم کردن اندازه مش هیچ تاثیری در جواب‌ها نداشته باشد؛ بنابراین نتایج مستقل از اندازه‌ی مش است. برای شکل ۵ پروفیل پیش‌بر شده و شکل ۶ و ۷ به ترتیب نمایی از ورق شبکه‌بندی شده را قبل و بعد از شبیه‌سازی نشان می‌دهند.



شکل ۵- پروفیل شبیه‌سازی شده و خط خم

<sup>۱</sup> Surface to Surface



در جدول ۱ خواص مکانیکی و در جدول ۲ ضرایب ناهمسانگردی برای هر ورق ارائه شده است؛ همچنین در جداول ۳، ۴ و ۵ ضرایب معیار بارلات به ترتیب برای جنس فولاد کم کربن، فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم آورده شده است.



شکل ۹- اندازه‌گیری ضرایب ناهمسانگردی به وسیله دستگاه پروفایل پروژکتور

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق فلزی

SS430	St12	AL 1050	خواص مکانیکی
۴۷۳	۳۱۶	۱۹۱	استحکام نهایی (MPa)
۳۳۸	۱۹۰	۶۳	تنش تسلیم (MPa)
۲۰۶	۲۰۰	۷۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۲۸	۰/۳	۰/۳۳	نسبت پواسون

جدول ۲- ضرایب ناهمسانگردی برای هر ورق

$r_{90}$	$r_{45}$	$r_0$	ضخامت (mm)	جنس
۲	۲/۷۲	۲/۰۴	۰/۴	
۱/۱۵	۱/۵۶	۱/۹۲	۰/۷	فولاد کم کربن
۱/۴۴	۱/۴۲	۱/۷۱	۱	
۲/۷۱	۲/۳۶	۲/۱۱	۰/۴	
۱/۸۸	۱/۷۲	۱/۹۵	۰/۷	فولاد زنگ‌نزن
۱/۲۲	۱/۱۲	۱/۴۸	۱	
۰/۲۵	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۴	
۰/۳۷	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۷	آلومینیوم
۰/۴۸	۰/۷۹	۰/۷۲	۱	



(الف)



(ب)

شکل ۸- الف) برش نمونه‌های استاندارد در سه جهت و ب) نمونه‌های شبکه‌بندی شده

با استاندارد ASTM A370 از ورق فلزی در سه راستای جهت نورد، عمود برجهت نورد و جهت مایل (۴۵ درجه) بریده شده و آزمایش کشش در این جهات صورت گرفت. در شکل ۷، ابعاد نمونه کشش طبق استاندارد ASTM A370-03a و نمونه‌های استاندارد بریده شده ورق‌ها با سه جنس فولاد کم کربن، فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم نشان داده شده است. به منظور به دست آوردن ضرایب ناهمسان‌گردی، بعد از بریدن نمونه‌های استاندارد در جهت‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، شبکه‌بندی‌هایی به صورت دایره‌هایی با قطر ۲/۵ میلی‌متر ایجاد شد. با توجه به تغییر قطر دایره‌های حک شده قبل و بعد از انجام آزمایش ضرایب ناهمسان‌گردی بدست آمده است. بدین ترتیب که قطر دایره‌ها بعد از انجام آزمایش تغییر یافته است. با این تجهیز همانطور که در شکل ۹ مشخص شده است، تغییر قطر در راستای کشش و عمود بر راستای کشش اندازه‌گیری شده است. از تقسیم کرنش عرضی به کرنش طولی این ضرایب بدست آمده‌اند. در شکل ۸ و ۹، مراحل به دست آوردن ضرایب ناهمسان‌گردی نشان داده شده است.

جدول ۵- ضرایب معیار بارلات برای آلومینیوم

پارامتر	ضخامت (mm)		
	t=۱	t=۰/۷	t=۰/۴
M	۸	۸	۸
a	۰/۷۲۱	۰/۷۰۲	۰/۶۱۹
c	۱/۲۷۹	۱/۲۹۸	۱/۳۸۱
h	۰/۳۳۷	۰/۵۰۵	۰/۳۸۷
p	۰/۶۱۸	۰/۷۳۴	۰/۶۹۶
K <sub>1</sub>	۵۱/۰۳۵	۵۳/۷۲۸	۳۹/۳۸۶
K <sub>2</sub>	۴۳/۸۶۳	۴۳/۷۸۲	۳۲/۹۷۸

جدول ۳- ضرایب معیار بارلات برای فولاد کم‌کربن

پارامتر	ضخامت (mm)		
	t=۱	t=۰/۷	t=۰/۴
M	۶	۶	۶
a	۱/۲۲۰	۱/۳۱۰	۱/۳۳۸
c	۰/۷۸۰	۰/۶۹۰	۰/۶۶۲
h	۰/۱۵۳	۰/۲۰۶	۰/۲۳۱
p	۰/۱۸۷	۰/۱۵۸	۰/۱۷۶
K <sub>1</sub>	۱۰۹/۰۳۹	۱۱۴/۵۲۹	۱۱۶/۸۵۵
K <sub>2</sub>	۱۱۰/۲۷۲	۱۱۲/۳۶۰	۱۱۳/۰۵۵

۴- آزمون تجربی

به‌منظور مقایسه و صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمون تجربی انجام شد. برای انجام آزمون تجربی از دستگاه FRF دارای یک ایستگاه شکل‌دهی همانند شبیه‌سازی عددی استفاده شد که دارای یک ایستگاه شکل‌دهی بود.

۴-۱- دستگاه شکل‌دهی

یکی از ویژگی‌های مهم دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، توانایی تولید پروفیل‌های با عمق و مقطع متغیر است. برای دستیابی به این قابلیت باید غلتک‌های شکل‌دهی در دو محور حرکت داشته باشند که این حرکات با توجه به هندسه پروفیل تغییر می‌کند. با توجه به این موارد، سیستم کنترلی دستگاه طراحی و ساخته شد تا هم توانایی حرکت عرضی و هم حرکت دورانی حول محور y را ایجاد نماید. ابتدا طراحی دستگاه در نرم‌افزار سالدورکز<sup>۱</sup> انجام گردید (شکل ۱۰) و تمامی حرکات لازم جهت شکل‌دهی آزمایش شده و سپس دستگاه ساخته شد. شکل ۱۱ نیز نمایی از دستگاه FRF ساخته شده در آزمایشگاه شکل‌دهی را نشان می‌دهد که در آزمایش‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- ضرایب معیار بارلات برای فولاد زنگ‌نزن

پارامتر	ضخامت (mm)		
	t=۱	t=۰/۷	t=۰/۴
M	۶	۶	۶
a	۱/۱۴۵	۱/۳۱۴	۱/۴۰۸
c	۰/۸۵۵	۰/۶۸۶	۰/۵۹۲
h	۰/۲۰۱	۰/۲۵۵	۰/۲۹۴
p	۰/۲۴۸	۰/۱۸۷	۰/۱۵۷
K <sub>1</sub>	۱۹۶/۳۴۴	۲۰۴/۸۱۱	۲۱۲/۲۳۲
K <sub>2</sub>	۱۹۳/۴۰۰	۲۰۰/۰۳۶	۲۰۴/۵۵۵

۴-۳- طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش‌ها، از قسمت DOE نرم‌افزار Minitab استفاده شد. برای بررسی اثر جنس ۳ سطح، برای بررسی اثر ضخامت ۳ سطح و برای بررسی اثر زاویه خم به دلیل محدودیت اقتصادی و محدود بودن آزمایش‌های تجربی و ساخت غلتک ۲ سطح انتخاب گردید. برای اینکه اثر پارامترها به‌خوبی بررسی شوند از روش طراحی عاملی کامل در این مقاله استفاده گردید که با این نوع طراحی، در نهایت ۱۸ آزمایش مطابق جدول ۶ تعریف گردید. هر جنس با سه ضخامت مختلف در زوایای خم ۲۵ و ۴۵ درجه شکل داده شدند.

<sup>۱</sup> SolidWorks





شکل ۱۱- نمایی از دستگاه FRF مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی



شکل ۱۲- نمایی از ورق پیش بر شده قبل از انجام آزمایش‌های تجربی



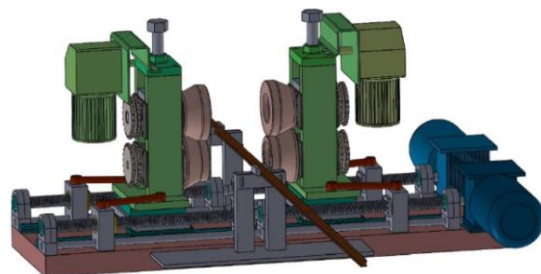
شکل ۱۳- نمایی از ورق‌ها با جنس‌های مختلف پس از انجام آزمایش‌های تجربی

#### ۴-۲- روند انجام آزمایش

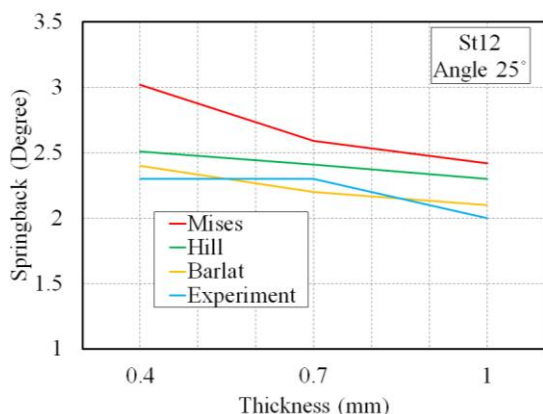
ابتدا نمونه ورق‌های از پیش بریده شده، شکل دهی شدند و سپس میزان زوایا (به منظور صحت سنجی نمونه‌ها) با استفاده از دستگاه پروفایل پروژکتور با دقت  $0.1$  درجه اندازه‌گیری شدند (شکل ۱۴).

جدول ۶- آزمایش‌های طراحی شده با نرم‌افزار Minitab

ردیف	جنس	زاویه خم ( $^{\circ}$ )	ضخامت (mm)
۱	آلومینیوم ۱۰۵۰	۲۵	۰/۴
۲	آلومینیوم ۱۰۵۰	۲۵	۰/۷
۳	آلومینیوم ۱۰۵۰	۲۵	۱
۴	آلومینیوم ۱۰۵۰	۴۵	۰/۴
۵	آلومینیوم ۱۰۵۰	۴۵	۰/۷
۶	آلومینیوم ۱۰۵۰	۴۵	۱
۷	فولاد زنگ‌زن	۲۵	۰/۴
۸	فولاد زنگ‌زن	۲۵	۰/۷
۹	فولاد زنگ‌زن	۲۵	۱
۱۰	فولاد زنگ‌زن	۴۵	۰/۴
۱۱	فولاد زنگ‌زن	۴۵	۰/۷
۱۲	فولاد زنگ‌زن	۴۵	۱
۱۳	فولاد کم کربن	۲۵	۰/۴
۱۴	فولاد کم کربن	۲۵	۰/۷
۱۵	فولاد کم کربن	۲۵	۱
۱۶	فولاد کم کربن	۴۵	۰/۴
۱۷	فولاد کم کربن	۴۵	۰/۷
۱۸	فولاد کم کربن	۴۵	۱



شکل ۱۰- نمایی از دستگاه FRF طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکز



شکل ۱۵- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق St12 با زاویه خم ۲۵ درجه

با بررسی نتایج حاصل از زاویه خم ۲۵ درجه مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق از ۰/۴ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر، میزان برگشت فنی کاهش یافته است؛ همچنین دیده می‌شود که در میان معیارهای تسلیم مورد بررسی، نتایج حاصل از معیار بارلات به نتایج حاصل از کار تجربی نزدیک‌تر است.

شکل ۱۶ مربوط به نتایج زاویه خم ۴۵ درجه است که نشان می‌دهد، میزان برگشت فنی در معیارهای تسلیم ناهمسان‌گرد و معیار تسلیم همسان‌گرد به یک صورت تغییر کرده است. نتایج نشان می‌دهد، ورق با ضخامت کمتر، میزان برگشت فنی بیشتری نسبت به دو ضخامت دیگر دارد.

#### ۵-۱-۲- اثر ضخامت ورق و زاویه خم بر برگشت فنی نمونه آلومینیوم

نتایج به‌دست‌آمده از کار تجربی و شبیه‌سازی برای جنس آلومینیوم با سه ضخامت و دو زاویه خم در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آورده شده است. با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که هرچه ضخامت ورق کمتر باشد، میزان برگشت فنی در آن افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش منطقه الاستیک در ورق است؛ چراکه افزایش این منطقه پس از باربرداری خود را به‌صورت برگشت فنی نمایان می‌سازد. مقایسه معیارهای تسلیم ناهمسان‌گرد و همسان‌گرد با نتایج کار تجربی نشان می‌دهد که دو معیار تسلیم ناهمسان‌گردی هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ به نتایج تجربی نزدیک‌تر بوده و از میان این دو معیار، معیار تسلیم بارلات ۸۹ تطابق بهتری با نتایج تجربی نشان داده است.



شکل ۱۴- اندازه‌گیری با دستگاه پروفایل پروژکتور

#### ۵- بحث و نتایج

در این مقاله، اثر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت ورق، جنس و زاویه خم به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای هر ضخامت از هر جنس ۲ آزمایش و در مجموع ۳ جنس مختلف، ۶ آزمایش در نظر گرفته شد. در ادامه اثر این پارامترها بیان می‌شود.

#### ۵-۱- اثر زاویه خم و ضخامت ورق بر روی برگشت فنی

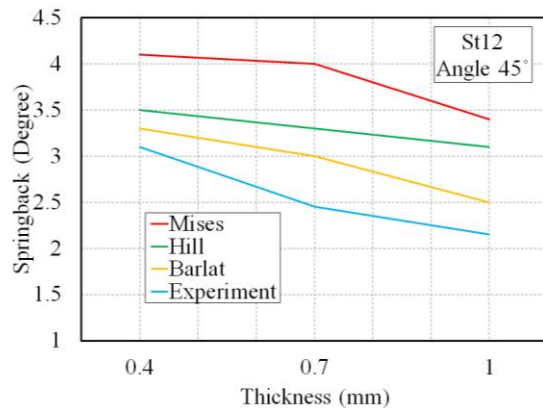
در این قسمت به بررسی اثر زاویه خم و ضخامت ورق بر روی عیب برگشت فنی با معیارهای تسلیم فون میسز، هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ پرداخته شده و با کار تجربی مقایسه شده است.

#### ۵-۱-۱- اثر ضخامت ورق و زاویه خم بر برگشت فنی نمونه St12

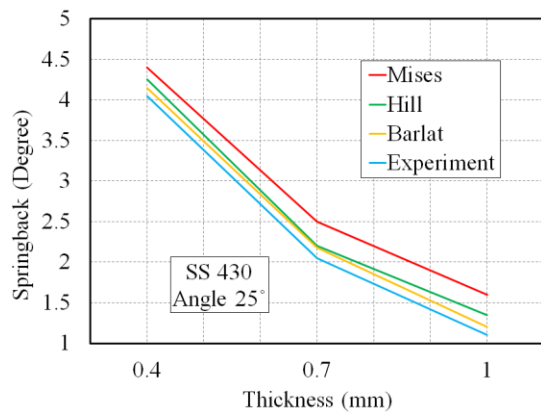
در شکل ۱۵ نتایج مربوط به زاویه خم ۲۵ درجه و در شکل ۱۶ نتایج مربوط به زاویه خم ۴۵ درجه نشان داده شده است، محور افقی، نشان‌دهنده ضخامت ورق و محور عمودی، میزان برگشت فنی در زوایای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۵-۱-۳- اثر ضخامت ورق و زاویه خم بر برگشت فنری  
نمونه فولاد زنگ‌نزن

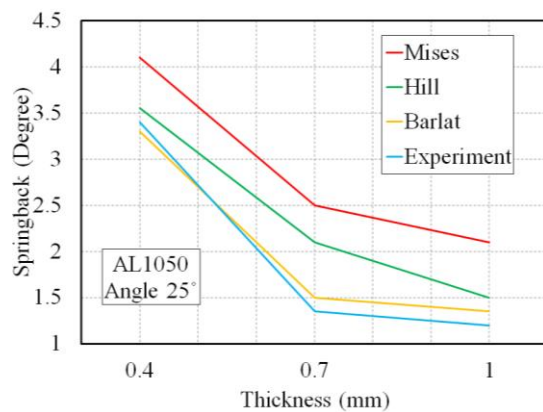
نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی فولاد زنگ‌نزن با دو زاویه خم ۲۵ و ۴۵ درجه در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. مقدار برگشت فنری در زاویه ۲۵ درجه برای ضخامت ۰/۴ میلی‌متر در معیار تسلیم بارلات ۸۹، هیل ۴۸، میسز و کار تجربی به ترتیب ۴/۱۶، ۴/۲۶، ۴/۴۲ و ۴/۰۵ درجه است و برای ضخامت ۱ میلی‌متر به ترتیب ۱/۲۲، ۱/۳۷، ۱/۵۷ و ۱/۱ درجه است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق از ۰/۴ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد. در زاویه خم ۴۵ درجه نیز با



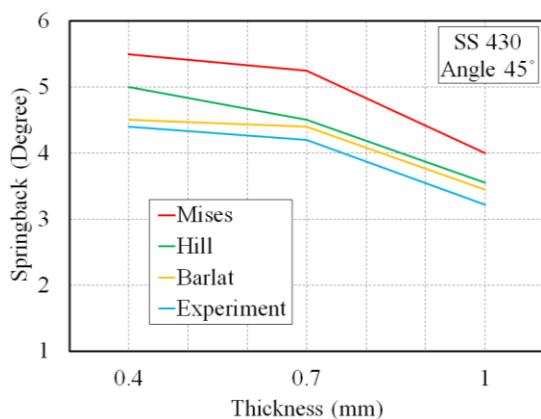
شکل ۱۶- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق St12 با زاویه خم ۴۵ درجه



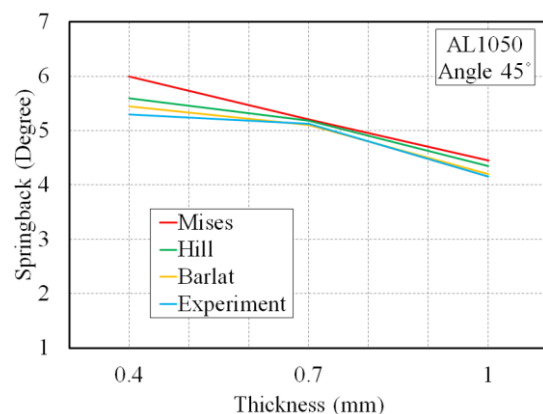
شکل ۱۹- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ با زاویه خم ۲۵ درجه



شکل ۱۷- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ با زاویه خم ۲۵ درجه



شکل ۲۰- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ با زاویه خم ۴۵ درجه



شکل ۱۸- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و کار تجربی ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ با زاویه خم ۴۵ درجه

تطابق بهتری با نتایج حاصل از کار تجربی داشته است.

- در ورق فولاد کم‌کربن، برای ضخامت ۰/۴ میلی‌متر، برگشت فنری ۱/۵ برابر ضخامت ۱ میلی‌متر بوده است؛ همچنین در ورق آلومینیوم مقدار برگشت فنری در ضخامت ۰/۴ میلی‌متر ۲/۵ برابر نسبت به ضخامت ۱ میلی‌متر افزایش داشته است. در فولاد زنگ‌نزن نیز مقدار برگشت فنری به‌دست‌آمده از نتایج برای ضخامت ۰/۴ میلی‌متر ۳/۲ برابر بیشتر از ضخامت ۱ میلی‌متر بوده است، پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت ورق میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد.

#### ۷- مراجع

- [1] Storbeck M, Beiter P, Berner S, Brenneis M, Schmitt W, Groche P (2012) Lightweight Products by Load Optimized Profile Design. Future Trends in Production Engineering 161-179.
- [2] Jiao J, Rolfe B, Mendiguren J, Weiss M (2015) An analytical approach to predict web-warping and longitudinal strain in flexible roll formed sections of variable width. Int J Mech Sci 90: 228-238.
- [3] Dadgar Y, Sheikhi MM, Anaraki AP, Gollo MH, Panahizadeh V (2017) Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. Int J Adv Manu Technol 91(5-8): 1481-1492.
- [4] Gulceken E, Abeé A, Sedlmaier A, Livatyali H (2007) Finite element simulation of flexible roll forming. A case study on variable width U channel. 4th Int. Conf. Exhibition on Desing and Production of Machines and Dies/Molds, Turkey.
- [5] Groche P, Henkelmann M, Gotz P, Berner S (2008) Cold rolled profiles for vehicle construction. Arch. of Civil & Mech. Eng. 8(2): 31-38.
- [6] Larrañaga J, Galdos L (2009) Geometrical accuracy improvement of flexibly roll formed profiles by means of local heating. First Int Con Roll Forming, Spain.
- [7] Kasaei MM, MoslemiNaeini H, Abbaszadeh B, Mohammadi M, Ghodsi M, Kiuchi M, Zolghadr R, Liaghat Gh, AziziTafti R, Salmani Tehrani M (2014) Flange wrinkling in flexible roll forming process. Pro Eng 81: 245-250.
- [8] Mohammadi M, MoslemiNaeini H, Kasaei MM, Salmani Tehrani M, Abbaszadeh B (2014) Investigation of web warping of profiles with changing cross section inflexible roll forming

افزایش ضخامت میزان برگشت فنری کاهش یافته است. با بررسی اثر معیارهای تسلیم هیل ۴۸، بارلات ۸۹، میسز و کار تجربی مشاهده می‌شود که معیار تسلیم ناهمسانگردی بارلات ۸۹ به زوایای پروفیل‌های تولید شده در کار تجربی نزدیک‌تر است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به دلیل اهمیت عیب برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی غلتکی، بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی روی این عیب صورت گرفت و نتایج حاصل ارائه شد. همان‌طور که در نمودارهای حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی نمایان است:

- در تمام زوایا، با افزایش مقدار ضخامت از ۰/۴ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر، میزان برگشت فنری کمتر می‌شود. می‌توان این کاهش برگشت فنری را این‌گونه توجیه کرد که افزایش نسبت کرنش‌های پلاستیک و کاهش منطقه الاستیک در ضخامت‌های بالاتر، باعث کاهش میزان برگشت فنری می‌گردد.
- در زاویه غلتک ۲۵ درجه، نتایج شبیه‌سازی بسیار نزدیک به کار تجربی است و میزان برگشت فنری کمتری رخ داده است.
- فولاد زنگ‌نزن به دلیل داشتن تنش تسلیم بیشتر نسبت به سایر جنس‌ها، میزان برگشت فنری کمتری داشته است.
- در یک نتیجه‌گیری کلی، با افزایش میزان ضخامت و افزایش تنش تسلیم میزان برگشت فنری در زوایای مختلف کمتر می‌شود.
- ورق آلومینیوم به دلیل داشتن مدول الاستیسیته کمتر نسبت به دو نمونه فولاد، میزان برگشت فنری بیشتری را در نمونه‌ها داشت.
- با بررسی اثر معیارهای تسلیم ناهمسانگرد هیل ۴۸ و بارلات ۸۹ و معیار تسلیم همسانگرد فون میسز ملاحظه شد که نتایج حاصل از معیارهای تسلیم ناهمسانگرد به نتایج تجربی نزدیک‌تر بوده و از بین دو معیار انتخابی، معیار تسلیم بارلات ۸۹

[۱۱] پناهی‌زاده و (۱۳۹۲) بررسی نظری، تجربی و عددی عیب برگشت فنری و پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از معیارهای شکست نرم. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

[12] Hill R (1948) A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. P Roy Soc A-Math Phy 193: 281-297.

[13] Barlat F, Lege DJ, Brem JC (1991) A six-component yield function for anisotropic materials. Int J Plasticity 7: 693-712

process. Modares Mechanical Engineering 14(6): 72-80.

[9] Yan Y, Wang H, Li Q, Qian B, Mpofu Kh (2014) Simulation and experimental verification of flexible roll forming of steel sheets. Int J Adv Manuf Technol, London.

[10] Dadgar Asl Y, Sheikhi MM, Pourkamali Anaraki A, Panahizadeh Rahimloo V, Hosseinpour Gollo M (2016) Experimental and Numerical Analysis of Fracture on Flexible Roll Forming Process of Channel Section in Aluminum 6061-T6 Sheet. Modares Mechanical Engineering 16(5): 329-338