http://mjmec.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

فروردین ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱ ص ص ۱۳-۲۳

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۶/۱۶
تاریخ پذیرش ۹۱/۷/۶
ارائه‌درسایت ۹۱/۱۰/۳۰

بررسی عوامل مؤثر بر برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی در خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی

محمد شفیعی علویجه[۱]، حسین ترابیان[۲*]، سعید ادیب نظری[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران
۳- دانشیار مهندسی هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۶۹۶۶۹۱۹۱، hssntorabian@gmail.com

چکیده- مهمترین مشکل در شکل‌دهی مطلوب ورق‌های فلزی، مواجهه با پدیدهٔ بازیابی کشسان در طول باربرداری می‌باشد که منجر به برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌شود. بنابراین پیش‌بینی برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی برای تولید محصولات دقیق ضروری است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، ضخامت و استحکام تسلیم ورق بر میزان برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی به روش تجربی (آزمایشگاهی) و روش شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. برای مدل‌سازی اجزای محدود از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزار آباکوس تطابق خوبی را نشان می‌دهد و صحت روش شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که افزایش ضخامت ورق سبب کاهش برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی، و افزایش استحکام تسلیم ورق سبب افزایش برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌شود. همچنین نشان می‌دهند که افزایش ضریب اصطکاک و نیروی ورقگیر، در ابتدا برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی را افزایش می دهند اما پس از رسیدن به مقادیر معینی، سبب کاهش آنها می‌شوند.

کلیدواژگان: شکل‌دهی، برگشت فنری، انحنای دیواره جانبی، فولاد دو فازی، آباکوس.

Investigation on parameters which affect on springback and side wall curl of U-bending of dual-phase steel plates

M. Shafiee Alavijeh[1], H. Torabian[2*], S. Adib Nazari[3]

1- PhD. Student, Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran
2- Assis. Prof. of Mech. Eng., Central Tehran Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran
3- Assoc. Prof. of Aerospace Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran
* P. O. B. 1469669191 Tehran, Iran. hssntorabian@gmail.com

Abstract- The most prominent feature of sheet material forming process is an elastic recovery phenomenon during unloading which leads to springback and side wall curl. Therefore evaluation of springback and side wall curl is mandatory for production of precise products. In this paper, the effects of some parameters such as friction coefficient, sheet thickness, yield strength of sheet and blank-holder force on the springback and side wall curl radius in U-bending of dual phase steel sheets were investigated by performing experimental tests and finite element method. ABAQUS software was used for finite element simulation. Comparison of experimental and finite element results shows good agreement. The results of this research shows that increasing of sheet thickness, reduces springback and side wall curl and increasing of yield strength increases springback and side wall curl. Springback and side wall curl initially increase with raising the friction coefficient and blank-holder force but they decrease again when they go beyond certain values.

Keywords: Forming, Springback, Side Wall Curl, Dual Phase Steel, ABAQUS.

۱- مقدمه

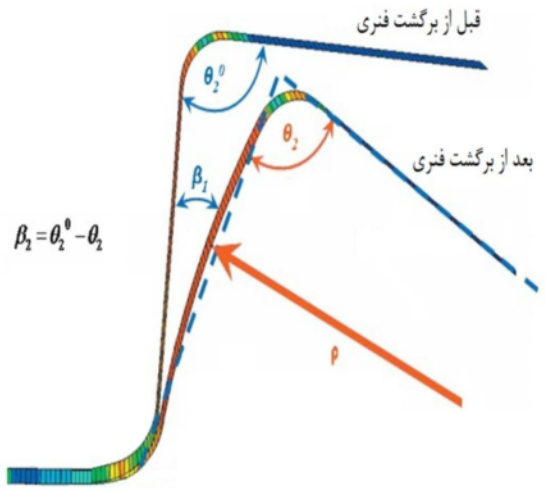
در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، یکی از عوامل بسیار مؤثر بر کیفیت و دقت قطعات تولیدی، پدیده برگشت فنری[1] می‌باشد. این پدیده بیانگر تغییر شکل ورق، پس از باربرداری و رها شدن ورق از نیروی پرس، است. پدیده برگشت فنری، دستیابی به دقت ابعادی بالا را ناممکن می سازد و باعث ایجاد مشکلات زیادی در مونتاژ قطعات تولیدی می‌شود. بنابراین در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی پیش‌بینی میزان برگشت فنری برای تولید قطعات با دقت بالا، ضروری است.

محققان بسیاری پدیده برگشت فنری را مطالعه کرده‌اند. به طور کلی این محققان برای بررسی پدیده برگشت فنری از روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی یا آزمایشگاهی و روش‌های عددی استفاده کرده‌اند. در روش‌های تحلیلی به دلیل پیچیدگی‌های زیاد، به ناچار از فرضیات ساده‌کنندهٔ بسیاری از قبیل وجود رابطهٔ ساده بین تنش و کرنش، عدم وجود اصطکاک، نادیده گرفتن کم شدن ضخامت ماده، چشم پوشی از اثر بوشینگر و بزرگ بودن شعاع خمش در مقایسه با ضخامت استفاده می‌شود [۱-۳]. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی در بررسی و ارزیابی پدیده برگشت فنری بسیار پرهزینه، دشوار و زمانبر می‌باشد [۴]. در نتیجه استفاده از روش‌های عددی برای بررسی پدیده برگشت فنری نسبت به روش‌های تحلیلی و تجربی مناسبتر می‌باشند. با بررسی تحقیقات انجام گرفته پیرامون برگشت فنری به خوبی می‌توان دریافت که در میان روش‌های عددی، روش‌های اجزای محدود (FEM[2]) نقش عمده‌ای در مطالعه مسائل مربوط به برگشت فنری داشته‌اند. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینه شبیه‌سازی اجزای محدود انواع فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی انجام شده است. از آن جمله، می‌توان به تحقیقات زو و همکارانش [۵] برای کاهش زمان محاسبات و ابداع روشی به نام EBG[3] اشاره نمود. در این روش از المان غشایی[4] جهت محاسبه مقدار برگشت فنری استفاده شده است. پس از آن سیریام و همکارانش [۶] روش فوق را در بررسی مسائل شکل‌دهی در حالت سه بعدی توسعه دادند. با این حال، کاربرد این 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، پوربقراط و همکارانش [۷] از روش هیبریدی با المان‌های غشایی و پوسته‌ای[5] برای محاسبه برگشت فنری در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت بار متقارن محوری استفاده کردند.

یکی از قطعاتی که در صنایع شکل‌دهی و از جمله اتومبیل‌سازی زیاد استفاده می‌شود، قطعات U شکل می‌باشند. در فرایند خمکاری U شکل ورق‌های فلزی، پدیده بازیابی کشسان را که پس از برداشتن بار از روی ورق رخ می‌دهد، با استفاده از سه پارامتر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره (β_1)، برگشت فنری زاویه فلنج (β_2) و شعاع انحنای دیواره جانبی (ρ) می‌توان بیان کرد. این سه پارامتر در شکل ۱ نشان داده شده اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در قطعات U شکل علاوه بر پدیده برگشت فنری، پدیده انحنای دیواره جانبی[6] نیز رخ می‌دهد. انحنای دیواره جانبی پدیده‌ای است که نتیجه تغییر شکل پیچیده کشش، خمش و رهاسازی آنها است 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 پوربقراط و همکارانش [۸،۹] با استفاده از روش هیبریدی سعی کردند این فرایند را شبیه‌سازی 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 فعالیت‌های نزدیک به موضوع تحقیق جاری، ساموئل اثر شعاع سنبه، شعاع ماتریس و مقدار ناهمسانگردی را بر میزان برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی بررسی کرده 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 کرده‌اند [۱۲،۱۳]. راگایی و همکارانش اثر مقدار ناهمسانگردی را بر میزان برگشت فنری ورقه های فولاد ضد زنگ ۴۱۰، به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی به روش اجزای محدود بررسی کرده‌اند[۱۴].

1. Springback
2. Finite element method
3. Element Bending Group
4. Membrane Element
5. Shell element
6. Side wall curl



شکل ۱ کمیت‌های معرف برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی شامل β_1، β_2 و ρ

در صنایع مختلف بویژه در صنایع اتومبیل‌سازی تولید قطعات با کمترین وزن ممکن، بسیار مهم می‌باشد. 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 سبک وزن و یا نوارهای کامپوزیتی استفاده کرد. از جمله تحقیقات انجام گرفته پیرامون برگشت فنری در نوارهای کامپوزیتی می‌توان به تحقیق محمدی و همکارانش [۱۵] اشاره کرد. آنها در فرایند خمکاری نوارهای چند لایه، اثر ضخامت لایه های مختلف را بر مقادیر برگشت فنری بررسی کرده‌اند. در رابطه با تحقیقات انجام گرفته پیرامون برگشت فنری در مواد با استحکام بالا می‌توان به تحقیق یانگ و همکارانش [۱۶] اشاره کرد، آنها با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود به بررسی برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی داغ فولادهای با استحکام بالا پرداخته‌اند.

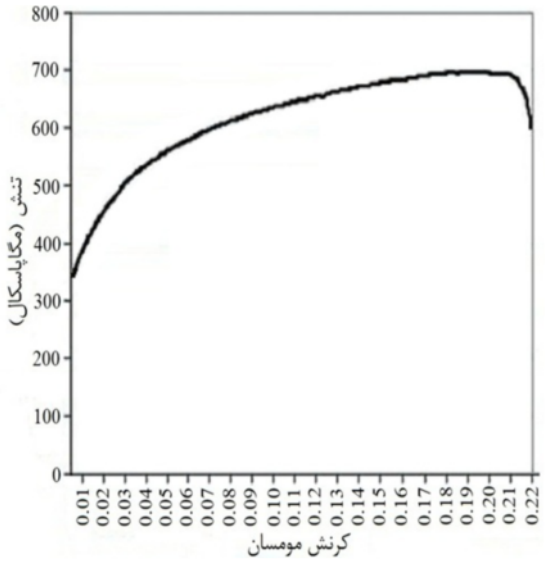
امروزه در صنایع اتومبیل‌سازی به جای استفاده از آلیاژهای با استحکام بالا و سبک وزن آلمینیوم و منیزیم، از فولادهای دو فازی که دارای نسبت استحکام به چگالی بالا می‌باشند و همچنین نسبت به آلیاژهای آلمینیوم و منیزیم ارزانترند استفاده می‌شود. استفاده از این نوع فولادها، مشکلاتی را نیز به همراه دارد که یکی از مهمترین این مشکلات، بزرگ بودن مقدار برگشت فنری و انحنای زیاد دیواره جانبی در شکل‌دهی این نوع فولادها می‌باشد. در این مقاله در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی، پدیده‌های برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی و اثر پارامترهای نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم و ضخامت ورق بر این پدیده‌ها بررسی شده و در نهایت بر خلاف سایر تحقیقات انجام گرفته در این رابطه، معادلات ساده‌ای برای پیش‌بینی مقادیر این پدیده‌ها با استفاده از مقادیر نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم ورق و ضخامت ورق بدست آمده‌اند.

۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق از پرس INSTRON 8501 که پرسی هیدرولیکی با ظرفیت ۱۵۰ تن می‌باشد، استفاده شده است. سنبه، ماتریس و ورقگیر همگی از فولاد ابزاری با سختی HRc ۵۵ ساخته شده و ورق‌ها از جنس فولاد دو فازی انتخاب شده‌اند. طول هر یک از این ورق‌ها ۳۰۰ mm و عرض آنها ۳۵ mm می‌باشد. ضخامت ورق‌های استفاده شده در این تحقیق به ترتیب ۱، ۱٫۲ و ۱٫۵ میلی‌متر است. منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان حقیقی ورق‌های استفاده شده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده و خصوصیات مکانیکی این ورق‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق

خاصیت	مقدار
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۵٫۳۵
r_0	۰٫۷۹
r_{45}	۱٫۰۳
r_{90}	۱٫۰۱
نسبت پواسون	۰٫۳
چگالی (kg/m^3)	۷۸۰۰
استحکام تسلیم (MPa)	۳۶۵



شکل ۲ منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان حقیقی ورق

در این جدول r_0، r_{45} و r_{90} به ترتیب نشان دهنده مقادیر پارامتر r در جهت های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق می باشند.

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 می‌شوند. 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 ۱ mm/s به سمت پایین حرکت می‌دهد. برای کنترل دقیق جابجایی سنبه و مقدار نفوذ آن به داخل ماتریس که در این تحقیق برابر با ۷۰ mm می‌باشد، 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 پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره (β_1)، برگشت فنری زاویه فلنج (β_2) و شعاع انحنای دیواره جانبی (ρ) انجام می‌شود. میانگین این هشت اندازه‌گیری برای هر کدام از پارامترهای β_1، β_2 و ρ به عنوان 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.

٤- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این قسمت، فرایند خمکاری U شکل ورق با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس[1] شبیه‌سازی شده است. در شکل ۳ شماتیک مسئله خمکاری U شکل ورق نشان داده شده است. به علت تقارن مسئله نسبت به صفحه میانی، تنها از نصف مدل سمت راست استفاده می‌شود. این کار سبب افزایش سرعت و کاهش زمان آنالیز می‌شود.

برای انجام این شبیه‌سازی، پنج مرحله[2] تعریف شده است. این کار سبب افزایش صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌شود [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۴ 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 هفتاد میلی‌متری ماتریس برسد.

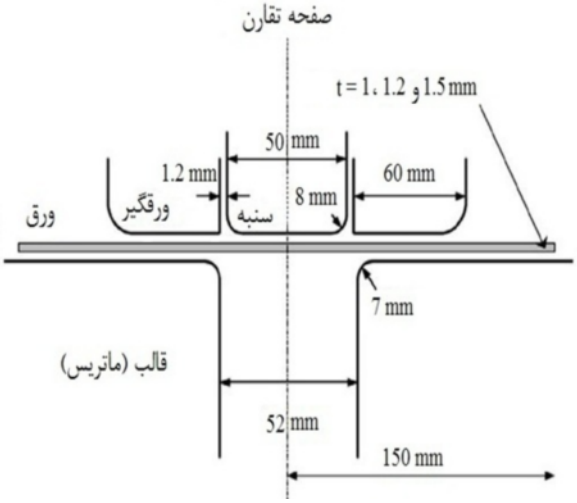
۳- در سومین مرحله، سنبه به سمت بالا باز می‌گردد.

۴- در چهارمین مرحله، ورقگیر از روی ورق برداشته می‌شود.

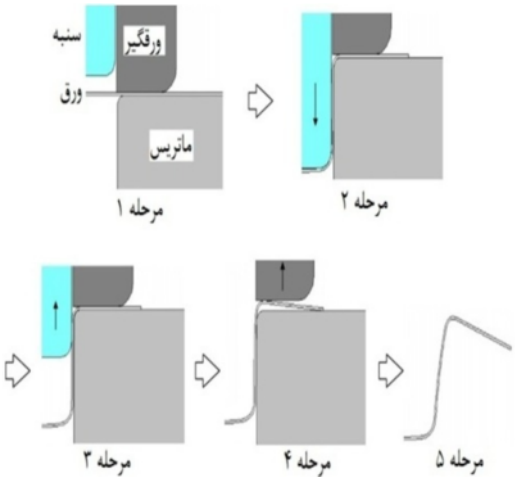
۵- در پنجمین مرحله که مرحله نهایی می‌باشد، قطعه شکل داده شده بطور کامل از قالب خارج شده و تمامی تماس‌های تعریف شده حذف می شوند.

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 می‌شود، در این مقاله برای مدل‌سازی ورق از دو نوع المان توپر[3] و پوسته‌ای استفاده شده و برای هر کدام از شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی و برگشت فنری از دو روش حل صریح[4] و حل ضمنی[5] استفاده شده است.

1. ABAQUS
2. Step
3. Solid element
4. Explicit
5. Implicit



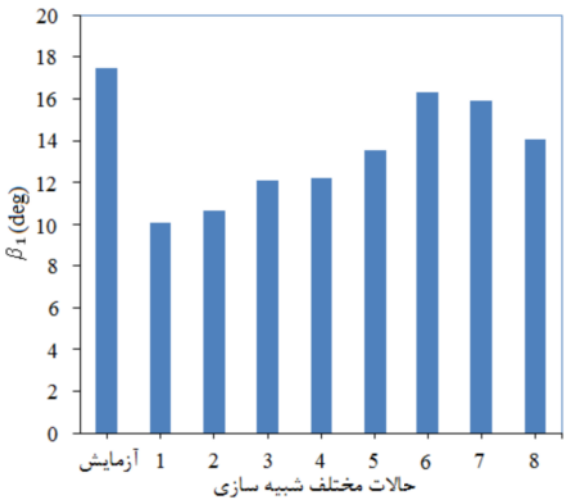
شکل ۳ نمایش شماتیک هندسه قالب



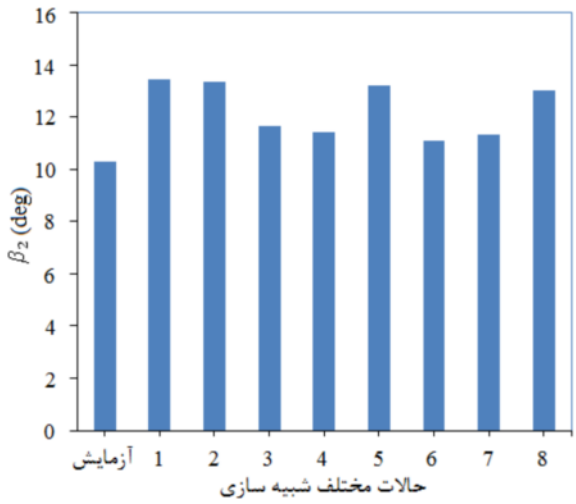
شکل ۴ مراحل مختلف شبیه‌سازی فرایند

در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی که از آزمایش‌ها بدست آمده‌اند، با مقادیر بدست آمده از حالت های مختلف شبیه‌سازی اجزای محدود (جدول ۲) مقایسه شده اند. از این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از روش حل ضمنی برای شبیه‌سازی برگشت فنری، سبب افزایش قابل ملاحظه صحت پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی می‌شود.

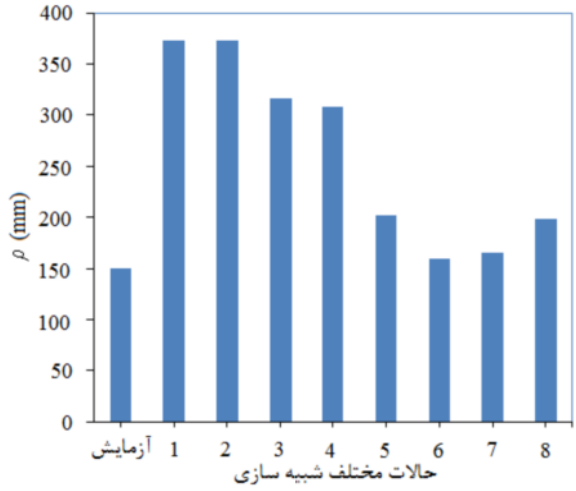
هر چند استفاده از روش حل صریح برای شبیه‌سازی شکل‌دهی تأثیر قابل ملاحظه ای بر صحت این پیش‌بینی‌ها نمی‌گذارد ولی زمان انجام محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد.



شکل ۵ مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره برای حالات مختلف شبیه‌سازی



شکل ۶ مقادیر برگشت فنری زاویه فلنج برای حالات مختلف شبیه‌سازی



شکل ۷ مقادیر شعاع انحنای دیواره جانبی برای حالات مختلف شبیه‌سازی

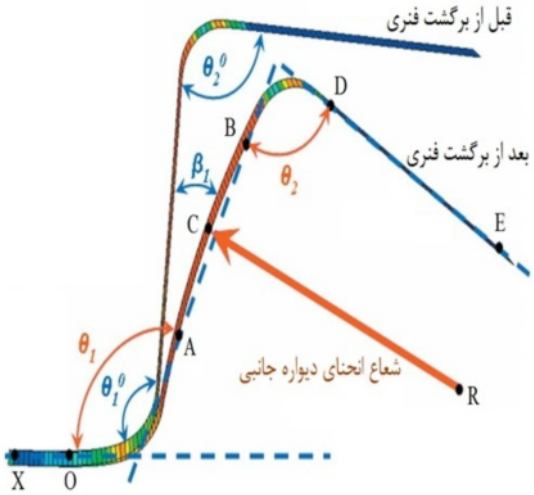
استفاده از المان نوع پوسته‌ای به جای المان نوع توپر علاوه بر کاهش زمان انجام محاسبات، سبب افزایش صحت پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی نیز می‌شود. بنابراین بهترین حالت برای انجام این شبیه‌سازی که بیشترین دقت و بالاترین سرعت را دارد، حالت ۶ می‌باشد 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 برگشت فنری استفاده شده است.

نقاط لازم برای اندازه‌گیری پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی در شکل ۸ نشان داده شده اند. برای اندازه‌گیری مقادیر این پارامترها، ابتدا مختصات نقاط A و B را قبل از وقوع پدیده برگشت فنری اندازه‌گیری کرده و آن ها را با A_0 و B_0 نشان می دهیم، سپس مختصات نقاط A، B، C، D و E را پس از وقوع پدیده برگشت فنری اندازه‌گیری می‌کنیم. در نهایت با استفاده از این مختصات و معادلات (۱) تا (۸)، مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی بدست می‌آید.

$$\beta_1 = \theta_1 - \theta_1^0 \qquad (۱)$$

$$\beta_2 = \theta_2^0 - \theta_2 \qquad (۲)$$

$$\theta_1^0 = \theta_2^0 = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{ox}\cdot\overrightarrow{A_0B_0}}{|ox||A_0B_0|}\right) \qquad (۳)$$



شکل ۸ نقاط لازم برای اندازه گیری مقادیر پارامترهای β_1، β_2 و ρ

جدول ۲ روش‌های مختلف برای شبیه‌سازی فرایند

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

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{ox}.\overrightarrow{AB}}{|ox||AB|}\right) \quad (۴)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{AB}.\overrightarrow{ED}}{|AB||ED|}\right) \quad (۵)$$

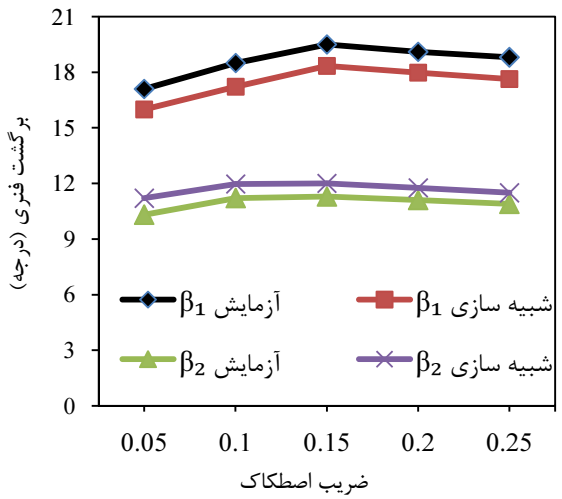
$$x_R = \frac{1}{2}\frac{x_B^2 + y_B^2 - x_A^2 - y_A^2}{x_B - x_A + (x_C - x_B)\frac{y_A - y_B}{y_C - y_B}} - \frac{1}{2}\frac{\frac{y_A - y_B}{y_C - y_B}\left(x_C^2 + y_C^2 - x_B^2 - y_B^2\right)}{x_B - x_A + (x_C - x_B)\frac{y_A - y_B}{y_C - y_B}} \quad (۶)$$

$$y_R = \frac{x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 + 2x_R(x_B - x_A)}{2(y_A - y_B)} \quad (۷)$$

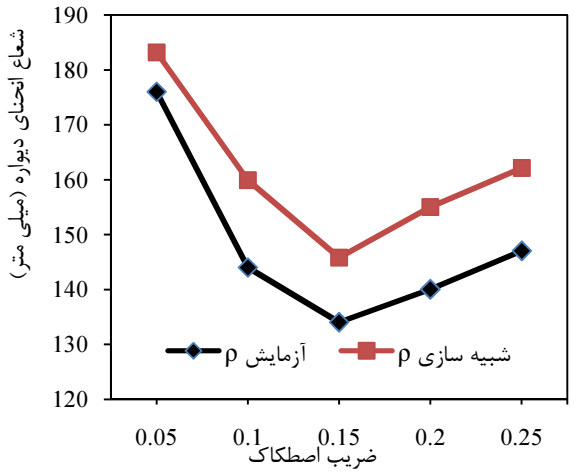
$$\rho = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (y_A - y_R)^2} \quad (۸)$$

۵- نتایج و بحث

اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین ورق و تجهیزات شکل‌دهی در تماس با آن روی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، ماکزیمم خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی های اجزای محدود به ترتیب برابر ۶٫۹، ۶٫۹ و ۱۱ درصد و میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به ترتیب برابر ۶٫۳، ۶٫۶ و ۹ درصد می‌باشد. همچنین از این شکل‌ها نتیجه می‌شود در مقادیر کوچک ضریب اصطکاک، با افزایش ضریب اصطکاک، به تدریج مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد ولی با عبور ضریب اصطکاک از مقدار معینی (۰٫۱۵)، مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج شروع به کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی شروع به افزایش می‌کند.



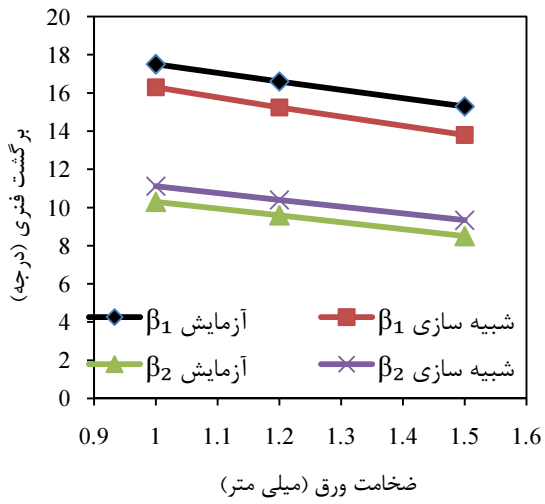
شکل ۹ اثر ضریب اصطکاک بر مقادیر برگشت فنری



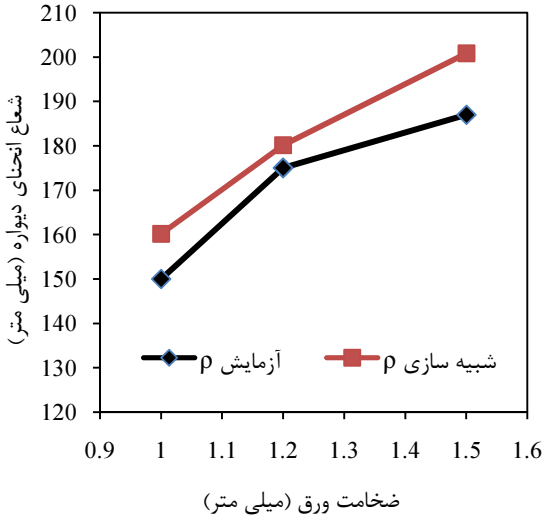
شکل ۱۰ اثر ضریب اصطکاک بر مقادیر شعاع انحنای دیواره جانبی

علت پدیده فوق 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 می‌شوند که علت این امر خمش ورق و تنش‌های فشاری ایجاد شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، تنش های غشایی-کششی حاصل از اصطکاک توسعه می‌یابند و با گسترش منطقه مومسان، کاهش میزان برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج و افزایش شعاع انحنای دیواره جانبی اتفاق خواهد افتاد. 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.

اثر تغییرات ضخامت ورق روی مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، ماکزیمم خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به ترتیب برابر ۹/۷، ۹/۸ و ۷/۴ درصد و میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی های اجزای محدود به ترتیب برابر ۸/۳، ۸/۷ و ۵/۷ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱ اثر ضخامت ورق بر مقادیر برگشت فنری

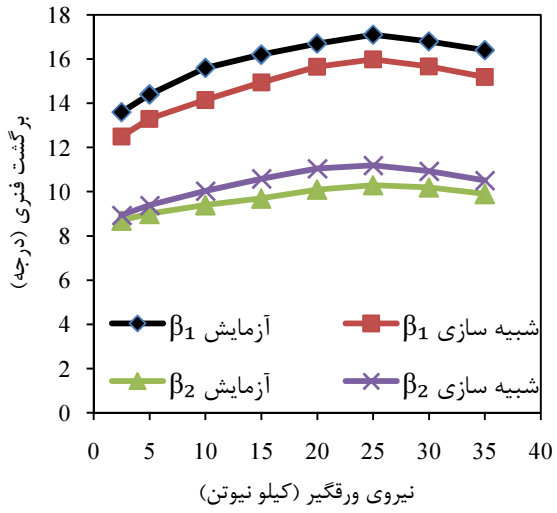


شکل ۱۲ اثر ضخامت ورق بر مقادیر شعاع انحنای دیواره جانبی

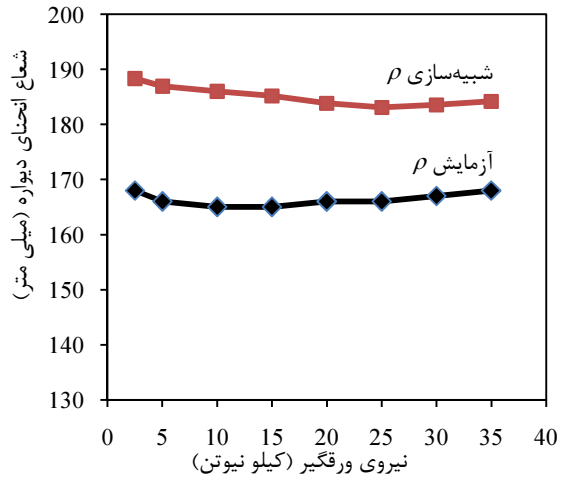
همچنین با توجه به این شکل‌ها، نتیجه می‌شود که با افزایش ضخامت ورق مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج کاهش و شعاع انحنای دیواره جانبی افزایش می‌یابد. علت پدیدهٔ فوق گسترش ناحیه مومسان ورق در نتیجه افزایش ضخامت ورق می‌باشد.

اثر تغییرات نیروی ورقگیر روی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، ماکزیمم خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی های اجزای محدود به ترتیب برابر ۹/۲، ۹/۴ و ۱۲/۸ درصد و میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی های اجزای محدود به ترتیب برابر ۷/۴، ۶/۸ و ۱۱/۳ درصد است. همچنین از این شکل‌ها نتیجه می‌شود که 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 معینی (۲۵ kN)، مقادیر 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 با افزایش نیروی ورقگیر، نیروهای غشایی-کششی ایجاد شده در ورق، سبب محدودتر شدن منطقه مومسان حاصل بر روی ورق می‌شوند که علت این امر خمش ورق و تنش های فشاری ایجاد شده است. با افزایش نیروی ورقگیر، تنش‌های غشایی-کششی حاصل از نیروی ورق‌گیر توسعه می‌یابد و با گسترش منطقه مومسان، کاهش مقدار برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج و افزایش شعاع انحنای دیواره جانبی اتفاق خواهد افتاد.

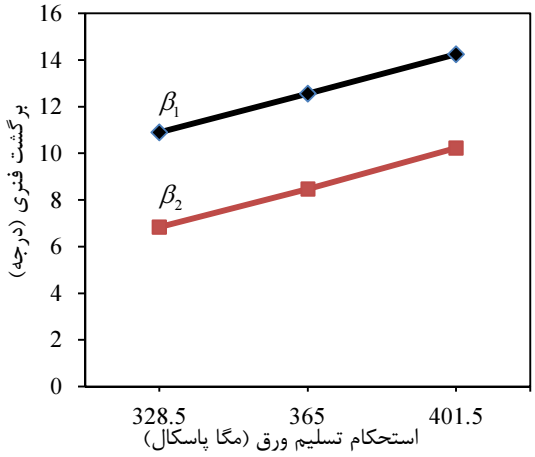


شکل ۱۳ اثر نیروی ورقگیر بر مقادیر برگشت فنری

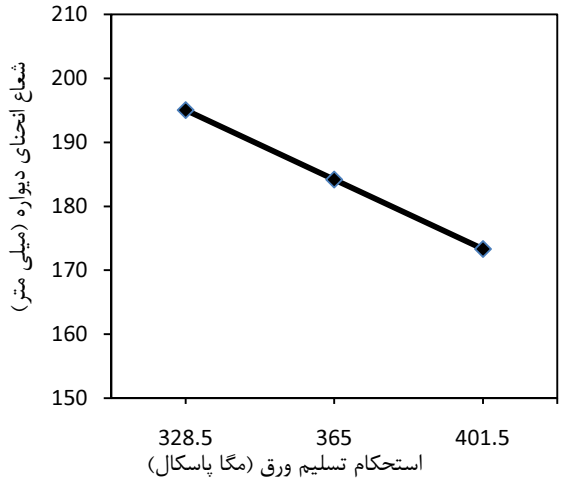


شکل ۱۴ اثر نیروی ورقگیر بر مقادیر شعاع انحنای دیواره جانبی

اثر تغییرات استحکام تسلیم ورق روی مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی که از شبیه‌سازی اجزای محدود بدست آمده‌اند، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، نتیجه می‌شود که با افزایش استحکام تسلیم ورق مقادیر برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش می‌یابد. علت پدیده فوق این است که افزایش استحکام تسلیم ورق سبب افزایش منطقه کشسان ورق می‌شود و در نتیجه بعد از برداشتن بار از روی ورق، بازیابی کشسان افزایش یافته و موجب می گردد که برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره و برگشت فنری زاویه فلنج افزایش و شعاع انحنای دیواره جانبی کاهش یابند.



شکل ۱۵ اثر استحکام تسلیم ورق بر مقادیر برگشت فنری



شکل ۱۶ اثر استحکام تسلیم ورق بر شعاع انحنای دیواره جانبی

از مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود که در شکل‌های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده اند، مشاهده می‌شود که برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، ماکزیمم خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به ترتیب برابر ۹/۷، ۹/۸ و ۱۲/۸ درصد و میانگین خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازیهای اجزای محدود به ترتیب برابر ۷/۲، ۷/۱ و ۹/۵ درصد است. بنابراین با توجه به همخوانی مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی می‌باشد. استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی به جای روش آزمایشگاهی سبب کاهش هزینه و کاهش زمان رسیدن به جواب نیز می‌شود.

پس از حصول اطمینان از صحت نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس، برای بدست آوردن روابطی برای پیش‌بینی مقادیر پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی، با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب[1] که یک نرم‌افزار آماری است به تحلیل رگرسیونی مقادیر این پارامترها 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 پیش‌بینی کننده و متغیرهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از نرم‌افزار مینی تب، معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب برای پارامترهای برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره، برگشت فنری زاویه فلنج و شعاع انحنای دیواره جانبی بدست آمده‌اند.

$$\beta_1 = 0.2631X_1 - 0.0044X_1^2 + 0.0544X_2 - 5.6222X_3 + 40X_4 - 100X_4^2 + 0.1687X_1X_4 - 4.1241 \quad (۹)$$

$$\beta_2 = 0.2023X_1 - 0.0034X_1^2 + 0.0477X_2 - 4.152X_3 + 21.3947X_4 - 56.1913X_4^2 + 0.1027X_1X_4 - 6.1436 \quad (۱۰)$$

$$\rho = 271.8246 - 0.5953X_1 + 0.0119X_1^2 - 0.3712X_2 + 88.9552X_3 - 744X_4 + 1935X_4^2 - 0.0443X_2X_4 \quad (۱۱)$$

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 شکل‌دهی، β_1 برگشت فنری زاویه باز شدن دیواره بر حسب درجه و β_2 برگشت فنری زاویه فلنج برحسب درجه و ρ شعاع انحنای دیواره جانبی بر حسب میلی‌متر است.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پدیده‌های ناخواسته برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی در فرایند خمکاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دو فازی و تأثیر پارامترهای نیروی ورقگیر، ضریب اصطکاک، استحکام تسلیم و ضخامت ورق بر این پدیده‌ها، با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه و بررسی شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی، نشان می‌دهد که مقادیر برگشت 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 مقادیر برگشت فنری و شعاع انحنای دیواره جانبی می‌باشد.

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

۱- افزایش استحکام تسلیم ورق، سبب افزایش برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌شود.

۲- افزایش ضخامت ورق، سبب کاهش برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی می‌شود.

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

1. MINITAB

۷- مراجع

[1] Gardiner F.J., "The Springback of Metals", *Trans. ASME*, Vol. 79, 1957, pp. 1-9.

[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*, Vol. 6, 1982, pp. 5-21.

[3] Johnson W., and Yu T.X., "On Springback After the Pure Bending of Beams and Plates of Elastic Work Hardening Material", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 23, 1981, pp. 687-696.

[4] Chongthairung B., Uthaisangsuk V., Suranuntchai S., and Jirathearant S., "Experimental and Numerical Investigation of Springback Effect for Advanced High Strength Dual Phase Steel", *Materials and Design*, Vol. 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*, Vol. 75, 1996, pp. 135-142.

[6] Siriam S., and Wagoner R.H., "Adding Bending Stiffness to 3-D Membrane FEM Programs", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, 2000, pp. 1753-1782.

[7] Pourboghrat F., Karabin M., Becker R., and Chung K., "A Hybrid Membrane/Shell Method for Calculating Springback of Anisotropic Sheet Metals Undergoing Axisymmetric Loading", *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, 2000, pp. 677-700.

[8] Pourboghrat F., and Chu E., "Springback in Plane Strain Stretch/Draw Sheet Forming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 36, 1995, pp. 327-341.

[9] Pourboghrat F., and Chu E., "Prediction of Springback and Side Wall Curl In 2-D Draw Bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, 1995, pp. 361-374.

[10] 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 Solid Structure*, Vol. 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*, Vol. 105, 2000, pp. 382-393.

[12] Liu G., Lin Z., Xu W., and Bao Y., "Variable Blank Holder Force in U-Shaped Part Forming for Eliminating Springback Error", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 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 Elements in Analysis and Design,* Vol. 39, 2002, pp.107-118.

[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*, Vol. 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*, Vol. 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*, Vol. 484, 2012, pp. 2430-2437.

[17] 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*, Vol. 204, 2008, pp. 370-383.