



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۳ تا ۴۲

Vol. 47, No. 2, Winter 2015, pp. 33-42



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)

AmirKabir Journal of Science & Research
(Mechanical Engineering)
(ASJR-ME)

بدست آوردن روابطی برای پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنری و شعاع انحنای دیواره در خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی DP۶۰۰

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

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

۳- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۸)

چکیده

مهمترین محدودیت در شکل‌دهی مطلوب ورق‌های فلزی، پدیده بازیابی کشسان در طول باربرداری است که منجر به بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌گردد. بنابراین پیش‌بینی بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی برای تولید محصولات دقیق ضروری است. در این تحقیق، اثر نیروی ورق‌گیر، ضریب اصطکاک، ضخامت ورق و استحکام تسلیم ورق بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی DP۶۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این عوامل از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده و نتایج حاصل از این نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های عملی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تصدیق می‌کنند. در پایان با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی‌تب، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تجزیه و تحلیل شده و معادلاتی برای پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی با استفاده از مقادیر ضریب اصطکاک، نیروی ورق‌گیر، ضخامت و استحکام تسلیم ورق بدست آورده شده است.

کلمات کلیدی:

شکل‌دهی، U شکل، بازگشت فنری، شعاع انحنای دیواره جانبی، فولاد دو فازی

۱- مقدمه

در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، یکی از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت قطعه کار، پدیده بازگشت فنری^۱ است. این پدیده به صورت تغییر در شکل قطعه کار، بعد از برداشتن ابزار نمایان می‌گردد و برای موادی که نسبت مقاومت ماده به مدول الاستیسیته آنها بالاتر است (مثل فولادهای دو فازی)، محسوس‌تر می‌باشد.

محققین بسیاری پدیده بازگشت فنری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در برخی از این بررسی‌ها به منظور استفاده از روش‌های تحلیلی به ناچار از فرضیات ساده‌کننده بسیاری از قبیل وجود رابطه ساده بین تنش و کرنش، حذف اصطکاک، نادیده گرفتن کم شدن ضخامت ماده، چشم‌پوشی از اثر بوشینگ و بزرگ بودن شعاع خمش در مقایسه با ضخامت استفاده شده است [۱۶، ۴، ۱].

با نوآوری‌هایی که در سال‌های اخیر در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی ایجاد شده است و تأکید می‌گردد 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 رابطه‌ای را برای شعاع خمش بعد از بازگشت فنری، برای نوارهای چند لایه، تعیین نموده است [۱۷]. پس از آن لیو 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 [۶]. زنگ و هو به این نکته اشاره نمودند که اثر بارگذاری سیکلی ماده و روش‌های محاسبه بازگشت فنری بر مقدار تنش‌ها و تنش‌های باقیمانده بسیار زیاد است [۱۸]. در همین رابطه گاؤ و کینزل بر اساس فرضیات مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپ و سینماتیکی و مدل سطح چندگانه Mroz، مدل جدیدی را برای پیش‌بینی میزان بازگشت فنری در بارگذاری‌های پیچیده ارائه دادند [۲].

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 برای بررسی کلیه عوامل مؤثر بر میزان بازگشت فنری، پرهزینه، دشوار و زمانبر است. در نتیجه کاربرد روش‌های عددی برای بررسی پدیده بازگشت فنری بیش از پیش در حال توسعه است. با بررسی تحقیقات انجام گرفته به خوبی می‌توان دریافت که در میان روش‌های عددی، روش‌های اجزای محدود (FEM^۲) نقش عمده‌ای در مطالعه مسائل شکل‌دهی داشته‌اند. با استفاده از این روش‌ها، رفتار ماده و فرایند تغییر شکل تا سطح قابل قبولی شبیه‌سازی می‌شود. از این رو، به کارگیری آنها در زمان طراحی ابزار شکل‌دهی، هزینه تولید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینه شبیه‌سازی عددی انواع فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی انجام شده است. از آن جمله، می‌توان به تحقیق زو برای کاهش زمان محاسبات و ابداع روشی به نام EBG^۳ اشاره نمود [۱۹]. در

این روش از المان غشایی^۴ برای محاسبه میزان بازگشت فنری استفاده شده است. پس از آن، سیرپام و واگنر روش فوق را در بررسی مسائل شکل‌دهی در حالت سه بعدی توسعه دادند [۱۵]. 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 ادامه فعالیت‌های یاد شده، پوربقرات و همکارانش از روش هیبریدی با المان‌های غشایی و پوسته‌ای^۵ برای محاسبه بازگشت فنری در فرایندهای شکل‌دهی تحت بار متقارن محوری استفاده نمودند [۱۰].

یکی از قطعاتی که در صنایع شکل‌دهی و از جمله اتومبیل‌سازی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، قطعات U شکل می‌باشند. در قطعات U شکل علاوه بر پدیده بازگشت فنری، پدیده انحنای دیواره جانبی^۶ نیز مشاهده می‌گردد. انحنای دیواره جانبی پدیده‌ای است که نتیجه تغییر شکل پیچیده کشش، خمش و رهاسازی آنها می‌باشد و در دیواره قطعات تغییر شکل یافته رخ می‌دهد. مطالعات بسیاری در مورد چگونگی مدل‌سازی این نوع فرایند شکل‌دهی و علل دو پدیده مذکور و عوامل مؤثر بر آنها انجام شده است. ابتدا پوربقرات و چو با استفاده از روش هیبریدی سعی کردند این فرایند را شبیه‌سازی کنند [۱۱، ۱۲]. چند سال بعد لی و همکارانش روشی را برای محاسبه بازگشت فنری بر اساس مدل اجزای محدود با استفاده از حل‌کننده دینامیکی ارائه دادند [۷]. در نتیجه این تحقیق، آنها رابطه‌ای بین بازگشت فنری و برخی عوامل طراحی بر اساس مدل آماری تحلیل رگرسیون تعامدی تعیین کردند. در فعالیت‌های نزدیک به موضوع تحقیق جاری، ساموئل اثر شعاع سنبه، شعاع ماتریس و مقدار ناهمسانگردی را بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی بررسی نموده است [۱۴]. لیو و همکارانش نیز برای جبران کاهش انحنای دیواره جانبی و بازگشت فنری در خمش کششی قطعات U شکل، استفاده از نیروی نگهدارنده متغیر را پیشنهاد نموده‌اند [۸، ۹]. راگایی و همکارانش اثر مقدار ناهمسانگردی را در میزان بازگشت فنری ورقه‌های فولاد ضد زنگ ۴۱۰، به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳]. هاما و همکارانش از روشی به نام ناگاتا در فرایند فرم‌دهی فلزات استفاده نمودند و اثر دقت در مدل‌سازی قالب و پانچ را در شبیه‌سازی بازگشت فنری فولاد با استحکام بالا مورد بررسی قرار دادند [۳].

در صنایع مختلف بویژه اتومبیل‌سازی، تولید قطعات با کمترین وزن ممکن، بسیار مهم است. کاهش وزن اتومبیل‌ها مزایای بسیاری از جمله کاهش مصرف سوخت را در پی دارد. برای تولید اینگونه قطعات نیاز است تا از مواد با استحکام بالا و وزن سبک استفاده گردد. امروزه در صنایع اتومبیل‌سازی به جای استفاده از آلیاژهای با استحکام بالا و سبک وزن آلومینیوم و منیزیم، از فولادهای دو فازی که دارای نسبت استحکام به چگالی بالا می‌باشند و همچنین نسبت به آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم

^۴ Membrane Element

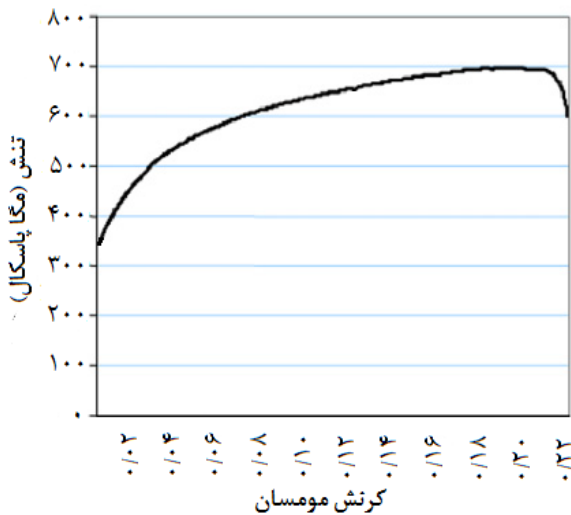
^۵ Shell Elements

^۶ Side Wall Curl

^۱ Springback

^۲ Finite Element Method

^۳ Element Bending Group



شکل ۱: منحنی تنش - کرنش مومسان ورق

جدول ۱: خواص مکانیکی ورق

| مقدار | خاصیت |
|--------|-----------------------|
| ۲۰۵/۳۵ | مدول الاستیسیته (GPa) |
| ۰/۷۹ | R_0 |
| ۱/۰۳ | R_{45} |
| ۱/۰۱ | R_{90} |
| ۰/۳ | نسبت پواسون |
| ۷۸۰۰ | چگالی (kg/m^3) |
| ۳۶۵ | استحکام تسلیم (MPa) |

دیواره جانبی (p) انجام شده است. میانگین این هشت اندازه‌گیری برای هر کدام از عوامل β_1 ، β_2 و p به عنوان مقدار آن عامل در نظر گرفته شده است. این کار سبب کاهش خطاهایی مانند خطای ناشی از پیچش ورق شده، در نتیجه درستی نتایج حاصل افزایش می‌یابد.

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

فرایند خمکاری U شکل ورق با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس^۷ شبیه‌سازی شده است. در شکل ۲ شماتیک مسئله خمکاری U شکل ورق نشان داده شده است. به علت تقارن مسئله نسبت به صفحه میانی، فقط از نیمه سمت راست مدل استفاده شده است. این کار سبب افزایش سرعت و کاهش زمان تحلیل می‌شود. برای انجام این شبیه‌سازی، پنج مرحله^۸ تعریف شده است. این کار سبب افزایش درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌گردد [۵].

^۷ ABAQUS

^۸ Step

ارزان‌ترند استفاده می‌شود. استفاده از این نوع فولادها، مشکلاتی را نیز به همراه دارد که یکی از این مشکلات، بزرگ بودن مقدار بازگشت فنری و انحنای زیاد دیواره جانبی در شکل‌دهی این نوع فولادها می‌باشد. در این مقاله در خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی DP600، پدیده‌های بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی و اثر عوامل نیروی ورق‌گیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم و ضخامت ورق بر این پدیده‌ها بررسی شده و در پایان روابطی برای پیش‌بینی مقادیر این پدیده‌ها با استفاده از مقادیر نیروی ورق‌گیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم ورق و ضخامت ورق بدست آورده شده است.

۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق از پرس INSTRON 8501 که پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۱۵۰ تن می‌باشد، استفاده شده است. سنبه، ماتریس و ورق‌گیر همگی از فولاد ابزاری با سختی ۵۵ HRC ساخته شده و ورق‌ها از جنس فولاد دو فازی 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 استفاده شده در این تحقیق که در جهت نورد ورق با استفاده از آزمون کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM E8 و در نرخ کرنش $0.01 S^{-1}$ بدست آمده، در شکل ۱ نشان داده شده و خصوصیات مکانیکی این ورق‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول R_0 ، R_{45} و R_{90} به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر r در جهت‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق می‌باشند.

۳- آزمایش‌ها

در این تحقیق، 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 بوسیله روانکارهای مناسب روغنکاری شده‌اند. 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 با سرعت ثابت ۱ mm/s به سمت پایین حرکت داده می‌شود. برای کنترل دقیق جابه‌جایی سنبه و مقدار نفوذ آن به داخل ماتریس که در این تحقیق برابر با ۷۰ mm است، از یک ساعت اندازه‌گیری استفاده شده است. پس از آنکه سنبه به اندازه ۷۰ mm در داخل ماتریس نفوذ کرد، عملیات شکل‌دهی 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.

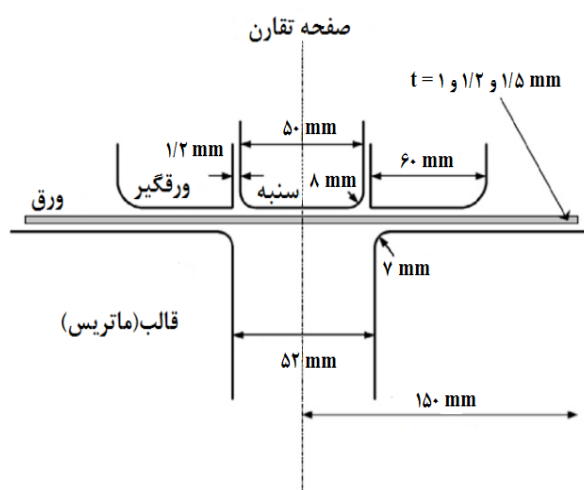
در این تحقیق، هر آزمایش بر روی دو ورق انجام شده و در هر ورق، چهار اندازه‌گیری روی چهار گوشه ورق، برای هر کدام از عوامل بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره (β_1)، بازگشت فنری زاویه فلنج (β_2) و شعاع انحنای

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است این مراحل عبارتند از:

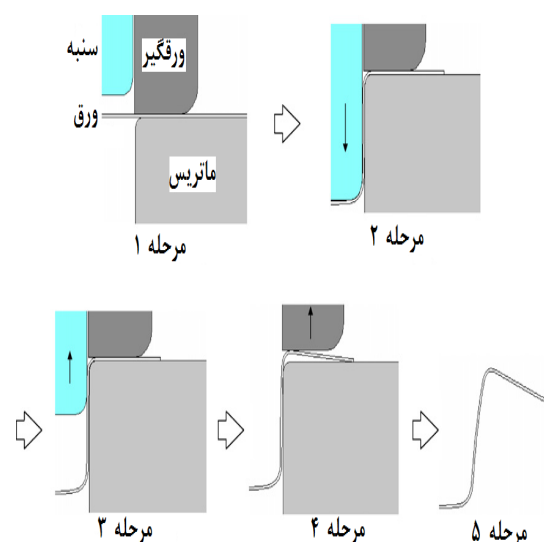
- ۱- در اولین مرحله، نیروی ورق‌گیر اعمال می‌شود.
- ۲- در دومین مرحله، سنبه با سرعت ثابت به درون حفره قالب (ماتریس) نفوذ کرده و سبب تغییر شکل ورق می‌گردد تا اینکه به عمق ۷۰ میلی‌متری ماتریس برسد.
- ۳- در سومین مرحله، سنبه به سمت بالا باز می‌گردد.
- ۴- در چهارمین مرحله، ورق‌گیر از روی ورق برداشته می‌شود.
- ۵- در پنجمین مرحله که مرحله نهایی است، قطعه شکل داده شده بطور کامل از قالب خارج شده و تمامی تماس‌های تعریف شده حذف می‌شوند.

جدول ۲: روش‌های مختلف برای شبیه‌سازی فرایند

| حالت | نوع المان | شبیه‌سازی شکل‌دهی | شبیه‌سازی بازگشت فنری |
|------|-----------|-------------------|-----------------------|
| ۱ | توپر | حل ضمنی | حل صریح |
| ۲ | توپر | حل صریح | حل صریح |
| ۳ | توپر | حل ضمنی | حل ضمنی |
| ۴ | توپر | حل صریح | حل ضمنی |
| ۵ | پوسته‌ای | حل ضمنی | حل صریح |
| ۶ | پوسته‌ای | حل صریح | حل ضمنی |
| ۷ | پوسته‌ای | حل ضمنی | حل ضمنی |
| ۸ | پوسته‌ای | حل صریح | حل صریح |



شکل ۲: نمایش شماتیک هندسه قالب



شکل ۳: مراحل مختلف شبیه‌سازی فرایند

از دو نوع المان توپر^۹ و پوسته‌ای استفاده شده و برای هر کدام از شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی و بازگشت فنری از دو روش حل صریح^{۱۰} و حل ضمنی^{۱۱} استفاده شده است.

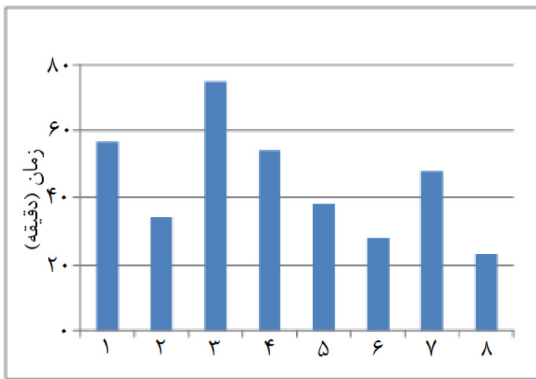
در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر عوامل بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی که از آزمایش بدست آمده‌اند، با مقادیر بدست آمده از حالت‌های مختلف شبیه‌سازی اجزای محدود (جدول ۲) مقایسه شده‌اند. در شکل ۷ زمان لازم برای انجام محاسبات در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی اجزای محدود (جدول ۲) با هم مقایسه شده‌اند. از این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که، استفاده از روش حل ضمنی برای شبیه‌سازی بازگشت فنری، سبب افزایش قابل ملاحظه درستی پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی می‌گردد. هر چند استفاده از روش حل صریح برای شبیه‌سازی شکل‌دهی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر درستی این پیش‌بینی‌ها نمی‌گذارد ولی زمان انجام محاسبات را کاهش می‌دهد. استفاده از المان نوع پوسته‌ای به جای المان نوع توپر علاوه بر کاهش زمان انجام محاسبات، سبب افزایش درستی پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی نیز می‌گردد. بنابراین بهترین حالت برای انجام این شبیه‌سازی که علاوه بر داشتن دقت بالا از سرعت بالایی نیز برخوردار می‌باشد، حالت شش است که در آن از المان نوع پوسته‌ای برای مدل‌سازی ورق استفاده شده، همچنین از روش حل صریح برای شبیه‌سازی شکل‌دهی و از روش حل ضمنی برای شبیه‌سازی بازگشت فنری استفاده شده است.

در این مقاله برای انتخاب روش مناسب برای انجام شبیه‌سازی، مطابق جدول ۲، هشت حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌گردد، در این مقاله برای مدل‌سازی ورق

⁹ Solid Element

¹⁰ Explicit

¹¹ Implicit



شکل ۷: زمان لازم برای انجام محاسبات در حالات مختلف شبیه‌سازی

نقاط لازم برای اندازه‌گیری مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. برای اندازه‌گیری مقادیر این عوامل، ابتدا مختصات نقاط A، B، C، D و E پس از وقوع پدیده بازگشت فنری و مختصات نقاط A و B قبل از وقوع پدیده بازگشت فنری (مختصات A_0 و B_0) اندازه‌گیری شده سپس با استفاده از این مختصات و روابط (۱) تا (۸)، مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی بدست آورده می‌شود.

$$\beta_1 = \theta_1 - \theta_1^0 \quad (1)$$

$$\beta_2 = \theta_2^0 - \theta_2 \quad (2)$$

$$\theta_1^0 = \theta_2^0 = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{ox} \cdot \overrightarrow{A_0 B_0}}{|\overrightarrow{ox}| |\overrightarrow{A_0 B_0}|} \right) \quad (3)$$

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{ox} \cdot \overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{ox}| |\overrightarrow{AB}|} \right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{ED}}{|\overrightarrow{AB}| |\overrightarrow{ED}|} \right) \quad (5)$$

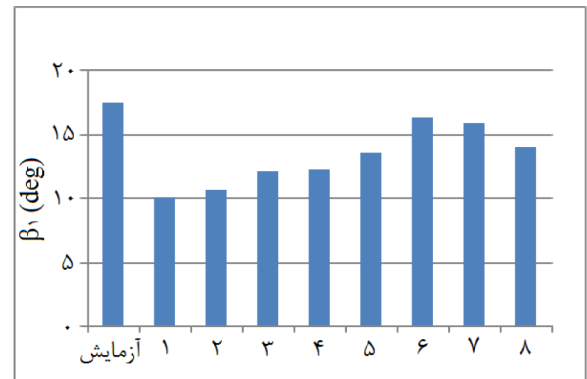
$$x_R = \frac{x_B^2 + y_B^2 - x_A^2 - y_A^2 - \frac{y_A - y_B}{y_C - y_B} (x_C^2 + y_C^2 - x_B^2 - y_B^2)}{2 \left[x_B - x_A + (x_C - x_B) \frac{y_A - y_B}{y_C - y_B} \right]} \quad (6)$$

$$y_R = \frac{x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 + 2x_R(x_B - x_A)}{2(y_A - y_B)} \quad (7)$$

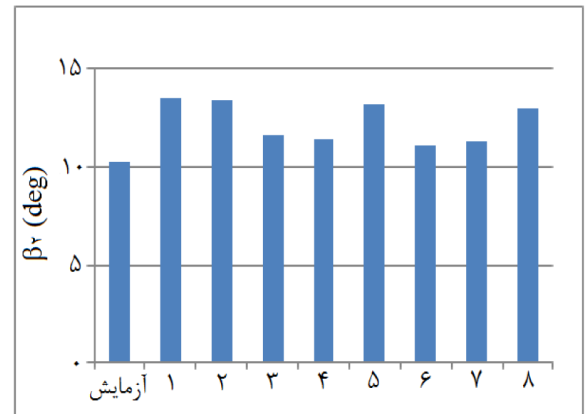
$$\rho = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (y_A - y_R)^2} \quad (8)$$

۵- نتایج و بحث

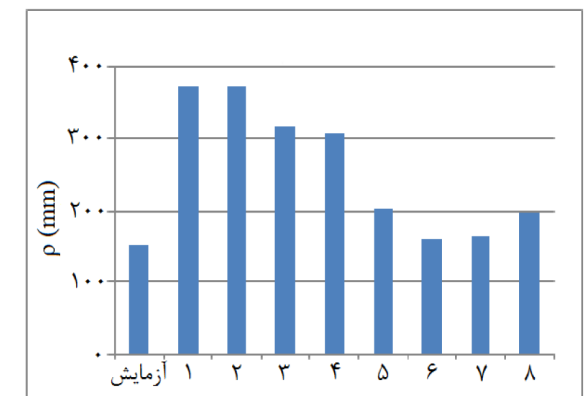
در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای ورق‌هایی با ضخامت ۱ mm و استحکام تسلیم ۳۶۵ MPa و در جداول ۴ و ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود بوسیله نرم‌افزار آباکوس بیان شده است.



شکل ۴: مقادیر بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره در حالات مختلف شبیه‌سازی وقتی ضخامت ورق ۱ mm، نیروی ورق گیر ۱۵ kN، ضریب اصطکاک ۱/۰ و استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa است



شکل ۵: مقادیر بازگشت فنری زاویه فلنج در حالات مختلف شبیه‌سازی وقتی ضخامت ورق ۱ mm، نیروی ورق گیر ۱۵ kN، ضریب اصطکاک ۱/۰ و استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa است



شکل ۶: مقادیر شعاع انحنا دیواره جانبی در حالات مختلف شبیه‌سازی وقتی ضخامت ورق ۱ mm، نیروی ورق گیر ۱۵ kN، ضریب اصطکاک ۱/۰ و استحکام تسلیم ورق ۳۶۵ MPa است

جانبی، با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب^{۱۲} به تحلیل رگرسیونى مقادیر این عوامل که از شبیه‌سازی اجزای محدود بدست آمده‌اند، پرداخته شده است. در این تحلیل متغیرهای ضریب اصطکاک، نیروی ورق‌گیر، استحکام تسلیم و ضخامت ورق به عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیرهای بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحناى دیواره جانبی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب برای عوامل بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحناى دیواره جانبی بدست آورده شده است.

$$\beta_1 = 0.2631X_1 - 0.0044X_1^2 + 0.0544X_2 - 5.6222X_3 + 40X_4 - 100X_4^2 + 0.1687X_1X_4 - 4.1241 \quad (9)$$

$$\beta_2 = 0.2023X_1 - 0.0034X_1^2 + 0.0477X_2 - 4.152X_3 + 21.3947X_4 - 56.1913X_4^2 + 0.1027X_1X_4 - 6.1436 \quad (10)$$

$$\rho = 271.8246 - 0.5953X_1 + 0.0119X_1^2 - 0.3712X_2 + 88.9552X_3 - 744X_4 + 1935X_4^2 - 0.0443X_2X_4 \quad (11)$$

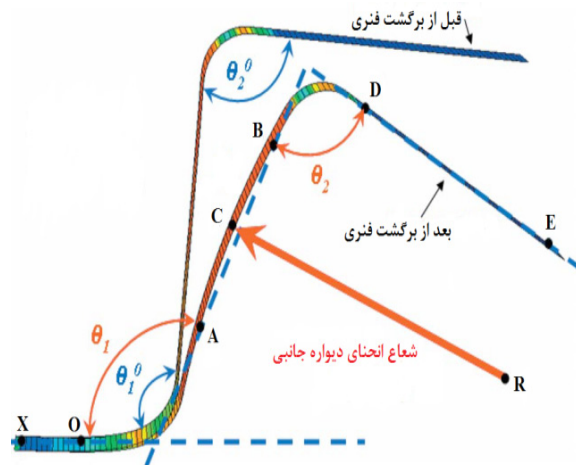
در روابط فوق X_1 برابر با نیروی ورق‌گیر بر حسب کیلو نیوتن، X_2 برابر با استحکام تسلیم ورق بر حسب مگاپاسکال، X_3 برابر با ضخامت ورق بر حسب میلی‌متر، X_4 برابر با ضریب اصطکاک بین ورق و تجهیزات شکل‌دهی، β_1 بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره بر حسب درجه، β_2 بازگشت فنری زاویه فلنج بر حسب درجه و ρ شعاع انحناى دیواره جانبی بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

از بررسی روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) نتیجه گرفته می‌شود که:

۱- با افزایش نیروی ورق‌گیر در ابتدا میزان بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحناى دیواره جانبی کاهش می‌یابد ولی با عبور نیروی ورق‌گیر از مقادیر معینی، بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج شروع به کاهش و شعاع انحناى دیواره جانبی شروع به افزایش می‌کند. علت پدیده فوق این است که، در ابتدا با افزایش نیروی ورق‌گیر، نیروهای غشایی - کششی ایجاد شده در ورق، سبب محدودتر شدن منطقه مومسان حاصل بر روی ورق می‌گردند که علت این امر خمش ورق و تنش‌های فشاری ایجاد شده است. با افزایش نیروی ورق‌گیر، تنش‌های غشایی - کششی حاصل از نیروی ورق‌گیر توسعه یافته و با گسترش منطقه مومسان، کاهش میزان بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج و افزایش شعاع انحناى دیواره جانبی اتفاق خواهد افتاد.

۲- با افزایش استحکام تسلیم ورق، بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحناى دیواره جانبی کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش ضخامت ورق، بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج کاهش و شعاع انحناى دیواره جانبی افزایش می‌یابد.



شکل ۸: نقاط لازم برای اندازه‌گیری مقادیر β_1 ، β_2 و ρ

با مقایسه نتایج آزمایش‌ها که در جدول ۳ بیان شده و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود که در جداول ۴ و ۵ بیان شده است، مشاهده می‌شود که برای بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحناى دیواره جانبی، بیش‌ترین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به ترتیب ۸/۳، ۹/۲ و ۱۳/۴ درصد و میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود برای بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحناى دیواره جانبی به ترتیب ۷/۲، ۶/۹ و ۹/۴ درصد می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود وجود ندارد.

جدول ۳: نتایج آزمایش‌های عملی برای ورق‌هایی با ضخامت ۱ mm و استحکام تسلیم ۳۶۵ MPa

| نیروی ورق‌گیر (kN) | ضریب اصطکاک | β_1 (°) | β_2 (°) | ρ (mm) |
|--------------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۱۳/۶ | ۸/۷ | ۱۶۸ |
| ۱۵ | ۰/۰۵ | ۱۶/۲ | ۹/۷ | ۱۶۵ |
| ۲۵ | ۰/۰۵ | ۱۷/۱ | ۱۰/۳ | ۱۶۶ |
| ۲/۵ | ۰/۱ | ۱۴/۹ | ۸/۶ | ۱۴۷ |
| ۱۵ | ۰/۱ | ۱۷/۵ | ۱۰/۳ | ۱۵۰ |
| ۲۵ | ۰/۱ | ۱۸/۵ | ۱۱ | ۱۴۸ |
| ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۱۵/۹ | ۹/۱ | ۱۳۵ |
| ۱۵ | ۰/۱۵ | ۱۸/۶ | ۱۰/۸ | ۱۳۲ |
| ۲۵ | ۰/۱۵ | ۱۹/۵ | ۱۱/۴ | ۱۳۱ |

برای بدست آوردن روابطی برای پیش‌بینی مقادیر عوامل بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، بازگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحناى دیواره

¹² MINITAB

جدول ۴: نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس

| نیروی ورق گیر (kN) | ضخامت ورق (kN) | ضریب اصطکاک | استحکام تسلیم (kN) | β_1 (°) | β_2 (°) | ρ (mm) |
|-----------------------|-------------------|----------------|-----------------------|---------------|---------------|-------------|
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۰/۵۴۷۸ | ۶/۸۵۳۵ | ۲۰۳/۸۳۷۹ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۲/۵۰۱۲ | ۸/۹۳۳۲ | ۱۸۸/۳۱۲۲ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۴/۴۹۸۰ | ۱۰/۱۷۳۹ | ۱۷۶/۹۳۱۷ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۱/۷۷۶۵ | ۷/۴۷۱۴ | ۱۷۷/۸۹۱۸ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۳/۶۵۱۵ | ۹/۳۰۵۴ | ۱۶۶/۸۰۹۲ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۵/۷۰۲۹ | ۱۰/۸۴۲۱ | ۱۴۸/۷۶۹۸ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۲/۱۷۷۶ | ۷/۵۰۵۴ | ۱۵۷/۶۳۳۴ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۴/۶۵۴۲ | ۹/۳۸۱۱ | ۱۴۵/۷۲۱۶ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۷/۰۱۷۹ | ۱۱/۵۴۱۷ | ۱۳۹/۱۰۳۰ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۹/۹۰۴۰ | ۶/۳۶۷۶ | ۲۱۴/۸۸۹۵ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۱/۰۸۵۸ | ۷/۵۴۲۱ | ۲۰۸/۱۸۴۷ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۲/۰۷۲۹ | ۹/۱۵۲۰ | ۱۹۹/۳۶۸۳ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۰/۸۹۴۳ | ۶/۸۳۱۶ | ۱۹۵/۰۱۳۷ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۲/۵۵۴۶ | ۸/۴۶۱۸ | ۱۸۴/۱۷۵۳ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۴/۲۴۷۱ | ۱۰/۲۲۲۴ | ۱۷۳/۲۹۷۳ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۱/۴۴۳۸ | ۶/۹۹۲۷ | ۱۷۸/۸۳۱۵ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۳/۴۶۱۹ | ۸/۸۴۳۹ | ۱۶۸/۶۸۱۱ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۵/۹۱۵۱ | ۱۰/۷۸۳۴ | ۱۵۷/۷۰۲۹ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۷/۸۰۳۶ | ۵/۰۰۰۸ | ۲۵۰/۲۱۷۰ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۰/۱۱۴۶ | ۶/۷۶۵۶ | ۲۳۵/۶۸۴۲ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۰۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۱/۷۷۲۳ | ۸/۴۷۵۳ | ۲۱۶/۱۱۸۷ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۹/۳۴۱۵ | ۵/۷۸۵۴ | ۲۲۲/۳۹۹۱ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۱/۱۶۲۴ | ۷/۲۲۸۰ | ۲۰۵/۳۳۱۸ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۳/۰۵۱۲ | ۹/۱۶۷۵ | ۱۹۰/۸۹۸۹ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۰/۲۴۶۷ | ۵/۹۶۴۳ | ۲۰۷/۴۸۲۳ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۱/۷۴۲۸ | ۷/۵۱۴۳ | ۱۹۳/۴۶۰۷ |
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۰/۱۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۳/۷۹۱۱ | ۹/۳۴۷۹ | ۱۷۹/۷۰۲۴ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۲/۸۹۸۷ | ۸/۷۶۴۹ | ۱۹۹/۸۹۷۶ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۴/۹۴۳۲ | ۱۰/۵۹۳۲ | ۱۸۵/۲۱۴۹ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۶/۷۳۱۵ | ۱۲/۱۶۱۴ | ۱۷۰/۵۵۲۶ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۴/۳۵۴۸ | ۹/۳۹۷۰ | ۱۷۴/۱۸۲۷ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۶/۲۹۱۴ | ۱۱/۱۱۷۰ | ۱۶۰/۱۸۱۵ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۸/۱۰۷۴ | ۱۲/۹۹۱۶ | ۱۴۵/۶۵۸۲ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۵/۱۸۱۷ | ۹/۴۹۸۱ | ۱۵۴/۹۴۱۶ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۷/۲۸۲۶ | ۱۱/۳۲۸۲ | ۱۴۱/۰۱۲۹ |

جدول ۴: نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس (ادامه)

| | | | | | | |
|----|----|------|--------|---------|---------|----------|
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۹/۵۱۶۷ | ۱۳/۱۹۱۸ | ۱۳۸/۲۶۱۹ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۱/۸۳۳۰ | ۷/۹۱۶۲ | ۲۱۲/۹۹۱۹ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۳/۵۴۷۱ | ۹/۵۳۴۶ | ۲۰۳/۲۹۵۸ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۰۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۵/۵۰۳۱ | ۱۱/۱۱۱۸ | ۱۹۴/۷۳۴۵ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۳/۱۰۰۷ | ۸/۷۷۴۱ | ۱۹۱/۶۹۰۱ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۵/۲۴۱۶ | ۱۰/۳۹۴۶ | ۱۸۰/۱۶۳۸ |
| ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱ | ۴۰/۱/۵ | ۱۶/۷۸۱۹ | ۱۱/۸۳۷۴ | ۱۶۸/۴۵۳۳ |

جدول ۵: نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس

| نیروی ورق‌گیر (kN) | ضخامت ورق (kN) | ضریب اصطکاک | استحکام تسلیم (kN) | $\beta_1 (^\circ)$ | $\beta_2 (^\circ)$ | ρ (mm) |
|-----------------------|-------------------|----------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| ۱۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۴/۲۸۶۹ | ۸/۸۳۷۱ | ۱۷۳/۸۰۴۹ |
| ۱۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۶/۴۸۲۵ | ۱۰/۹۲۸۱ | ۱۶۴/۵۹۴۷ |
| ۱۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۸/۵۹۷۶ | ۱۲/۶۰۱۳ | ۱۵۴/۰۴۱۶ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۰/۳۴۸۷ | ۶/۶۹۴۰ | ۲۴۵/۴۸۱۶ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۲/۶۴۸۲ | ۸/۵۳۷۵ | ۲۲۳/۸۴۷۰ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۴/۷۰۹۳ | ۱۰/۴۵۳۹ | ۲۱۱/۲۹۶۳ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۱/۹۱۱۶ | ۷/۳۹۸۸ | ۲۱۶/۴۳۸۹ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۳/۸۰۸۷ | ۹/۳۳۴۰ | ۲۰۰/۸۶۱۹ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۴۰/۱/۵ | ۱۵/۹۹۶۱ | ۱۰/۹۸۰۹ | ۱۸۶/۰۱۸۷ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۲/۹۸۹۴ | ۷/۹۴۳۲ | ۲۰۲/۳۱۸۰ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۴/۴۹۶۴ | ۹/۴۹۵۸ | ۱۸۸/۶۹۱۸ |
| ۱۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۶/۴۸۱۹ | ۱۱/۲۹۴۳ | ۱۷۴/۹۳۸۹ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۳/۸۰۹۸ | ۹/۴۵۵۸ | ۱۹۹/۰۰۱۲ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۵/۹۹۱۷ | ۱۱/۱۹۸۷ | ۱۸۳/۱۳۱۵ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۰۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۷/۸۹۳۴ | ۱۲/۹۸۵۹ | ۱۶۹/۵۵۳۴ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۵/۳۷۳۸ | ۱۰/۱۴۱۶ | ۱۷۱/۴۰۶۳ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۷/۲۲۱۹ | ۱۱/۹۷۱۵ | ۱۵۹/۸۹۱۴ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱ | ۴۰/۱/۵ | ۱۹/۰۸۷۹ | ۱۳/۲۸۷۴ | ۱۴۵/۴۷۹۳ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۵/۹۸۷۳ | ۱۰/۲۲۶۳ | ۱۵۴/۸۹۴۸ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۸/۳۴۲۹ | ۱۲/۳۷۷۳ | ۱۴۱/۸۰۳۱ |
| ۲۵ | ۱ | ۰/۱۵ | ۴۰/۱/۵ | ۲۰/۹۱۰۴ | ۱۳/۹۹۵۳ | ۱۳۸/۲۵۹۴ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۲/۴۰۱۱ | ۸/۲۳۸۰ | ۲۱۲/۵۹۶۸ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۴/۶۸۱۳ | ۹/۸۹۷۸ | ۲۰۲/۴۹۷۲ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۰۵ | ۴۰/۱/۵ | ۱۶/۲۸۰۳ | ۱۱/۹۱۰۴ | ۱۹۴/۲۹۱۷ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۴/۰۴۹۶ | ۹/۳۱۱۶ | ۱۹۱/۰۰۰۵ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۵/۷۸۹۰ | ۱۰/۹۵۱۲ | ۱۷۹/۰۲۲۹ |

جدول ۵: نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس (ادامه)

| | | | | | | |
|----|-----|------|-------|---------|---------|----------|
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۷/۸۵۰۷ | ۱۲/۵۰۶۱ | ۱۶۷/۴۲۷۴ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۵/۰۱۴۲ | ۹/۶۰۱۰ | ۱۷۲/۹۳۱۶ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۷/۴۸۷۱ | ۱۱/۷۱۶۸ | ۱۶۲/۶۸۲۲ |
| ۲۵ | ۱/۲ | ۰/۱۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۹/۵۸۴۱ | ۱۳/۷۸۴۹ | ۱۵۳/۶۹۴۶ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۱/۴۸۷۴ | ۷/۳۹۲۳ | ۲۴۴/۰۱۷۲ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۳۶۵ | ۱۳/۵۸۷۴ | ۹/۱۳۴۱ | ۲۲۰/۷۹۸۴ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۰۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۵/۵۶۷۰ | ۱۰/۹۸۹۳ | ۲۱۱/۰۱۳۷ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۳۲۸/۵ | ۱۲/۵۶۲۸ | ۸/۰۶۴۵ | ۲۱۶/۵۳۰۱ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۳۶۵ | ۱۴/۶۴۸۴ | ۹/۸۹۵۰ | ۲۰۰/۸۰۲۸ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱ | ۴۰۱/۵ | ۱۶/۵۴۸۰ | ۱۱/۵۳۰۸ | ۱۸۵/۹۰۸۱ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۳۲۸/۵ | ۱۴/۰۳۲۴ | ۸/۷۷۴۸ | ۲۰۱/۱۲۸۰ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۳۶۵ | ۱۵/۵۹۹۴ | ۱۰/۴۰۳۱ | ۱۸۷/۴۸۱۹ |
| ۲۵ | ۱/۵ | ۰/۱۵ | ۴۰۱/۵ | ۱۷/۴۸۵۰ | ۱۲/۰۳۱۸ | ۱۷۳/۷۸۹۹ |

مقادیر بازگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی است. در پایان به کمک نرم‌افزار مینی‌تب با استفاده از مقادیر بدست آمده بوسیله نرم‌افزار آباکوس برای β_1 ، β_2 و ρ روابطی برای پیش‌بینی مقادیر β_1 ، β_2 و ρ بدست آورده شده است. از این روابط نتیجه گرفته می‌شود که، اولاً افزایش استحکام تسلیم ورق سبب افزایش بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌گردد، ثانیاً افزایش ضخامت ورق سبب کاهش بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌گردد و ثالثاً افزایش نیروی ورق‌گیر و همچنین افزایش ضریب اصطکاک، تا مقادیر معینی سبب افزایش بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌گردند ولی پس از آن، مقدار بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی را کاهش می‌دهند.

۷- مراجع

- [1] Gardiner, F.J., "The springback of metals", Trans. ASME, Vol. 79 No.1: pp. 1- 9, 1957.
- [2] Gau, J.T. and Kinzel, G.L., "An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback prediction", Journal of Materials Processing Technology, Vol 108, No. 3: pp. 369- 375, 2001.
- [3] 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", International Journal of Mechanical Sciences, Vol 50, No.2: pp. 175- 192, 2008.
- [4] Johnson, W. and Yu, T.X., "On springback after the pure bending of beams and plates of elastic work hardening materials", International Journal of Mechanical

۴- با افزایش ضریب اصطکاک در ابتدا بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد ولی با عبور ضریب اصطکاک از مقادیر معینی، بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج شروع به کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی شروع به افزایش می‌کند، علت این پدیده این است که، در ابتدا با افزایش ضریب اصطکاک، نیروهای غشایی - کششی ایجاد شده در ورق، سبب محدودتر شدن منطقه مومسان حاصل بر روی ورق می‌گردند که علت این امر خمش ورق و تنش‌های فشاری ایجاد شده است؛ با افزایش ضریب اصطکاک، تنش‌های غشایی - کششی حاصل از اصطکاک توسعه یافته و با گسترش منطقه مومسان، کاهش بازگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و بازگشت فنری زاویه فلنج و افزایش شعاع انحنای دیواره جانبی اتفاق خواهد افتاد. بنابراین به منظور کاهش پدیده‌های ناخواسته بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی، در مواردی که کاهش ضریب اصطکاک به مقادیر خیلی کوچک امکان‌پذیر نباشد، با افزایش ضریب اصطکاک می‌توان این پدیده‌ها را تا حدودی کاهش داد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پدیده‌های ناخواسته بازگشت فنری و انحنای دیواره جانبی و عوامل مؤثر بر آنها با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایش‌های عملی، نشان می‌دهد که مقادیر بازگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی، در هر دو حالت همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که نرم‌افزار آباکوس، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی

- [12] Pourboghraat, F. and Chu, E., "Prediction of springback and side-wall curl in 2-D draw bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50: pp. 361-374, 1995.
- [13] Ragai, I., Lazim, D. and Nemes, J.A., "Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166: pp. 116-127, 2005.
- [14] Samuel, M., "Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 3: pp. 382- 393, 2000.
- [15] Siriam, S. and Wagoner, R.H., "Adding bending stiffness to 3-D membrane FEM programs", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 42, No. 9: pp. 1753- 1782, 2000.
- [16] Yu, T.X. and Johnson, W., "Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 6: pp. 5- 21, 1982.
- [17] Yuen, W.Y.D., "A generalised solution for the prediction of springback in laminated strip", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 61, No. 3: pp. 254- 264, 1996.
- [18] Zhang, Z.T. and Hu, S.J., "Stress and residual stress distributions in plane strain bending", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, No. 6: pp. 533- 543, 1998.
- [19] Zhou, D., "Bending and springback analysis using membrane elements", *Engineering Systems Design and Analysis*, Vol. 3: pp. 135- 142, 1996.
- Sciences, Vol. 23, No. 11: pp. 687- 695, 1981.
- [5] Kim, H.S. and Koç, M., "Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 204: pp. 370-383, 2008.
- [6] Leu, D.K., "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 66: pp. 9- 17, 1997.
- [7] 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", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, No. 30: pp. 4653- 4668, 1999.
- [8] Liu, G., Lin, Z., Xu, W. and Bao, Y., "Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminating springback error", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120: pp. 259- 264, 2002.
- [9] Liu, G., Lin, Z. and Bao, Y., "Improving dimensional accuracy of a U-shaped part through an orthogonal design experiment", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol 39, No. 2: pp. 107- 118, 2002.
- [10] Pourboghraat, F., Karabin, M.E., Becker, R.C. and Chung, K., "A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading", *International Journal of Plasticity*, Vol 16, No. 6: pp. 677- 700, 2000.
- [11] Pourboghraat, F. and Chu, E., "Springback in plane strain stretch/draw sheet forming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 36, No. 3: pp. 327- 341, 1995.