

بررسی عددی و تجربی برگشت فنری در خمش U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد DP600

محمد شفيعی علویجه^۱، حسین ترابیان^{۲*}، حسین امیرآبادی^۳

* نویسنده مسئول: h_torabian@iauctb.ac.ir

واژه‌های کلیدی

شکل دهی، شبیه‌سازی، برگشت فنری،
انحنای دیواره جانبی، فولاد DP600.

چکیده

یکی از مهمترین محدودیت‌ها در شکل دهی مطلوب ورق‌های فلزی، پدیده بازیابی کشسان در طول باربرداری است که به برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی منجر می‌شود. بنابراین پیش‌بینی برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی برای تولید محصولات دقیق ضروری است. در این تحقیق، تأثیر نیروی ورق‌گیر، ضریب اصطکاک، ضخامت و استحکام تسلیم ورق بر مقادیر برگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد DP600 مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این عوامل از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده و نتایج حاصل از این نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشگاهی، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود را تصدیق می‌کنند. پس از حصول اطمینان از صحت روش تحلیل اجزای محدود، به وسیله آزمایش‌های تجربی، روش تحلیل اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان ابزاری قدرتمند، سریع و مؤثر جهت انجام بررسی بعضی پارامترهای مهم فرایند خمکاری U شکل ورق، مانند نیروی ورق‌گیر، ضریب اصطکاک، ضخامت و استحکام تسلیم ورق، معرفی می‌شود. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب که یک نرم‌افزار آماری است، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تجزیه و تحلیل شده و معادلاتی برای پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی با استفاده از مقادیر ضریب اصطکاک، نیروی ورق‌گیر، ضخامت و استحکام تسلیم ورق آمده است.

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

۱- مقدمه

روش در تعیین مقاومت خمشی صفحات و محاسبه میزان برگشت فنری برای مسائل سه بعدی مناسب تشخیص داده نشد. در ادامه فعالیت های یاد شده، پوربقرات و همکارانش [۷] از روش هیبریدی با المان های غشایی و پوسته ای^۴ برای محاسبه برگشت فنری در فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی تحت بار متقارن محوری استفاده کردند.

یکی از قطعاتی که در صنایع شکل دهی و از جمله اتومبیل سازی بسیار مورد استفاده قرار می گیرند، قطعات U شکل هستند. در قطعات U شکل علاوه بر پدیده برگشت فنری، پدیده انحنای دیواره جانبی^۵ نیز مشاهده می شود. انحنای دیواره جانبی پدیده ای است که نتیجه تغییر شکل پیچیده کشش، خمش و رهاسازی آنها است و در دیواره قطعات تغییر شکل یافته رخ می دهد. مطالعات بسیاری در مورد چگونگی مدل سازی این نوع فرایند شکل دهی و علل دو پدیده مذکور و عوامل مؤثر بر آنها انجام شده است. ابتدا پوربقرات و همکارانش [۸،۹] با استفاده از روش هیبریدی سعی کردند این فرایند را شبیه سازی کنند. چند سال بعد لی و همکارانش [۱۰] روشی را برای محاسبه برگشت فنری بر اساس مدل اجزای محدود با استفاده از حل کننده دینامیکی ارائه دادند. در فعالیت های نزدیک به موضوع تحقیق جاری، ساموئل اثر شعاع سنبه، شعاع ماتریس و مقدار ناهمسانگردی را بر میزان برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی بررسی نموده است [۱۱]. لیو و همکارانش نیز برای جبران کاهش انحنای دیواره جانبی و برگشت فنری در خمش کششی قطعات U شکل، استفاده از نیروی نگهدارنده متغیر را پیشنهاد نموده اند [۱۲،۱۳]. راگایی و همکارانش اثر مقدار ناهمسانگردی را در میزان برگشت فنری ورقه های فولاد ضد زنگ ۴۱۰، به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داده اند [۱۴].

در صنایع مختلف به ویژه در صنایع اتومبیل سازی تولید قطعات با کمترین وزن ممکن، بسیار مهم است. کاهش وزن اتومبیل ها مزایای بسیاری از جمله کاهش مصرف سوخت را در پی دارد. برای تولید این گونه قطعات نیاز است تا از مواد با استحکام بالا و سبک وزن و یا نوارهای کامپوزیتی استفاده

در فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی، یکی از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت و دقت قطعات تولیدی، پدیده برگشت فنری^۱ است. این پدیده بیانگر تغییر شکل ورق، پس از باربرداری و رها شدن ورق از نیروی پرس، است. پدیده برگشت فنری، دستیابی به دقت ابعادی بالا را ناممکن می سازد و باعث ایجاد مشکلات زیادی در مونتاژ قطعات تولیدی می شود. بنابراین در فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی پیش بینی میزان برگشت فنری برای تولید قطعات با دقت بالا، ضروری است.

محققان بسیاری پدیده برگشت فنری را مورد مطالعه قرار داده اند. به طور کلی این محققان برای بررسی پدیده برگشت فنری از روش های تحلیلی، روش های تجربی یا آزمایشگاهی و روش های عددی استفاده کرده اند. در روش های تحلیلی به دلیل پیچیدگی های زیاد، به ناچار از فرضیات ساده کننده بسیاری از قبیل وجود رابطه ساده بین تنش و کرنش، عدم وجود اصطکاک، نادیده گرفتن کم شدن ضخامت ماده، چشم پوشی از اثر پوشینگر و بزرگ بودن شعاع خمش در مقایسه با ضخامت استفاده می شود [۳-۱]. استفاده از روش های آزمایشگاهی در بررسی و ارزیابی پدیده برگشت فنری بسیار پرهزینه، دشوار و زمان بر است [۴]. در نتیجه استفاده از روش های عددی برای بررسی پدیده برگشت فنری نسبت به روش های تحلیلی و تجربی مناسب تر است. با بررسی تحقیقات انجام گرفته پیرامون برگشت فنری به خوبی می توان دریافت که در میان روش های عددی، روش های اجزای محدود نقش عمده ای در مطالعه مسائل مربوط به برگشت فنری داشته است. در دهه های اخیر، پیشرفت های قابل ملاحظه ای در زمینه شبیه سازی اجزای محدود انواع فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی انجام شده است. از آن جمله، می توان به تحقیقات زو و همکارانش [۵] با موضوع کاهش زمان محاسبات و ابداع روشی به نام EBG^۲ اشاره کرد. در این روش از المان غشایی^۳ برای محاسبه مقدار برگشت فنری استفاده شده است. پس از آن سیریم و همکارانش [۶] روش فوق را در بررسی مسائل شکل دهی در حالت سه بعدی توسعه دادند. با این حال، کاربرد این

1- Springback

2- Element Bending Group

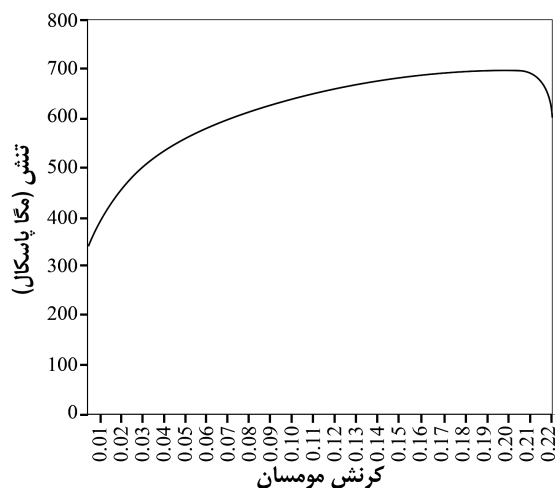
3- Membrane Element

4- Shell element

5- Side wall curl

۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق از پرس هیدرولیکی INSTRON 8501 با ظرفیت ۱۵۰ تن استفاده شده است. سنبه، ماتریس و ورقگیر همگی از فولاد ابزار با سختی ۵۵HRC ساخته شده و ورق‌ها از جنس فولاد DP600 انتخاب شده‌اند. طول هر یک از این ورق‌ها ۳۰۰ mm و عرض آنها ۳۵ mm است. ضخامت ورق‌های استفاده شده در این تحقیق به ترتیب ۱، ۱/۲ و ۱/۵ میلی‌متر است. منحنی تنش- کرنش مومسان ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق که در جهت نورد ورق با استفاده از آزمون کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM E8، در نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۱۱ به دست آمده، در شکل (۱) نشان داده شده است. خصوصیات مکانیکی این ورق‌ها در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۱) منحنی تنش- کرنش مومسان در جهت نورد ورق.

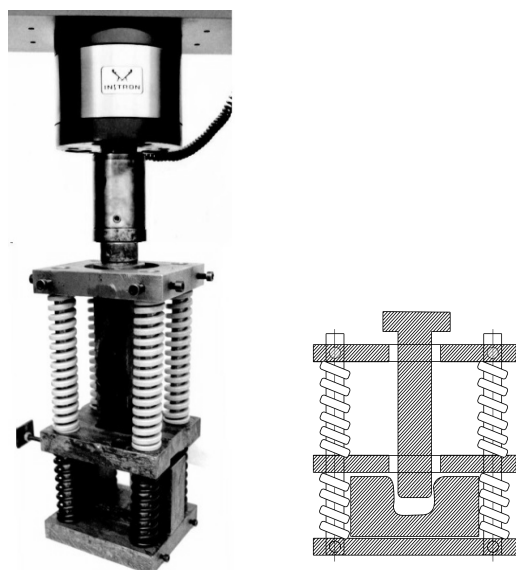
جدول (۱) خواص مکانیکی ورق.

مقدار	خاصیت
۲۰۵/۳۵ GPa	مدول کشسانی
۰/۷۹	نسبت کرنش در جهت نورد ورق
۱/۰۳	نسبت کرنش در جهت ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد ورق
۱/۰۱	نسبت کرنش در جهت ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق
۰/۳	نسبت پواسون
۷۸۰۰ kg/m ^۳	چگالی
۳۶۵ MPa	تنش تسلیم

شود. در زمینه تحقیقات انجام شده پیرامون برگشت فبری در نوارهای کامپوزیتی می‌توان به تحقیق محمدی و همکارانش [۱۵] اشاره نمود. آنها در فرایند خمکاری نوارهای چند لایه، اثر ضخامت لایه‌های مختلف را بر مقادیر برگشت فبری بررسی نموده‌اند. پیرامون برگشت فبری در مواد با استحکام بالا می‌توان به تحقیق یانگ و همکارانش [۱۶] اشاره نمود. آنها با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود به بررسی برگشت فبری در فرایند شکل‌دهی داغ فولادهای با استحکام بالا پرداخته‌اند.

امروزه در صنایع اتومبیل‌سازی به جای استفاده از آلیاژهای با استحکام بالا و سبک وزن آلومینیوم و منیزیم، از فولادهای دو فازی^۱ که دارای نسبت استحکام به چگالی بالاتری هستند و نسبت به آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم ارزاترند استفاده می‌شود. فولادهای دو فازی به‌علت وجود فاز مارتنزیت^۲ سخت در یک میدان نرم از فریت^۳ دارای ترکیبی از استحکام بالا، قابلیت شکل‌دهی خوب و وزن پایین هستند [۱۷]. تحقیقات انجام شده در مورد استفاده از فولادهای دو فازی در بدنه اتومبیل‌ها نشان می‌دهند که استفاده از فولادهای دو فازی در بدنه اتومبیل‌ها، وزن اتومبیل‌ها را تا ۳۶ درصد کاهش می‌دهد [۱۸]. استفاده از این نوع فولادها، مشکلاتی را نیز به همراه دارد که یکی از مهمترین این مشکلات، بزرگ‌بودن مقدار برگشت فبری و انحنای زیاد دیواره جانبی در شکل‌دهی این نوع فولادها است. در این مقاله در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد DP600 که یک نوع فولاد دو فازی است، پدیده‌های برگشت فبری و انحنای دیواره جانبی و اثر پارامترهای نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم و ضخامت ورق بر این پدیده‌ها بررسی شده است و در نهایت بر خلاف سایر تحقیقات انجام شده در این رابطه، معادلات ساده‌ای برای پیش‌بینی مقادیر این پدیده‌ها با استفاده از مقادیر نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم ورق و ضخامت ورق به دست آمده است.

1- DP steel
2- Martensite
3- Ferrite



شکل (۲) تصویری از تجهیزات به کار رفته در آزمایش و طرح شماتیک آنها.

تمامی آزمایش‌ها در دمای ثابت محیط کارگاه انجام شده‌اند. قبل از انجام هر آزمایش سطوح ماتریس، سنبه، ورقگیر و هر دو طرف ورق به خوبی تمیز شده، سپس این سطوح به وسیله روانکارهای مناسب روغنکاری می‌شوند. در این تحقیق آزمایش‌ها با ضرایب اصطکاک ۰/۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ انجام شده‌اند. در آزمایش‌های مختلف برای ایجاد هر یک از این ضرایب اصطکاک، از نوعی روغن مخصوص برای روانکاری سطوح بین ورق و تجهیزات شکل دهی در تماس با ورق (سنبه، ماتریس و ورقگیر) استفاده شده است. برای انجام هر آزمایش ابتدا به کمک ساعت اندازه‌گیری، ورق در موقعیت دقیق خود روی قالب قرار داده شده، سپس ورقگیر پایین آورده می‌شود. پس از اعمال نیروی ورقگیر، صفحه بالایی پرس شروع به پایین آمدن کرده و سنبه را با سرعت ثابت 1 mm/s به سمت پایین حرکت می‌دهد. برای کنترل دقیق جابه‌جایی سنبه و مقدار نفوذ آن به داخل ماتریس که در این تحقیق برابر با 70 mm می‌باشد، از یک ساعت اندازه‌گیری استفاده شده است. پس از آنکه سنبه به اندازه 70 mm در داخل ماتریس نفوذ کرد، عملیات شکل دهی ورق پایان می‌یابد، سپس سنبه به سمت بالا برگشته، ورقگیر از روی ورق برداشته شده و در انتها ورق بطور کامل از درون قالب خارج می‌شود.

نسبت کرنش^۱، R که به آن ناهمسانگرد معمولی^۲ یا ناهمسانگرد پلاستیک^۳ نیز می‌گویند، برابر است با نسبت کرنش عرضی قطعه به کرنش ضخامت قطعه. ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق، با استفاده از فرایند نورد تولید شده‌اند و حالت خاصی از ناهمسانگردی (ارتوتروپ) را دارند. بنابراین مقدار R یک نمونه بریده شده از این ورق‌ها، به زاویه آن قطعه نسبت به جهت نورد در ورق بستگی دارد. برای اندازه‌گیری مقادیر R_{90} ، R_{45} و R_{0} در این ورق‌ها، سه نمونه در جهت‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق، از ورق بریده شده و پس از انجام تست کشش روی این نمونه‌ها، با استفاده از رابطه (۱)، مقادیر R_{90} ، R_{45} و R_{0} به دست آورده شده است.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W_o}{W_f}\right)}{\ln\left[\left(\frac{W_f}{W_o}\right)\left(\frac{L_f}{L_o}\right)\right]} \quad (1)$$

۳- آزمایش‌ها

در شکل (۲) تصویری از تجهیزات به کار رفته در آزمایش‌ها و طرح شماتیک آنها نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، صفحات بالایی و پایینی دستگاه پرس به وسیله فنرهایی از ورقگیر جدا شده‌اند. فنرهای پایینی، ورقگیر را در فاصله کوچکی از ماتریس نگه می‌دارند. بنابراین ورق می‌تواند به راحتی داخل شود. فنرهای بالایی کار انتقال نیرو به ورقگیر را بر عهده دارند. ورقگیر می‌تواند با آزادی بر روی چهار میله متصل شده به صفحه پایینی پرس، به بالا و پایین حرکت کند. در این مقاله، آزمایش‌ها با نیروهای ورقگیر ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلونیوتن انجام شده‌اند. با بالا و پایین بردن صفحه بالایی پرس بر روی میله‌ها و در نتیجه کوتاه و بلند شدن فنرهای بالایی، می‌توان نیروی ورقگیر مناسب برای انجام هر آزمایش را تنظیم نمود.

- 1- Strain ratio
- 2- Normal anisotropy
- 3- Plastic anisotropy

برای مدل‌سازی ورق از المان پوسته‌ای S4R استفاده شده که یک المان چهار ضلعی و چهار گره‌ای است. این نوع المان در مسائل تنش- جابه‌جایی و در تغییر شکل‌های بزرگ و غیرخطی استفاده می‌شود و دارای رفتار مناسب برای تحلیل مسائل خمش صفحه‌ای است. سنبه، ماتریس و ورقگیر از نوع Analytical rigid و با ساختار سیمی^۳ مدل‌سازی شده‌اند.

در این مقاله، نوع تماس بین سطح بالایی ورق با سنبه، سطح بالایی ورق با ورقگیر و سطح پایینی ورق با ماتریس باید تعریف شود. روش انتخاب شده برای تعریف این سطوح نسبت به یکدیگر، تماس سطح به سطح^۴ است. در هر یک از این تماس‌ها، سطح صلب به‌عنوان سطح پایه^۵ و سطح ورق به‌عنوان سطح پیرو^۶ انتخاب می‌شوند. در هر یک از شبیه‌سازی‌ها ضریب اصطکاک بین تمامی سطوح در تماس با یکدیگر (ورق با سنبه، ماتریس و ورقگیر) برابر فرض شده و در تمام طول فرایند، مقدار آن ثابت فرض می‌شود. بنابراین در هر شبیه‌سازی، تنها یک نوع رفتار تماسی با اصطکاک باید تعریف شود. برای مثال اگر ضریب اصطکاک ۰/۱۵ باشد، رفتار تماسی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

Interaction → Property → Create → Name:
FRIC → Continue → Mechanical → Tangential behavior → Friction formulation: Penalty → Friction coeff: ۰/۱۵ → OK

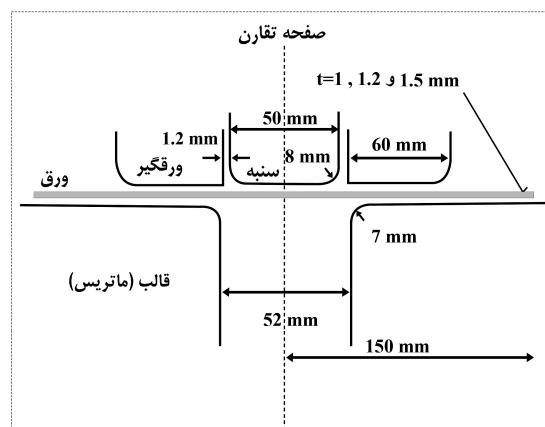
برای انجام این شبیه‌سازی، پنج مرحله تعریف شده است. این کار سبب افزایش صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌گردد [۱۹]. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است این مراحل عبارت‌اند از:

- ۱- در اولین مرحله، نیروی ورقگیر اعمال می‌شود.
- ۲- در دومین مرحله، سنبه با سرعت ثابت به درون حفره قالب (ماتریس) نفوذ کرده و سبب تغییر شکل ورق می‌گردد تا اینکه به عمق هفتاد میلی‌متری ماتریس برسد.
- ۳- در سومین مرحله، سنبه به سمت بالا باز می‌شود.

در این تحقیق، هر آزمایش بر روی دو ورق انجام شده و در هر ورق، چهار اندازه‌گیری روی چهار گوشه ورق، برای هر کدام از پارامترهای β_1 ، β_2 و ρ انجام می‌شود. میانگین این هشت اندازه‌گیری برای هر کدام از پارامترهای β_1 ، β_2 و ρ به‌عنوان مقدار آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود. این کار سبب می‌شود خطاهایی مانند خطای ناشی از پیچش ورق کاهش یابد، در نتیجه صحت نتایج حاصل افزایش می‌یابد.

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این مقاله، فرایند خمکاری U شکل ورق با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار آباکوس^۱ شبیه‌سازی شده است. در شکل (۳) شماتیک مسئله خمکاری U شکل ورق نشان داده شده است. به دلیل وضعیت و هندسه مسئله، می‌توان آن را به‌صورت دو بعدی مدل‌سازی کرد. این کار باعث ساده‌تر شدن مدل‌سازی و کاهش زمان رسیدن به جواب می‌شود. به علت تقارن مسئله نسبت به صفحه میانی، تنها از نصف مدل سمت راست استفاده شده است. این کار سبب افزایش سرعت و کاهش زمان آنالیز می‌شود. در این مقاله از معیار تسلیم فون میسس^۲ در شبیه‌سازی عددی فرایند استفاده شده است. در هر یک از شبیه‌سازیها در تمام طول فرایند، نیروی ورقگیر ثابت فرض شده و از تغییرات آن صرف نظر شده است.



شکل (۳) نمایش شماتیک هندسه قالب.

3- Wire

4- Surface to surface contact

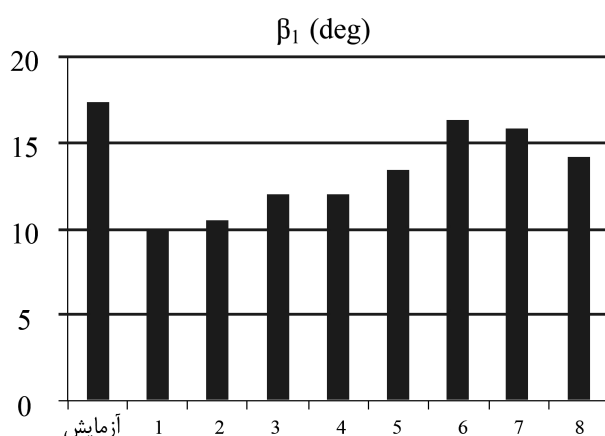
5- Master

6- Slave

1- ABAQUS

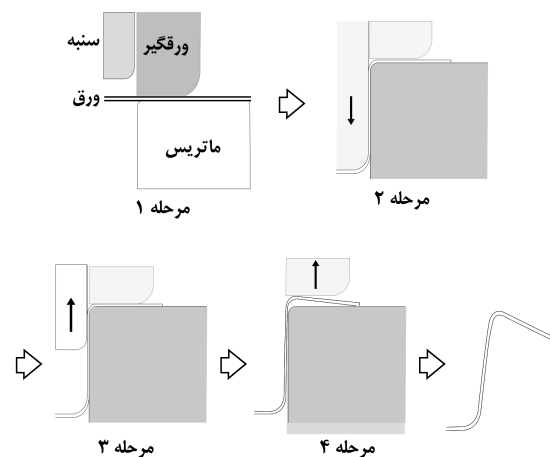
2- Von-Mises criteria

این شکل ها می توان گفت استفاده از روش حل ضمنی برای شبیه سازی برگشت فنری، سبب افزایش قابل ملاحظه صحت پیش بینی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی می شود. علت این افزایش صحت نتایج این است که در روش حل ضمنی، طبیعت شبه استاتیکی مسئله در هر حالت حفظ می شود، لذا در حل مسائلی از قبیل برگشت فنری و چروکیدگی ورق، جواب های دقیق تری نسبت به روش اجزای محدود صریح در اختیار قرار می دهد. هر چند استفاده از روش حل صریح برای شبیه سازی شکل دهی تأثیر قابل ملاحظه ای بر صحت این پیش بینی ها نمی گذارد ولی زمان انجام محاسبات را به شدت کاهش می دهد. استفاده از المان نوع پوسته ای به جای المان نوع توپر علاوه بر کاهش زمان انجام محاسبات، سبب افزایش صحت پیش بینی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی نیز می شود. بنابراین بهترین حالت برای انجام این شبیه سازی که بیشترین دقت و بالاترین سرعت را دارد، حالت شش است که در آن از المان نوع پوسته ای برای مدل سازی ورق استفاده شده، همچنین از روش حل صریح برای شبیه سازی شکل دهی و از روش حل ضمنی برای شبیه سازی برگشت فنری استفاده شده است.



شکل (۵) مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره برای حالات مختلف شبیه سازی وقتی ضریب اصطکاک ۰/۱، نیروی ورقگیر ۲۰ kN، استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa و ضخامت ورق ۱ mm است.

۴- در چهارمین مرحله، ورقگیر از روی ورق برداشته می شود.
 ۵- در پنجمین مرحله که مرحله نهایی است، قطعه شکل داده شده به طور کامل از قالب خارج شده و تمامی تماس های تعریف شده حذف می شوند.



شکل (۴) مراحل مختلف شبیه سازی فرایند.

در این مقاله برای انتخاب روش مناسب برای انجام شبیه سازی، هشت حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت های اول، دوم، سوم و چهارم از المان نوع توپر^۱ و در حالت های پنجم، ششم، هفتم و هشتم از المان نوع پوسته ای استفاده شده است. برای شبیه سازی فرایند شکل دهی (دو مرحله اول شکل (۴))، در حالت های دوم، چهارم، ششم و هشتم از روش حل صریح^۲ و در حالت های اول، سوم، پنجم و هفتم از روش حل ضمنی^۳ استفاده شده است. برای شبیه سازی فرایند برگشت فنری، مراحل ۳، ۴ و ۵ شکل (۴)، در حالت های اول، دوم، پنجم و هشتم از روش حل صریح و در حالت های سوم، چهارم، ششم و هفتم از روش حل ضمنی استفاده شده است.

در شکل های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی که از آزمایش های عملی به دست آمده اند، با مقادیر به دست آمده از حالت های مختلف شبیه سازی اجزای محدود مقایسه شده اند. با توجه به

- 1- Solid element
- 2- Explicit
- 3- Implicit

$$\beta_1 = \theta_1 - \theta_1^\circ \quad (2)$$

$$\beta_2 = \theta_2^\circ - \theta_2 \quad (3)$$

$$\theta_1^\circ = \theta_2^\circ = \arccos \left(\frac{ox \cdot \overrightarrow{A.B.}}{|ox| |A.B.}|} \right) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{ox \cdot \overrightarrow{AB}}{|ox| |AB|} \right) \quad (5)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{ED}}{|AB| |ED|} \right) \quad (6)$$

$$x_R = \frac{x_B^y + y_B^y - x_A^y - y_A^y - \frac{y_A - y_B}{y_C - y_B} (x_C^y + y_C^y - x_B^y - y_B^y)}{\sqrt{\left[x_B - x_A + (x_C - x_B) \frac{y_A - y_B}{y_C - y_B} \right]^2}} \quad (7)$$

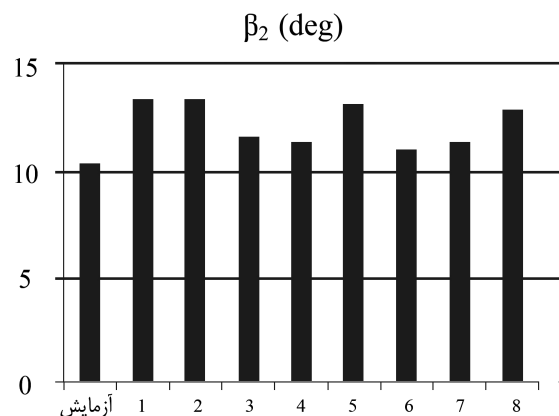
$$y_R = \frac{x_A^y + y_A^y - x_B^y - y_B^y + \sqrt{x_R(x_B - x_A)}}{\sqrt{(y_A - y_B)}} \quad (8)$$

$$\rho = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (y_A - y_R)^2} \quad (9)$$

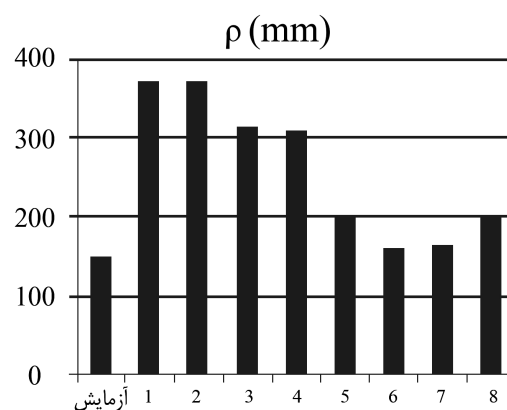
۵- نتایج و بحث

در جدول (۲) برخی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس بیان شده است. با توجه به این جدول نتیجه گرفته می‌شود که:

۱- در مقادیر کوچک ضریب اصطکاک، با افزایش ضریب اصطکاک، به تدریج مقدار برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فتری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنا دیواره جانبی کاهش می‌یابد. ولی با عبور ضریب اصطکاک از یک مقدار معین (۰/۱۵)، مقدار برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فتری زاویه فلنج شروع به کاهش و شعاع انحنا دیواره جانبی شروع به افزایش می‌کند. علت پدیده بالا این است که در ابتدا وقتی ضریب اصطکاک کم است، توزیع تنش چنان صورت می‌گیرد که آن سمت ورق که در طرف سنبه قرار دارد، متحمل تنش فشاری و آن سمت دیگر متحمل تنش کششی می‌شود. این امر باعث ایجاد ممان خمشی و در نتیجه تنش خمشی شده که منجر به افزایش مقدار برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فتری زاویه فلنج و کاهش شعاع انحنا دیواره جانبی می‌شود. ولی با افزایش ضریب اصطکاک، که در اصل مقاومتی در برابر جریان فلز است، توزیع تنش

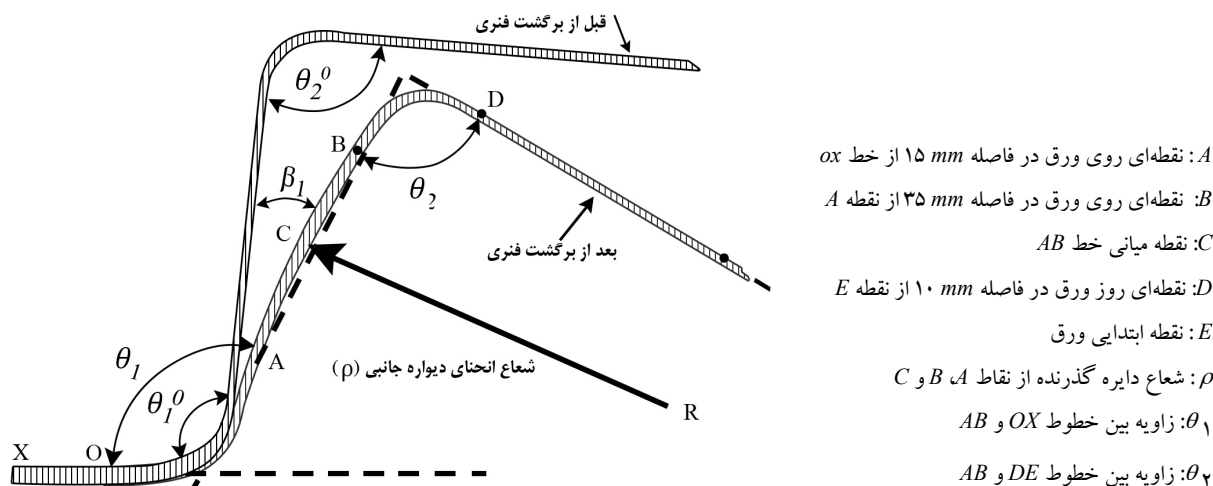


شکل (۶) مقادیر برگشت فتری زاویه فلنج برای حالات مختلف شبیه‌سازی وقتی ضریب اصطکاک ۰/۱، نیروی ورقگیر ۲۰ kN، استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa و ضخامت ورق ۱ mm است.



شکل (۷) مقادیر شعاع انحنا دیواره جانبی برای حالات مختلف شبیه‌سازی وقتی ضریب اصطکاک ۰/۱، نیروی ورقگیر ۲۰ kN، استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa و ضخامت ورق ۱ mm است.

نقاط لازم برای اندازه‌گیری پارامترهای برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فتری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی در شکل (۸) نشان داده شده اند. برای به‌دست آوردن مقادیر این پارامترها، ابتدا مختصات نقاط A و B قبل از وقوع پدیده برگشت فتری اندازه‌گیری شده و این مختصات با \$A_0\$ و \$B_0\$ نشان داده می‌شوند، سپس مختصات نقاط A، B، C، D و E پس از وقوع پدیده برگشت فتری اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت با استفاده از این مختصات و معادلات (۲) تا (۹)، مقادیر برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فتری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی به‌دست می‌آید.



شکل (۸) نقاط لازم برای اندازه گیری مقادیر پارامترهای β_1 , β_2 و ρ

تنش کششی می‌شود. این امر باعث ایجاد ممان خمشی و در نتیجه تنش خمشی می‌گردد. تنش خمشی مذکور باعث افزایش مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج و کاهش شعاع انحنای دیواره جانبی می‌شود. ولی با افزایش نیروی ورقگیر، که در اصل مقاومتی در برابر جریان فلز است، توزیع تنش به نحوی صورت می‌گیرد که تمام تنش های ورق ماهیتی کششی پیدا می‌کنند و یکدست می‌شوند. بنابراین جهت تنش در هر دو سمت ورق یکی شده و از تشکیل ممان خمشی جلوگیری می‌گردد. در نتیجه مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش استحکام تسلیم ورق مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد.

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود که تعدادی از آنها در جداول (۳) تا (۵) نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی‌های اجزای محدود وجود ندارد. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که نرم‌افزار آباکوس، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی است.

به‌نحوی صورت می‌گیرد که تمام تنش‌های ورق ماهیتی کششی پیدا می‌کنند و یکدست می‌شوند. بنابراین جهت تنش در هر دو سمت ورق یکی شده و از تشکیل ممان خمشی جلوگیری می‌شود. در نتیجه مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد. بنابراین به منظور کاهش پدیده‌های ناخواسته برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی، در مواردی که کاهش ضریب اصطکاک به مقادیر خیلی کوچک امکان‌پذیر نباشد، با افزایش ضریب اصطکاک می‌توان آنها را تا حدودی کاهش داد.

۲- با افزایش ضخامت ورق مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد. علت پدیده فوق گسترش ناحیه مومسان ورق در نتیجه افزایش ضخامت ورق است.

۳- در مقادیر کوچک نیروی ورقگیر، با افزایش نیروی ورقگیر، به تدریج میزان برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد ولی با عبور نیروی ورقگیر از مقدار معین ۲۵ kN، میزان برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج شروع به کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی شروع به افزایش می‌کند. علت پدیده فوق این است که در ابتدا وقتی نیروی ورقگیر کم است، توزیع تنش چنان صورت می‌گیرد که آن سمت ورق که در طرف سنبه قرار دارد متحمل تنش فشاری شده و آن سمت دیگر متحمل

جدول (۲) نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس.

ρ (mm)	β_2 (°)	β_1 (°)	ضریب اصطکاک	ضخامت ورق (mm)	نیروی ورقگیر (kN)	استحکام تسلیم (MPa)	شبه سازی
۱۸۵/۴۸۰۳	۷/۱۸۷۹	۱۱/۸۵۱۹	۰/۲	۱/۲	۲/۵	۳۲۸/۵	۱
۲۰۷/۴۸۲۳	۵/۹۶۴۳	۱۰/۲۴۶۷	۰/۱۵	۱/۵	۲/۵	۳۲۸/۵	۲
۱۹۰/۶۹۶۴	۷/۳۸۲۱	۱۲/۳۳۱۰	۰/۲۵	۱/۲	۵	۳۲۸/۵	۳
۲۱۶/۰۱۲۲	۶/۲۵۷۷	۱۰/۲۶۳۷	۰/۲	۱/۵	۵	۳۲۸/۵	۴
۱۸۹/۶۴۴۷	۸/۴۵۹۳	۱۱/۷۸۵۰	۰/۰۵	۱	۱۰	۳۲۸/۵	۵
۱۹۱/۲۷۰۹	۸/۲۰۷۱	۱۱/۹۱۷۸	۰/۱	۱/۲	۱۰	۳۲۸/۵	۶
۱۸۲/۸۸۴۸	۸/۴۵۷۰	۱۳/۶۵۳۶	۰/۲	۱/۲	۱۰	۳۲۸/۵	۷
۲۰۰/۸۷۰۱	۷/۴۴۰۸	۱۱/۵۳۲۹	۰/۱۵	۱/۵	۱۰	۳۲۸/۵	۸
۱۵۴/۹۷۱۶	۹/۴۹۸۱	۱۵/۱۸۱۷	۰/۱۵	۱	۱۵	۳۲۸/۵	۹
۱۸۱/۳۵۲۱	۹/۱۵۲۳	۱۴/۷۵۱۵	۰/۲	۱/۲	۱۵	۳۲۸/۵	۱۰
۲۱۶/۴۳۸۹	۷/۳۹۸۸	۱۱/۹۱۱۶	۰/۱	۱/۵	۱۵	۳۲۸/۵	۱۱
۱۷۹/۶۳۵۳	۹/۵۷۹۸	۱۵/۵۴۸۰	۰/۲۵	۱/۲	۲۰	۳۲۸/۵	۱۲
۱۷۲/۹۳۱۶	۹/۶۰۱۰	۱۵/۰۱۴۲	۰/۱۵	۱/۲	۲۵	۳۲۸/۵	۱۳
۲۱۶/۸۹۱۷	۸/۶۰۴۹	۱۲/۴۱۸۹	۰/۰۵	۱/۲	۳۰	۳۲۸/۵	۱۴
۱۸۷/۶۷۵۶	۹/۸۰۲۱	۱۵/۳۹۱۱	۰/۲	۱/۲	۳۰	۳۲۸/۵	۱۵
۱۹۸/۳۳۵۴	۸/۷۰۴۱	۱۴/۰۳۵۲	۰/۱۵	۱/۵	۳۰	۳۲۸/۵	۱۶
۲۱۴/۱۰۷۵	۸/۴۵۰۲	۱۴/۰۰۱۲	۰/۲۵	۱/۵	۳۰	۳۲۸/۵	۱۷
۱۵۴/۶۰۷۳	۱۰/۷۵۶۹	۱۶/۳۲۸۵	۰/۱۵	۱	۳۵	۳۲۸/۵	۱۸
۱۸۵/۰۴۲۳	۹/۷۳۹۴	۱۵/۳۹۵۰	۰/۲	۱/۲	۳۵	۳۲۸/۵	۱۹
۲۱۵/۵۶۷۱	۷/۶۵۵۹	۱۳/۹۶۲۹	۰/۲۵	۱/۵	۳۵	۳۲۸/۵	۲۰
۱۸۸/۳۱۳۲	۸/۹۳۳۲	۱۲/۵۰۱۲	۰/۰۵	۱	۲/۵	۳۶۵	۲۱
۱۷۳/۷۱۶۴	۸/۸۵۳۶	۱۳/۶۹۷۳	۰/۲	۱/۲	۲/۵	۳۶۵	۲۲
۲۰۱/۸۴۰۹	۷/۴۵۴۹	۱۲/۰۹۰۶	۰/۲۵	۱/۵	۲/۵	۳۶۵	۲۳
۱۸۶/۹۴۱۹	۹/۳۸۲۴	۱۳/۳۰۱۱	۰/۰۵	۱	۵	۳۶۵	۲۴
۱۷۲/۸۴۰۷	۹/۱۰۶۰	۱۴/۰۱۰۳	۰/۲۵	۱/۲	۵	۳۶۵	۲۵
۱۸۶/۰۰۰۴	۱۰/۰۳۷۸	۱۴/۱۵۹۳	۰/۰۵	۱	۱۰	۳۶۵	۲۶
۱۸۵/۲۱۴۹	۱۰/۵۹۳۲	۱۴/۹۴۳۷	۰/۰۵	۱	۱۵	۳۶۵	۲۷
۱۶۲/۲۶۱۹	۱۰/۷۲۶۹	۱۵/۲۴۲۱	۰/۱	۱	۱۵	۳۶۵	۲۸
۱۸۳/۸۷۵۲	۱۱/۰۴۸۶	۱۵/۶۶۴۹	۰/۰۵	۱	۲۰	۳۶۵	۲۹
۱۶۰/۱۸۱۵	۱۱/۱۱۷	۱۶/۲۹۱۴	۰/۱	۱	۲۰	۳۶۵	۳۰
۱۸۰/۱۶۳۸	۱۰/۳۹۴۶	۱۵/۲۴۱۶	۰/۱	۱/۲	۲۰	۳۶۵	۳۱
۲۰۰/۸۶۱۹	۹/۳۳۴	۱۳/۸۰۸۷	۰/۱	۱/۵	۲۰	۳۶۵	۳۲
۱۸۳/۱۳۱۵	۱۱/۱۹۸۷	۱۵/۹۹۱۷	۰/۰۵	۱	۲۵	۳۶۵	۳۳
۱۵۹/۸۹۱۴	۱۱/۹۷۱۵	۱۷/۲۲۱۹	۰/۱	۱	۲۵	۳۶۵	۳۴
۱۴۵/۸۰۳۱	۱۲/۰۰۳۱	۱۸/۳۴۲۹	۰/۱۵	۱	۲۵	۳۶۵	۳۵
۱۵۴/۹۸۱۶	۱۱/۷۵۶۴	۱۷/۹۷۲۹	۰/۲	۱	۲۵	۳۶۵	۳۶
۱۶۲/۱۳۹	۱۱/۴۹۱۴	۱۷/۶۳۲۹	۰/۲۵	۱	۲۵	۳۶۵	۳۷
۱۸۳/۵۹۱۳	۱۰/۹۳۱۹	۱۵/۶۷۴۲	۰/۰۵	۱	۳۰	۳۶۵	۳۸
۱۸۴/۲۳۲۱	۱۰/۵۱۴۹	۱۵/۱۸۹۶	۰/۰۵	۱	۳۵	۳۶۵	۳۹
۱۸۵/۳۰۲۵	۱۰/۲۳۵۹	۱۵/۴۵۷۲	۰/۱۵	۱/۵	۳۵	۳۶۵	۴۰
۱۳۹/۴۳۳۴	۱۱/۱۶۴۲	۱۶/۵۰۹۸	۰/۲۰	۱	۲/۵	۴۰۱/۵	۴۱
۱۵۷/۷۰۲۹	۱۰/۷۸۳۴	۱۵/۹۱۵۱	۰/۱۵	۱/۲	۲/۵	۴۰۱/۵	۴۲
۱۵۳/۰۰۲۶	۱۱/۵۵۵۵	۱۶/۶۳۰۸	۰/۱۵	۱/۲	۵	۴۰۱/۵	۴۳

جدول (۲) ادامه

شبه‌سازی	استحکام تسلیم (MPa)	نیروی ورقگیر (kN)	ضخامت ورق (mm)	ضریب اصطکاک	β_1 (°)	β_2 (°)	ρ (mm)
۴۴	۴۰/۱/۵	۵	۱/۵	۰/۲	۱۴/۷۵۴۸	۹/۹۵۰۱	۱۷۸/۰۲۴۳
۴۵	۴۰/۱/۵	۱۰	۱/۲	۰/۰۵	۱۵/۳۹۷۲	۱۱/۰۱۹۷	۱۸۲/۹۰۰۸
۴۶	۴۰/۱/۵	۱۰	۱/۵	۰/۱	۱۴/۶۵۷۹	۱۰/۴۹۸۱	۱۸۹/۹۵۷۷
۴۷	۴۰/۱/۵	۱۰	۱/۵	۰/۲	۱۵/۴۵۴۳	۱۰/۵۷۳۹	۱۷۶/۵۱۱۹
۴۸	۴۰/۱/۵	۱۵	۱/۲	۰/۰۵	۱۵/۵۰۳۱	۱۱/۱۱۱۸	۱۹۴/۷۳۴۵
۴۹	۴۰/۱/۵	۱۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۶/۴۸۱۹	۱۱/۲۹۴۳	۱۷۴/۹۳۸۹
۵۰	۴۰/۱/۵	۲۰	۱/۲	۰/۲۵	۱۸/۱۱۷۶	۱۲/۵۶۵۴	۱۵۷/۶۱۸۱
۵۱	۴۰/۱/۵	۲۰	۱/۵	۰/۲	۱۷/۱۱۲۸	۱۱/۷۰۷۹	۱۷۳/۱۲۱۹
۵۲	۴۰/۱/۵	۲۵	۱/۲	۰/۰۵	۱۶/۲۸۰۳	۱۱/۹۱۰۴	۱۹۴/۲۹۱۷
۵۳	۴۰/۱/۵	۲۵	۱/۵	۰/۲۵	۱۷/۳۶۰۶	۱۲/۰۴۸۶	۱۷۷/۴۷۳۸
۵۴	۴۰/۱/۵	۳۰	۱	۰/۲	۱۹/۹۸۸۴	۱۳/۷۱۴۳	۱۳۶/۳۷۷۸
۵۵	۴۰/۱/۵	۳۰	۱/۲	۰/۱	۱۸/۴۳۸۱	۱۲/۸۹۴۳	۱۶۸/۸۶۷۵
۵۶	۴۰/۱/۵	۳۰	۱/۲	۰/۱۵	۱۹/۴۱۳۸	۱۳/۲۹۳۷	۱۵۱/۸۰۶۲
۵۷	۴۰/۱/۵	۳۰	۱/۵	۰/۰۵	۱۵/۰۲۰۸	۱۰/۹۷۳۳	۲۰۵/۸۹۲۱
۵۸	۴۰/۱/۵	۳۰	۱/۵	۰/۱۵	۱۷/۸۲۵۶	۱۲/۲۳۶۶	۱۸۰/۶۵۹۵
۵۹	۴۰/۱/۵	۳۵	۱	۰/۱	۱۸/۷۳۸۲	۱۳/۲۹۶۴	۱۵۳/۲۶۴۶
۶۰	۴۰/۱/۵	۳۵	۱/۲	۰/۲	۱۹/۴۱۱۰	۱۳/۱۳۶۹	۱۴۸/۳۱۹۶

جدول (۳) مقایسه نتایج نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره برای ورق هایی با استحکام تسلیم ۳۶۵MPa

نیروی ورقگیر (kN)	ضخامت ورق (mm)	ضریب اصطکاک	β_1 حاصل از آزمایش (°)	β_1 حاصل از شبه‌سازی (°)	درصد خطا
۲/۵	۱	۰/۰۵	۱۳/۶	۱۲/۵۰۱۲	۸
۲/۵	۱/۲	۰/۲	۱۴/۷	۱۳/۶۹۷۳	۶/۸
۲/۵	۱/۵	۰/۲۵	۱۲/۹	۱۲/۰۹۰۶	۶/۳
۵	۱	۰/۰۵	۱۴/۴	۱۳/۳۰۱۱	۶/۷
۵	۱/۲	۰/۲۵	۱۵/۴	۱۴/۰۱۰۳	۹
۱۰	۱	۰/۰۵	۱۵/۶	۱۴/۱۵۹۳	۲/۹
۱۵	۱	۰/۰۵	۱۶/۲	۱۴/۹۴۳۷	۸/۷
۱۵	۱	۰/۱	۱۶/۹	۱۵/۲۴۲۱	۹/۸
۲۰	۱	۰/۰۵	۱۶/۷	۱۵/۶۶۴۹	۶/۲
۲۰	۱	۰/۱	۱۷/۵	۱۶/۲۹۱۴	۶/۹
۲۰	۱/۲	۰/۱	۱۶/۶	۱۵/۲۴۱۶	۸/۲
۲۰	۱/۵	۰/۱	۱۵/۳	۱۳/۸۰۸۷	۹/۷
۲۵	۱	۰/۰۵	۱۷/۱	۱۵/۹۹۱۷	۶/۵
۲۵	۱	۰/۱	۱۸/۵	۱۷/۲۲۱۹	۶/۹
۲۵	۱	۰/۱۵	۱۹/۵	۱۸/۳۴۲۹	۵/۹
۲۵	۱	۰/۲	۱۹/۱	۱۷/۹۷۲۹	۵/۹
۲۵	۱	۰/۲۵	۱۸/۸	۱۷/۶۳۲۹	۶/۲
۳۰	۱	۰/۰۵	۱۶/۸	۱۵/۶۷۴۲	۶/۷
۳۵	۱	۰/۰۵	۱۶/۴	۱۵/۱۸۹۶	۷/۴
۳۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۶/۷	۱۵/۴۵۷۲	۷/۴

جدول (۴) مقایسه نتایج نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی برگشت فنری زاویه فلنج برای ورق‌هایی با استحکام تسلیم 365 MPa

درصد خطا	نیروی ورقگیر (kN)	ضخامت ورق (mm)	ضریب اصطکاک	β_p حاصل از آزمایش (°)	β_p حاصل از شبیه‌سازی (°)	درصد خطا
۲/۷	۲/۵	۱	۰/۰۵	۸/۷	۸/۹۳۳۲	۲/۷
۵/۴	۲/۵	۱/۲	۰/۲	۸/۴	۸/۸۵۳۶	۵/۴
۶/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۲۵	۷	۷/۴۵۴۹	۶/۵
۴/۲	۵	۱	۰/۰۵	۹	۹/۳۸۲۴	۴/۲
۷/۱	۵	۱/۲	۰/۲۵	۸/۵	۹/۱۰۶۰	۷/۱
۶/۸	۱۰	۱	۰/۰۵	۹/۴	۱۰/۰۳۷۸	۶/۸
۹/۲	۱۵	۱	۰/۰۵	۹/۷	۱۰/۵۹۳۲	۹/۲
۸/۴	۱۵	۱	۰/۱	۹/۹	۱۰/۷۲۶۹	۸/۴
۹/۴	۲۰	۱	۰/۰۵	۱۰/۱	۱۱/۰۴۸۶	۹/۴
۷/۹	۲۰	۱	۰/۱	۱۰/۳	۱۱/۱۱۷	۷/۹
۸/۳	۲۰	۱/۲	۰/۱	۹/۶	۱۰/۳۹۴۶	۸/۳
۹/۸	۲۰	۱/۵	۰/۱	۸/۵	۹/۳۳۴	۹/۸
۸/۷	۲۵	۱	۰/۰۵	۱۰/۳	۱۱/۱۹۸۷	۸/۷
۶/۹	۲۵	۱	۰/۱	۱۱/۲	۱۱/۹۷۱۵	۶/۹
۶/۲	۲۵	۱	۰/۱۵	۱۱/۳	۱۲/۰۰۳۱	۶/۲
۵/۹	۲۵	۱	۰/۲	۱۱/۱	۱۱/۷۵۶۴	۵/۹
۵/۴	۲۵	۱	۰/۲۵	۱۰/۹	۱۱/۴۹۱۴	۵/۴
۷/۲	۳۰	۱	۰/۰۵	۱۰/۲	۱۰/۹۳۱۹	۷/۲
۶/۲	۳۵	۱	۰/۰۵	۹/۹	۱۰/۵۱۴۹	۶/۲
۸/۹	۳۵	۱/۵	۰/۱۵	۹/۴	۱۰/۲۳۵۹	۸/۹

جدول (۵) مقایسه نتایج نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی شعاع انحنای دیواره جانبی برای ورق‌هایی با استحکام تسلیم 365 MPa

درصد خطا	نیروی ورقگیر (kN)	ضخامت ورق (mm)	ضریب اصطکاک	ρ حاصل از آزمایش (mm)	ρ حاصل از شبیه‌سازی (mm)	درصد خطا
۱۲/۱	۲/۵	۱	۰/۰۵	۱۶۸	۱۸۸/۳۱۳۲	۱۲/۱
۹/۹	۲/۵	۱/۲	۰/۲	۱۵۸	۱۷۳/۷۱۶۴	۹/۹
۱۱/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۲۵	۱۸۱	۲۰۱/۸۴۰۹	۱۱/۵
۱۲/۶	۵	۱	۰/۰۵	۱۶۶	۱۸۶/۹۴۱۹	۱۲/۶
۸	۵	۱/۲	۰/۲۵	۱۶۰	۱۷۲/۸۴۰۷	۸
۱۲/۸	۱۰	۱	۰/۰۵	۱۶۵	۱۸۶/۰۰۰۴	۱۲/۸
۱۲/۳	۱۵	۱	۰/۰۵	۱۶۵	۱۸۵/۲۱۴۹	۱۲/۳
۵/۴	۱۵	۱	۰/۱	۱۵۴	۱۶۲/۲۶۱۹	۵/۴
۱۰/۸	۲۰	۱	۰/۰۵	۱۶۶	۱۸۳/۸۷۵۲	۱۰/۸
۶/۸	۲۰	۱	۰/۱	۱۵۰	۱۶۰/۱۸۱۵	۶/۸
۳	۲۰	۱/۲	۰/۱	۱۷۵	۱۸۰/۱۶۳۸	۳
۷/۴	۲۰	۱/۵	۰/۱	۱۸۷	۲۰۰/۸۶۱۹	۷/۴
۱۰/۳	۲۵	۱	۰/۰۵	۱۶۶	۱۸۳/۱۳۱۵	۱۰/۳
۱۱	۲۵	۱	۰/۱	۱۴۴	۱۵۹/۸۹۱۴	۱۱
۸/۸	۲۵	۱	۰/۱۵	۱۳۴	۱۴۵/۸۰۳۱	۸/۸
۱۰/۷	۲۵	۱	۰/۲	۱۴۰	۱۵۴/۹۸۱۶	۱۰/۷
۱۰/۳	۲۵	۱	۰/۲۵	۱۴۷	۱۶۲/۱۳۹	۱۰/۳
۹/۹	۳۰	۱	۰/۰۵	۱۶۷	۱۸۳/۵۹۱۳	۹/۹
۹/۷	۳۵	۱	۰/۰۵	۱۶۸	۱۸۴/۲۳۲۱	۹/۷
۶/۵	۳۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۷۴	۱۸۵/۳۰۲۵	۶/۵

$$\beta_1 = 0.2631X_1 - 0.044X_1^2 + 0.544X_2 - 5.6222X_3 + 40X_4 - 100X_4^2 + 0.1687X_1X_4 - 4.1241 \quad (11)$$

$$\rho = 271.8246 - 0.5953X_1 + 0.119X_1^2 - 0.3712X_2 + 88.9552X_3 - 744X_4 + 1935X_4^2 - 0.443X_2X_4 \quad (12)$$

در معادلات فوق X_1 برابر با نیروی ورقگیر بر حسب کیلو نیوتن، X_2 برابر با استحکام تسلیم ورق بر حسب مگاپاسکال، X_3 برابر با ضخامت ورق بر حسب میلی متر، X_4 برابر با ضریب اصطکاک بین ورق و تجهیزات شکل دهی، β_1 برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره بر حسب درجه و ρ شعاع انحنا دیواره جانبی بر حسب میلی متر می باشد.

برای اعتبار سنجی روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)، مطابق جدول (۶) تا (۸)، سه آزمایش با شرایط متفاوت با آزمایش های قبلی انجام گردیده و نتایج حاصل با پیش بینی های روابط مذکور مقایسه شده اند. همانطور که از این جدول مشاهده می گردد، اختلاف زیادی بین پیش بینی های روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) با نتایج آزمایشگاهی وجود ندارد.

جدول (۶) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج رابطه (۱۰) برای ورق هایی با ضخامت ۱ mm و استحکام تسلیم ۳۶۵ MPa

نیروی ورقگیر (kN)	ضریب اصطکاک	β_1 حاصل از آزمایش (°)	β_1 حاصل از رابطه ۱۰ (°)	درصد خطا
۲/۵	۰/۱	۹/۱۴	۱۳/۷۸۲۱	۷/۵
۲/۵	۰/۱۵	۹/۱۵	۱۴/۵۵۳۲	۸/۵
۱۵	۰/۱۵	۶/۱۸	۱۷/۱۹۵۷	۷/۶

جدول (۷) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج رابطه (۱۱) برای ورق هایی با ضخامت ۱ mm و استحکام تسلیم ۳۶۵ MPa

نیروی ورقگیر (kN)	ضریب اصطکاک	β_1 حاصل از آزمایش (°)	β_1 حاصل از رابطه ۱۱ (°)	درصد خطا
۲/۵	۰/۱	۶/۸	۹/۲۰۲۶	۷
۲/۵	۰/۱۵	۱/۹	۹/۵۸۲۸	۵/۳
۱۵	۰/۱۵	۸/۱۰	۱۱/۵۶۰۳	۷

جدول (۸) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج رابطه (۱۲) برای ورق هایی با ضخامت ۱ mm و استحکام تسلیم ۳۶۵ MPa

نیروی ورقگیر (kN)	ضریب اصطکاک	β_1 حاصل از آزمایش (°)	β_1 حاصل از رابطه ۱۰ (°)	درصد خطا
۲/۵	۰/۱	۱۴۷	۱۶۷/۲۱۰۹	۱۳/۷
۲/۵	۰/۱۵	۱۳۵	۱۵۳/۳۸۹۹	۱۳/۶
۱۵	۰/۱۵	۱۳۲	۱۴۸/۵۵۱۸	۱۲/۵

پس از حصول اطمینان از صحت نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس، برای به دست آوردن روابطی برای پیش بینی مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی، با استفاده از نرم افزار مینی تب به تحلیل رگرسیونی مقادیر این پارامترها که از شبیه سازی اجزا محدود به دست آمده اند، پرداخته شده است. در این تحلیل متغیرهای ضریب اصطکاک، نیروی ورقگیر، استحکام تسلیم و ضخامت ورق به عنوان متغیرهای پیش بینی کننده و متغیرهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده اند. با استفاده از نرم افزار مینی تب، معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی به دست آمده است.

$$\beta_1 = 0.2631X_1 - 0.044X_1^2 + 0.544X_2 - 5.6222X_3 + 40X_4 - 100X_4^2 + 0.1687X_1X_4 - 4.1241 \quad (10)$$

- [2] Johnson W., and Yu T.X., Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam, *Journal of Mechanical Working Technology*, 6, 1982, pp. 5-21.
- [3] Johnson W., Yu T.X., On springback after the pure bending of beams and plates of elastic work hardening material, *International Journal of Mechanical Sciences*, 23, 1981, pp. 687-696.
- [4] Chongthairungruang B., Uthaisangsuk V., Suranuntchai S., Jirathearant S., Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel, *Journal of Materials and Design*, 39, 2012, pp. 318-328.
- [5] Zhou D., Siriam S., Jinka A., and Wagoner R.H., Bending and springback using membrane elements, *Engineering Systems Design and Analysis*, 75, 1996, pp. 135-142.
- [6] Siriam S., Wagoner R.H., Adding bending stiffness to 3-D membrane FEM programs, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 2000, pp. 1753-1782.
- [7] Pourboghtr F., Karabin M., Becker R., Chung K., A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading, *International journal of Plasticity*, 16, 2000, pp. 77-700.
- [8] Pourboghtr F., and Chu E., Springback in plane strain stretch/draw sheet forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, 36, 1995, pp. 327-341.
- [9] Pourboghtr F., Chu E., Prediction of springback and side wall curl in 2-D draw bending, *Journal of Materials Processing Technology*, 50, 1995, pp. 361-374.
- [10] Li G.Y., Tan M.J., Liew K.M., Springback analysis for sheet forming processes by explicit finite element method in conjunction

با نتایج آزمایشگاهی، نشان می‌دهد که مقادیر برگشت فتری و شعاع انحنا دیواره جانبی، در هر دو حالت همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که نرم‌افزار آباکوس، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر برگشت فتری و شعاع انحنا دیواره جانبی می‌باشد.

علاوه بر این، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که:

۱- افزایش استحکام تسلیم ورق، بر میزان برگشت فتری و انحنا دیواره جانبی می‌افزاید.

۲- افزایش ضخامت ورق، سبب کاهش برگشت فتری و انحنا دیواره جانبی می‌شود.

۳- افزایش نیروی ورقگیر و همچنین افزایش ضریب اصطکاک، تا مقادیر معینی سبب افزایش برگشت فتری و انحنا دیواره جانبی می‌شوند ولی پس از آن، مقدار برگشت فتری و انحنا دیواره جانبی را کاهش می‌دهند.

۶- فهرست علائم

L_f	طول اندازه گیر قطعه نهایی
L_o	طول اندازه گیر قطعه اولیه
R	نسبت کرنش
R_o	نسبت کرنش در جهت نورد ورق
R_{ϕ}	نسبت کرنش در جهت چهل و پنج درجه نسبت به جهت نورد ورق
R_{α}	نسبت کرنش در جهت نود درجه نسبت به جهت نورد ورق
W_f	عرض نهایی نمونه
W_o	عرض اولیه نمونه
β_1	برگشت فتری زاویه باز شدن دیواره
β_2	برگشت فتری زاویه فلنج
ϵ_w	کرنش عرضی قطعه
ϵ_t	کرنش ضخامت قطعه
ρ	شعاع انحنا دیواره جانبی

۷- مراجع

- [1] Gardiner F.J., The springback of metals, *Trans. ASME*, 79, 1957, pp. 1-9.

- [17] Barouzeh M.R., and Mondali M., Springback investigation warm V-bending conditions by numerical and experimental methods, *International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering*, Bangkok, December, 2011, pp. 185-190.
- [18] Huang J., Microstructure evolution during processing of dual phase and TRIP steels, University of British Columbia, 2004.
- [19] Kim H.S., and Koc M., Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 2008, pp. 370-383.
- [10] Barouzeh M.R., and Mondali M., Springback investigation with the orthogonal regression analysis, *International Journal of Solid Structure*, 36, 1999, pp. 4653-4668.
- [11] Samuel M., Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 105, 2000, pp. 382-393.
- [12] Liu G., Lin Z., Xu W., Bao Y., Variable blank holder force in U-shaped part forming for eliminating springback error, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 2002, pp. 259-264.
- [13] Liu G., Lin Z., and Bao Y., Improving dimensional accuracy of a U-shaped part through an orthogonal design experiment, *Finite Element Analysis*, 39, 2005, pp.116-127.
- [14] Ragai I., Lazim D., and Nemes A., Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 2005, pp. 116-127.
- [15] Mohammadi S.V., Parsa M.H., and Jalali Aghchai A., Effect of the thickness distribution and setting condition on springback in multi-layer sheet bending, *International Journal of Engineering*, 3, 2011, pp. 225-235.
- [16] Yang D.S., Liu W., Hu G.j., Zhou J., and Su Z., Study on hot forming process and springback of ultra-high strength steel Based on ABAQUS, *Journal of Advanced Materials Research*, 484, 2012, pp. 2430-2437.