ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2024.434340.1905

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی و بازگشت فنری قطعه اسپیسر به کمک روش المان محدود

امیر مهدی شعوری[۱]، سید محمد حسین موسوی[۲]، پوریا اولیازاده[۳]، محمد حسین فرشیدیان‌فر[۴*]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- فارغ‌التحصیل دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: farshidianfar@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۵ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شکل‌دهی ورق

شبیه‌سازی

بازگشت فنری

چکیده

در این پژوهش پدیده بازگشت فنری در قطعه اسپیسر حین فرآیند تولید و پس از رهایی قطعه از نیروی شکل‌دهی، به کمک نرم افزار ال‌اس-داینا و تکنیک المان محدود شبیه‌سازی گردید و نتایج توسط آزمایش تجربی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی از حلگر ضمنی نرم‌افزار برای شبیه‌سازی بخش اصلی فرایند شکل‌دهی و شبیه سازی بازگشت فنری استفاده شد. در تعریف مدل ماده برای شبیه‌سازی از رفتار ناهمسانگرد آن صرف نظر شده و رفتار ماده در ناحیه پلاستیک توسط رابطه توانی هولمن توصیف شده است. به منظور در دست داشتن پارامترهای بیشتر برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی چهار حالت مختلف شکل‌دهی ورق در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت که در هر یک از این حالت‌ها پارامتر سرعت سنبه، میزان اصطکاک بین ابزار و ورق و ضخامت ورق مورد استفاده متفاوت می‌باشد. با مقایسه نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مقدار خطای کمتر از ۱۰٪ در محاسبه زاویه معیار برای بازگشت فنری مشاهده شده است.

Simulation of the forming process and the spring back of the spacer part using the finite element method

Amir Mahdi Shouri[1], Seyed Mohammad Hossein Mousavi[2], Pouria Oliazadeh[3], Mohammad Hossein Farshidianfar[4*]

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

2- BSc Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

4- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

* Corresponding Author's Email: farshidianfar@um.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 January 2024

Accepted: 18 February 2024

Keywords:

Sheet Metal Forming

Simulation

Spring Back

Abstract

In this research, the spring back phenomenon in the spacer part during the production process and after releasing the part from the forming force was simulated with the help of LS-Dyna software and the finite element method, and the results were verified by experimental testing. In this simulation, the software's Implicit solver was used to simulate the main part of the forming process and to simulate spring back. In the definition of the material model for simulation, its anisotropic behavior is ignored and the behavior of the material in the plastic region is described by Holman's power relation. In order to have more parameters for validating the simulation results, four different sheet forming modes were investigated in the experimental test and simulation, and in each of these modes, the speed parameter of the punch, the amount of friction between the tool and the sheet, and the thickness of the used sheet are different. By comparing the results of experimental testing and simulation, an error value of less than 10% has been observed in the calculation of the standard angle for spring back.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Shouri A M, Mousavi S M H, Oliazadeh P, Farshidianfar M H. Simulation of the forming process and the spring back of the spacer part using the finite element method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 November 22;10(9):32-41. doi: 10.22034/IJME.2024.434340.1905 [In Persian]

۱- مقدمه

پدیده بازگشت فنری یک تغییر شکل هندسی است که در پایان فرآیند شکل‌دهی در زمانی که قطعه از نیروهای ابزار شکل‌دهی رها شده است، در قطعه اتفاق می‌افتد. پس از اتمام فرآیند شکل‌دهی قطعات عمیق کشیده و شکل داده شده، این پدیده در آن‌ها رخ می‌دهد و در نتیجه بر دقت ابعاد و هندسه نهایی قطعه مورد نظر تأثیر می‌گذارد.

از اواخر دهه ۱۹۹۰ با توسعه کدهای المان محدود مرتبط با شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق در کنار پیشرفت سریع محیط‌های پردازشی، پژوهش‌های متعددی حول شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق آغاز شد که تعداد زیادی از این پژوهش‌ها در مورد شبیه سازی پدیده بازگشت فنری و عوامل متاثر بر آن بوده است.

به عنوان مثال گائو و کینزل [۱] در پژوهشی تحت عنوان یک مدل جدید برای پیش بینی بازگشت فنری با در نظر گرفتن اثر باوشینگر، بر اساس مبانی سخت شوندگی همسانگرد و سخت شوندگی سینماتیکی، مدل چند صفحه‌ای مروز (Mroz)، فرض کرنش صفحه‌ای و مشاهدات تجربی، یک روش افزایشی و مدل سخت شوندگی جدید ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده به خوبی با نتایج تجربی برای ورق آلومینیومی که تحت فرآیندهای خمش چندگانه قرار دارد هم‌خوانی داشته است. مدل سخت شوندگی که در این پژوهش پیشنهاد شده است، نه تنها یک مدل عمومی برای پیش‌بینی بازگشت فنری است، بلکه یک مدل سخت شوندگی برای شبیه سازی فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی نیز می‌باشد.

یون و همکاران [۲] در مقاله ای یک روش غشاء/پوسته ترکیبی سه‌بعدی توسعه یافته برای مطالعه بازگشت فنری ورق فلزات ناهمسانگرد توسعه داده‌اند که موجب کاهش زمان محاسباتی تجزیه و تحلیل المان محدود برای شکل‌دهی ورق می‌گردد. در این روش ترکیبی، کرنش‌ها و تنش‌های خمشی به‌عنوان پس پردازش با در نظر گرفتن تغییر تدریجی هندسه ورق بدست آمده از آنالیز اجزای محدود غشا محاسبه شدند. برای محاسبه بازگشت فنری، از مدل المان محدود پوسته برای باربرداری از ورق استفاده شده است. به منظور راستی‌آزمایی، روش ترکیبی برای ورق آلومینیومی گرید 2036-T4 که به شکل یک فنجان استوانه‌ای شکل‌دهی می‌شود، استفاده شد، نتایج به دست آمده نشان داد بازگشت فنری پیش‌بینی شده تطابق خوبی با تست‌های تجربی دارد.

پاپلئوکس و پانتوت [۳] در پژوهش خود بیان می‌کنند با توجه به شبیه‌سازی موفق فرآیند شکل‌دهی ورق محصولات با هندسه‌های پیچیده در صنعت، معمولا نتایج مربوط به بازگشت فنری دقت و صحت مناسبی ندارند. در این مقاله به چند پارامتر فیزیکی و عددی همچون میزان نیروی نگهدارنده ورق، اصطکاک، نحوه توصیف ماده، تعداد نقاط گره برای تحلیل و ذخیره داده و غیره اشاره شده است که باعث تأثیرگذاری روی فرایند شکل‌دهی ورق و دقت بازگشت فنری به صورت واقعی و به‌صورت سازی عددی می‌شود.

چان و همکاران [۴] در مقاله خود به تحلیل خم‌کاری با ماتریس V شکل پرداخته‌اند که یک سمت آن گرفته شده و سمت دیگر آن آزاد است. پارامترهای مختلفی که روی بازگشت فنری تاثیر دارند در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است مانند شعاع سنبه، زاویه سنبه، شعاع انتهایی ماتریس و غیره. نتایج تحلیل انجام شده نشان می‌دهد که زاویه بازگشت فنری با افزایش شعاع و زاویه سنبه، کاهش می‌یابد.

گرتسن و ماتیاسن [۵] بیان می‌کنند که تعریف مدل دقیق ناحیه پلاستیک ماده از چند بخش همچون شرایط تسلیم، منحنی سخت شوندگی پلاستیک، رابطه کرنش سختی و مدل کاهش سفتی الاستیک در اثر کرنش پلاستیک بستگی دارد. هدف اصلی این مقاله مطالعه تاثیر دو بخش ساختاری در شبیه‌سازی بازگشت فنری است: تئوری‌های تسلیم و رفتار ماده هنگام باربرداری. در این مقاله سه تئوری تسلیم مختلف مورد بررسی قرار گرفت: تئوری هیل ۴۸، تئوری بارلات لاین و تئوری ۸ پارامتری بانابیک/آرتز/بارلات.

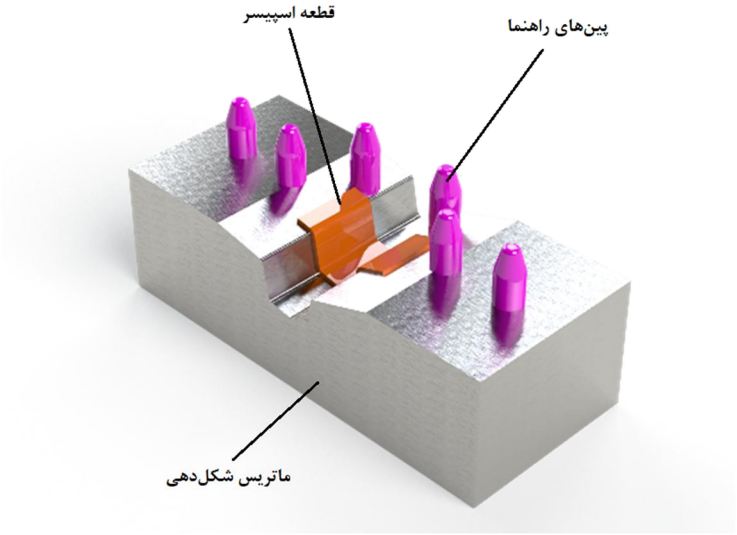
جعفری و همکاران [۶] در مقاله‌ای تحت عنوان کنترل عددی و بهینه‌سازی بازگشت فنری خم کاری L آلیاژ منگنز توسط تحلیل اجزا محدود و هوش مصنوعی، توجه خود را به پیدا کردن ترکیب بهینه‌ای از پارامترهای تأثیر گذار در فرایند خم کاری L متمرکز کردند. پارامترهایی از قبیل: دمای ماتریس، گام های حرکت سنبه، لقی بین ابزار و ورق و کمترین شعاع سنبه. در این پژوهش در ابتدا تحلیل اجزا محدود با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام شد سپس با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)، یک رابطه هوشمند بین ورودی‌ها و بازگشت فنری به عنوان خروجی ایجاد شد. نتیجه کار این بود که رویکرد پیشنهادی می‌توانست خروجی‌های فرآیند شکل‌دهی را به خوبی پیش‌بینی کند.

کشفی و همکاران [۷] رفتار پیچشی و همچنین پدیده بازگشت فنری در مقطع جدار نازک مستطیلی را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی بر پایه روش اجزا محدود و همچنین با در نظر گرفتن رفتار ماده به‌صورت کرنش سخت و بدون در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده کننده دیگر، انجام پذیرفته است. نتایج عددی به‌دست آمده با آزمایش‌های تجربی بر روی یک نمونه، اعتبار سنجی شد و نمودارهای مربوط به پیچش در زوایای مختلف به‌وسیله مدل اعتبار سنجی شده، ارائه شده است. در نهایت رابطه‌ای تجربی-عددی بر پایه مدل اجزاء محدود جهت محاسبه زاویه بازگشت فنری در مقطع مذکور ارائه گردیده است.

محمودی و همکاران [۸] در مقاله‌ای به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر بازگشت فنری در ورق دو لایه مس- فولاد آستنیتی حاصل از شکل‌دهی افزایشی، پرداختند. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرایند به کمک نرم‌افزار آباکوس و روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی به کمک نرم‌افزار مینی‌تب، تأثیر پارامترهای ورودی بر روی بازگشت فنری و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی توسط آزمون تجربی اعتبار سنجی شده و مشخص شد که نتایج شبیه‌سازی المان محدود دارای همپوشانی مناسبی در مقایسه با جواب‌های نهایی بدست‌آمده از آزمون عملی است.

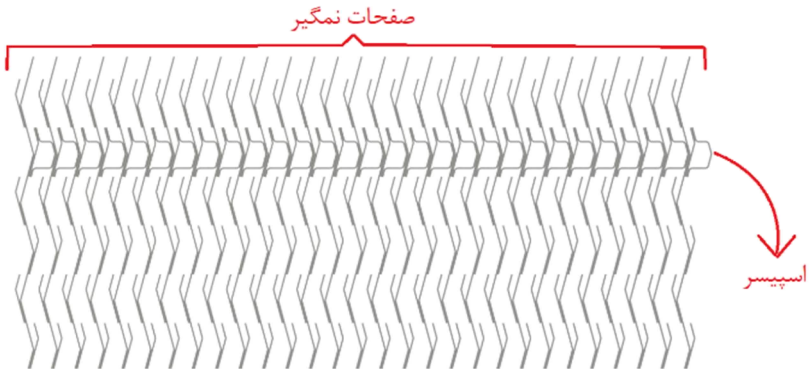
از مدت ها قبل، فرایند شکل‌دهی ورق فناوری تجربه‌گرا بوده و به صورت سعی و خطا انجام می‌گرفته است. اما در طول دو دهه گذشته، تحلیل اجزای محدود به کمک کامپیوتر امکان بهینه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی ورق و قالب‌ها را فراهم کرده است. هدف استفاده از کامپیوتر برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق فلزی، پیش‌بینی پارگی در اثر گلویی شدن، چین و چروک ایجاد شده در ورق، میزان استحکام ورق در برابر کشش و به ویژه هندسه نامطلوب قطعه ناشی از برگشت فنری می‌باشد که به کمک این روش می‌توان با پیش‌بینی عیوب قطعه در حین طراحی فرآیند، هزینه و زمان فرآیند ساخت قطعات را کاهش داد.

هدف ما در این پژوهش پیش‌بینی پدیده بازگشت فنری در قطعه اسپیسر می‌باشد. این قطعه که در نمگیرهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط فرآیند شکل‌دهی به کمک پرس دستی تولید می‌گردد (شکل ۱). سپس به کمک جوش نقطه‌ای به صفحات نمگیر متصل شده و صفحه دیگر روی اسپیسر می‌نشیند و به این صورت فاصله کافی بین صفحات نمگیر به وجود می‌آید (شکل ۲).



شکل ۱ قطعه اسپیسر به همراه ماتریس طراحی‌شده برای فرآیند شکل‌دهی

با توجه به عملکرد این قطعه دقت ابعادی آن پس از فرآیند شکل‌دهی و رخ دادن پدیده بازگشت فنری حائز اهمیت می‌شود. به همین منظور سعی بر این بوده است تا با جمع آوری اطلاعات کافی برای شبیه سازی شکل دهی این قطعه با انجام آزمایش های تجربی در شرایط محیطی مختلف، بازگشت فنری در این قطعه به کمک انجام شبیه سازی در نرم افزار ال‌اس-داینا پیش‌بینی شود تا به کمک اطلاعات و نتایج بدست آمده از شبیه سازی، طراحی فرآیند بهبود یابد.



شکل ۲ صفحات نمگیر پس از مونتاژ که فاصله لازم بین آن‌ها توسط قطعه اسپیسر به‌وجود آمده است

۲- روش تحقیق

یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی شکل‌دهی فلزات، نرم افزار ال‌اس-داینا می‌باشد. به کمک این نرم افزار می‌توان مقدار تنش، کرنش، تغییر شکل فلز پس از انجام فرایندهای مختلف، تشخیص رشد ترک و مقدار بازگشت فنری قطعه را بدست آمده آورد. این نرم‌افزار با در دسترس گذاشتن المان‌ها با ویژگی مختلف، مدل‌های متنوع ماده، استراتژی‌های مختلف شبیه‌سازی تماس المان‌ها و انواع خروجی‌های قابل محاسبه در محیط پس‌پردازش به ما این امکان را می‌دهد تا فرآیند شکل‌دهی خودمان را در شرایط مختلف شبیه‌سازی کرده و نتایج آن را مورد مطالعه قرار دهیم.

روش حل مسائل عددی اغلب به دو دسته ایمپلیسیت و اکسپلیسیت تقسیم می‌شوند. روش اکسپلیسیت معمولا تحت شرایطی پایدار است. در این روش یک گام زمانی بحرانی وجود دارد که در صورت فراتر رفتن از آن منجر به ناپایداری حل مسئله می‌شود. روش ایمپلیسیت برای حل مسائلی که دارای زمان طولانی هستند مناسب است مزیت مهم این روش پایداری آن است که یعنی بدون توجه به موضوع پایداری می‌توان هر گام زمانی را برای روش ایمپلیسیت انتخاب نمود. در شبیه‌سازی پدیده های مختلف می‌توان با توجه به شرایط حاکم بر آن مسئله روش حل مناسب را انتخاب نمود.

در این پژوهش فرآیند شکل‌دهی ورق فولادی زنگ نزن گرید ۳۰۴ مورد مطالعه قرار گرفت که ویژگی‌های آن در جدول ۱ آمده است. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته به این نتیجه رسیدیم که نتایج حاصل از شبیه سازی بازگشت فنری به وسیله ماده شماره ۱۸ نرم افزار ال‌اس-داینا از دقت مناسبی برخوردار است که این مدل ماده رفتار کرنش سختی ماده را به کمک رابطه توانی هولمن (رابطه ۱) توصیف می‌کند [۹]. در این رابطه K ضریب استحکام، n توان سختی، σ و ε به ترتیب تنش و کرنش موثر می‌باشد.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (۱)$$

برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق فلزی باید رفتار ماده ورق به درستی مورد مطالعه قرار بگیرد. برای شناخت رفتار مکانیکی آن نیاز است که ماده را تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار داده و واکنش ماده را تحت بارگذاری‌های متعدد مقایسه کرد. به همین سبب نیاز است روی نمونه ورق تست‌های مکانیکی همچون آزمون کشش، تست کشش دو محوره، تست سختی سنجی و غیره صورت گیرد.

جدول ۱ ویژگی‌های ورق فولاد زنگ نزن گرید ۳۰۴ [۱۰]

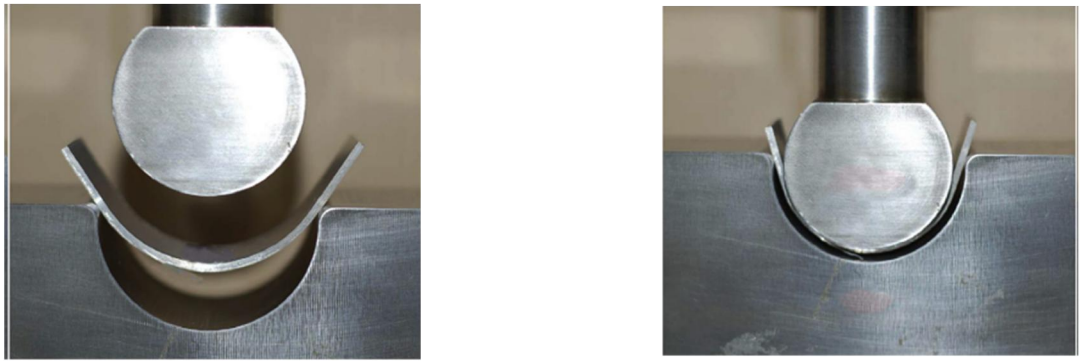
ویژگی ماده	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m3)	استحکام تسلیم (MPa)
مقدار	۱۹۵	۰/۲۷	۷۹۳۰	۲۰۵

بعد از داده‌برداری از تست‌های مکانیکی در مرحله قبل، نیاز است که پارامتر های مورد نیاز برای شبیه‌سازی را به کمک تجزیه و تحلیل داده‌های تست‌های مکانیکی به دست آورد. پارامترهایی همچون استحکام تسلیم، مدول یانگ، نمودارهای تنش-کرنش، افزایش طول مجاز، پارامتر های مرتبط با ناهمسانگردی ورق و غیره.

بقیه پارامترهای مرتبط با شبیه‌سازی نظیر سرعت سنبه حین شکل‌دهی، شرایط اصطکاک بین ورق و ابزار، دمای ابزار و محیط حین شکل‌دهی و غیره را باید از آزمایشی تجربی استخراج نمود که بدین منظور طراحی می‌شود. پارامترهای دیگری نیز مانند ضخامت ورق وجود دارند که می‌توان آن‌ها را در شبیه‌سازی‌های مختلف متفاوت فرض نمود و نتایج را مطالعه کرد.

۳- نتایج و بحث

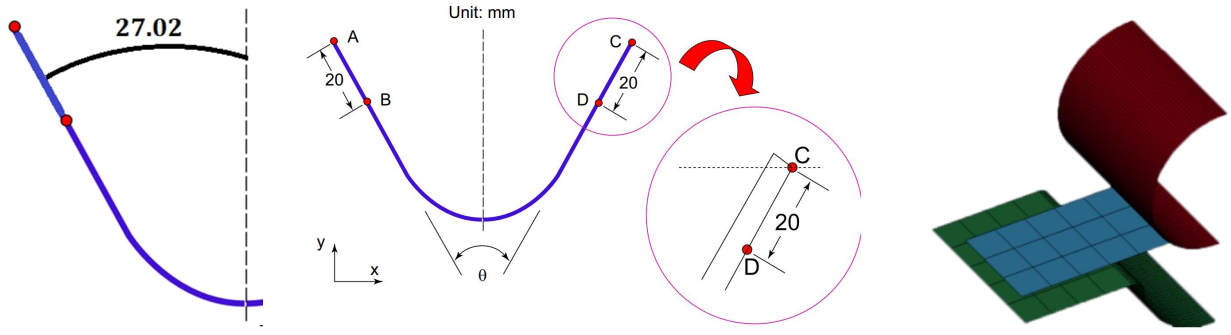
برای اطلاع از درستی روند شبیه‌سازی که در پیش گرفته‌ایم، مسئله خمش استوانه‌ای ورق آلومینومی [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این مسئله با نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار ال‌اس-داینا مقایسه شد. در این مسئله که تحت عنوان آزمایش خمش استوانه‌ای بدون ورق‌گیر آلیاژ آلومینیوم 6111-T4 شناخته می‌شود، یک سنبه با مقطع دایره‌ای شکل و یک ماتریس به شکل U وجود دارد. تصاویر مربوط به آزمایش واقعی این مسئله در شکل ۳ آورده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۳ الف) شکل‌دهی ورق در آزمایش واقعی مسئله خمش استوانه ای ورق آلومینیومی ب) شکل نهایی ورق

برای شبیه‌سازی این مسئله با توجه به مشخصات هندسی و شرایط ذکر شده در آن، مشخصات را در نرم افزار وارد کردیم. برای قسمت شکل‌دهی و محاسبه بازگشت فنری از روش حل ایمپلیسیت استفاده شده است. سنبه، ماتریس و ورق به صورت پوسته‌ای مش‌بندی شده‌اند. سنبه و ماتریس به صورت ماده صلب در نظر گرفته شده‌اند. برای مش‌زنی مدل سه بعدی سنبه، ماتریس و ورق، به دلیل تقارن ابعاد و یک دست بودن هندسه، سعی شده است از المان پوسته‌ای مربعی استفاده شود. به دلیل این که سنبه و ماتریس دارای تقارن هستند برای کاهش بار محاسباتی، نصف هندسه را در شبیه‌سازی استفاده کردیم. شکل ۴-الف مدل آماده شده برای شبیه‌سازی این مسئله را نشان می‌دهد.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۴ الف) مدل آماده شده برای شبیه‌سازی مسئله خمش استوانه‌ای ب) تعیین مقیاس برای اندازه‌گیری بازگشت فنری ج) محاسبه زاویه مقیاس پس از بازگشت فنری در شبیه‌سازی

برای محاسبه مقدار زاویه بین دو گوشه ورق و میزان بازگشت فنری نیاز است که مقیاسی مشخص شود تا نسبت به آن مقیاس، بین حالت‌های مختلف مقایسه صورت گیرد. به همین سبب در شکل ۴-ب مقیاس مربوطه تعریف شده است. در این مقیاس ۲۰ میلی‌متر از ابتدا ورق جدا می‌شود و زاویه بین این دو قسمت برای بازگشت فنری مدنظر خواهد بود.

نتیجه ذکر شده برای این فرایند در مسئله خمش استوانه‌ای مقدار زاویه بعد از بازگشت فنری بین ۵۳/۴ تا ۵۵/۸ درجه (میانگین۵۴/۶ درجه) بوده است. همان‌طور که در شکل ۴-ج نشان داده شده، مقدار زاویه بین یک سمت ورق و خط تقارن در شبیه‌سازی بازگشت فنری برابر ۲۷/۰۲ درجه شده است. به همین سبب مقدار زاویه بین دو سمت ورق برابر ۵۴/۰۴ خواهد شد.

برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی ذکر شده، مقدار میانگین نتایج آزمایشگاهی مد نظر قرار گرفته است. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که نتایج خوبی برای شبیه سازی بازگشت فنری مسئله خمش استوانه‌ای بدست آمده است و خطای قابل قبولی با مقدار واقعی وجود دارد.

جدول ۲ مقایسه نتایج مسئله خمش استوانه ای و شبیه‌سازی

زاویه مقیاس ذکر شده در مسئله (درجه)	زاویه مقیاس در حالت شبیه سازی (درجه)	مقدار خطا شبیه سازی و تئوری
۵۴/۶	۵۴/۰۴	٪۱

پس از اطمینان از درستی فرآیند شبیه‌سازی مورد استفاده، نوبت به انجام دادن آزمایش تجربی می‌رسد تا به کمک آن هم برخی از پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی را به دست آوریم و هم بتوانیم نتایج آن را با نتایج شبیه‌سازی خودمان مقایسه کنیم. بدین منظور به وسیله قالب تست شرکت طاها قالب توس شرایط واقعی فرآیند شکل‌دهی قطعه اسپیسر را فراهم می‌کنیم.

در این آزمایش فرآیند شکل‌دهی در چهار حالت مختلف انجام پذیرفت که در هر یک از این حالت‌ها پارامتر سرعت سنبه، میزان اصطکاک بین ابزار و ورق و ضخامت ورق مورد استفاده متفاوت می‌باشد (جدول ۳). در دو حالت اول شرایط محیطی فرایند شبیه به هم بوده و فقط سرعت حرکت سنبه در آن‌ها متفاوت است. در حالت سوم علاوه بر سرعت حرکت سنبه، ضخامت ورق نیز متفاوت در نظر گرفته شده است. در حالت چهارم بین ورق و فک‌های قالب روغن‌کاری انجام شده تا میزان اصطکاک بین ورق و قالب به حداقل خود برسد درحالی‌که در سه حالت اول تماس ابزار و ورق در حالت خشک بوده است.

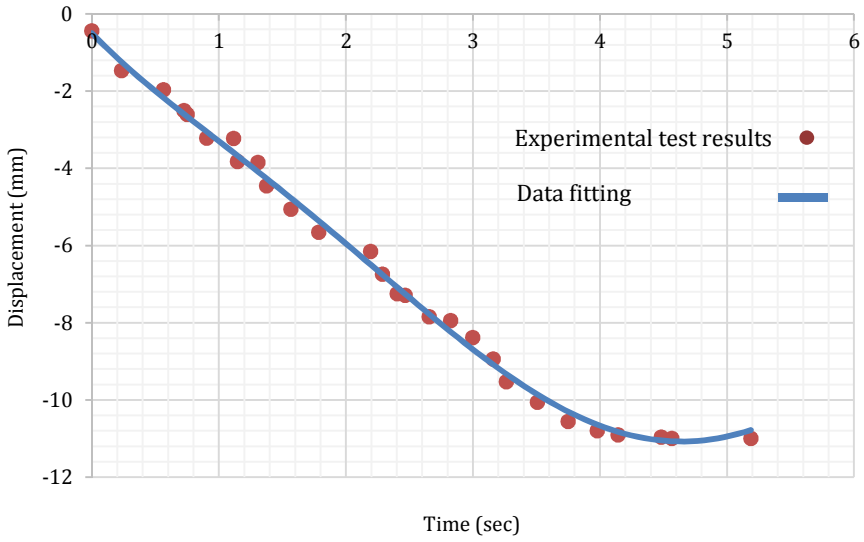
جدول ۳ شرایط آزمایش در چهار حالت مختلف

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
ضخامت ورق (mm)	۰/۶	۰/۶	۰/۸	۰/۶
شرایط تماس ابزار با ورق	خشک	خشک	خشک	روانکاری شده

پارامترهای استخراج شده از این آزمایش برای شبیه‌سازی، جابه‌جایی سنبه بر حسب زمان و مدت زمان شکل‌دهی می‌باشد (جدول ۴) که برای محاسبه آن از کولیس پایه دار، کرنومتر و دوربین فیلم‌برداری استفاده شد تا موقعیت سنبه در گام‌های زمانی مختلف ثبت شود و نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان آن به دست آید (شکل ۵).

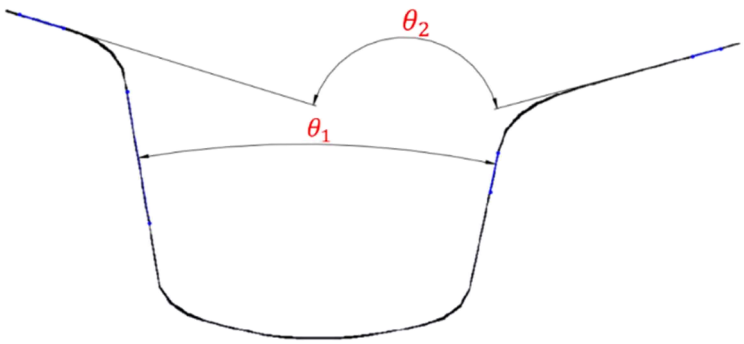
جدول ۴ پارامترهای بدست آمده از آزمایش تجربی برای شبیه‌سازی

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
جابه‌جایی سنبه در مسیر رفت (mm)	۱۱/۶۶۸	۱۱/۵۹۴۴	۱۱/۳۶	۱۱/۵۲۰۴۸
زمان انجام فرایند شکل‌دهی (sec)	۳/۰۵	۵/۲	۱۱/۹۹۴	۴/۵



شکل ۵ نمونه‌ای از نمودارهای جابه‌جایی بر حسب زمان محاسبه شده برای سنبه که مرتبط با حالت دوم آزمایش می‌باشد

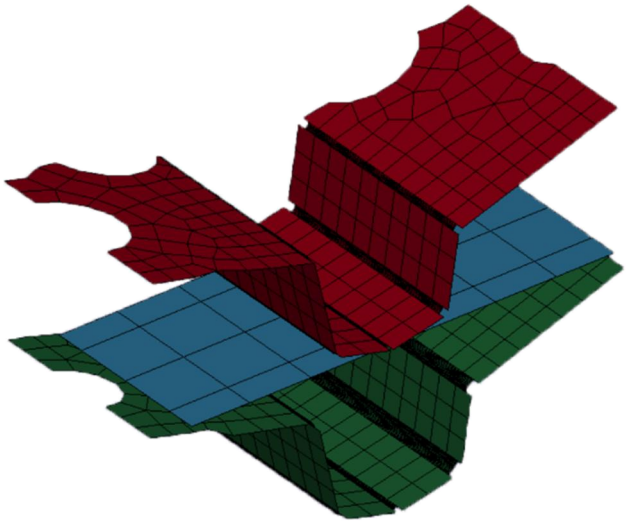
پس از پایان عملیات شکل‌دهی نیاز است که تغییر شکل نهایی ورق برای محاسبه بازگشت فنری، ثبت شود. به همین دلیل پس از پایان هر یک از حالت‌های آزمایش، از هندسه نهایی ورق شکل داده شده تصویر برداری شد. مقیاسی که برای محاسبه بازگشت فنری در نظر گرفته شده است، دو زاویه θ_1 و θ_2 است که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ مقیاس تعیین شده برای محاسبه بازگشت فنری

پس از استخراج داده‌های مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی از آزمایش تجربی، سراغ شبیه‌سازی فرآیند به کمک نرم افزار ال‌اس-داینا می‌رویم و نتایج آزمایش را با نتایج بدست آمده از شبیه سازی مقایسه می‌کنیم تا از صحت آن مطمئن شویم. در ادامه با نحوه شبیه‌سازی آزمایش فرایند شکل‌دهی ورق به وسیله قالب‌های تست شرکت طاها قالب توس بیشتر آشنا می‌شویم.

در این شبیه‌سازی، ورق به صورت پوسته‌ای مش زده شده است. به دلیل هندسه خاص سنبه و ماتریس نمی‌توان مانند شبیه‌سازی انجام شده برای مسئله خمش استوانه‌ای از تقارن هندسی استفاده کرد. برای کاهش هزینه محاسباتی و زمان انجام محاسبه، قسمت های اضافی هندسه که در شبیه سازی تاثیری نداشتند، حذف شد. هم‌چنین پین‌های موقعیت دهنده که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، به‌منظور کاهش سطح تماس بین ورق و ابزار، حذف شده و به جای این پین‌ها به المان‌های ورق قید داده شد تا حرکت آن‌ها فقط در جهت حرکت سنبه باشد و از ماتریس خارج نشوند. در شکل ۷ نحوه مش‌زنی سنبه، ماتریس و ورق برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی نشان داده شده است.



شکل ۷ مدل آماده شده برای شبیه‌سازی شکل‌دهی قطعه اسپیسر

برای سه حالت اول آزمایش، بین ابزار و ورق ضریب اصطکاک ۰/۳ و برای حالت چهارم آزمایش به دلیل روغن‌کاری صورت گرفته بین ابزار و ورق، مقدار ضریب اصطکاک برابر ۰/۱ در پارامترهای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. زمان انجام چهار حالت آزمایش بین بازه زمانی ۴ الی ۱۲ ثانیه رخ می‌دهد. به همین سبب بهتر است از حلگر ایمپلیسیت برای شبیه‌سازی بخش اصلی فرایند شکل‌دهی و شبیه‌سازی بازگشت فنری استفاده شود. همچنین برای المان‌های ورق سازگاری مش در نظر گرفته شد تا نرم افزار به صورت خودکار در حین فرآیند حل مدل شبیه سازی، اندازه المان‌ها را متناسب با دقت مور دنیاز در نواحی مختلف بهینه کند.

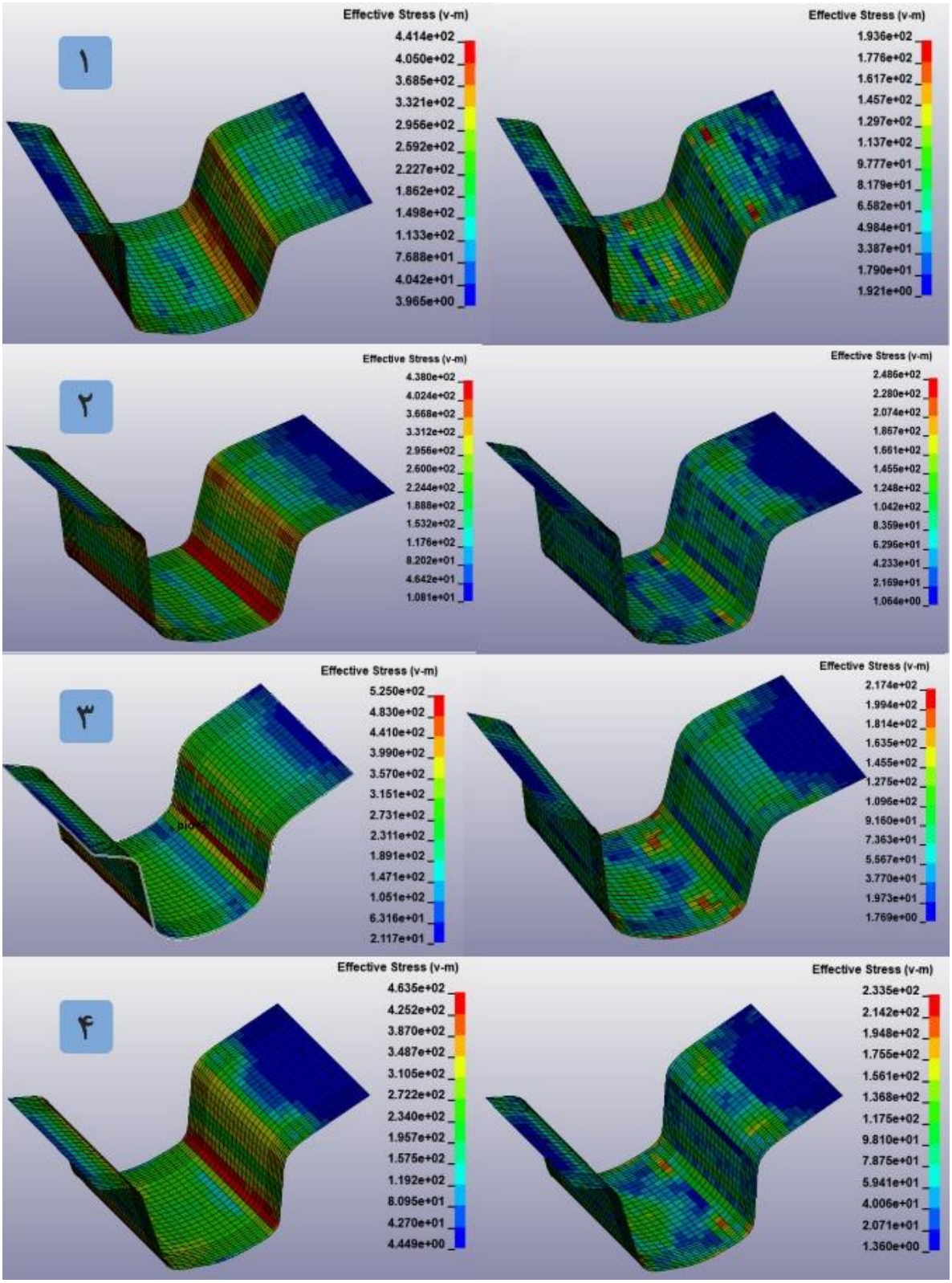
همانطور که پیش‌تر ذکر شد، برای توصیف رفتار ماده در شبیه‌سازی از مدل ماده شماره ۱۸ در نرم افزار ال‌اس-داینا استفاده گردیده است که پارامترهای مورد نیاز برای این مدل ماده به کمک انجام تست کشش و تحلیل نتایج آن استخراج شده و در جدول ۵ ذکر شده است.

جدول ۵ پارامترهای استخراج شده برای توصیف رفتار ورق در شکل‌دهی

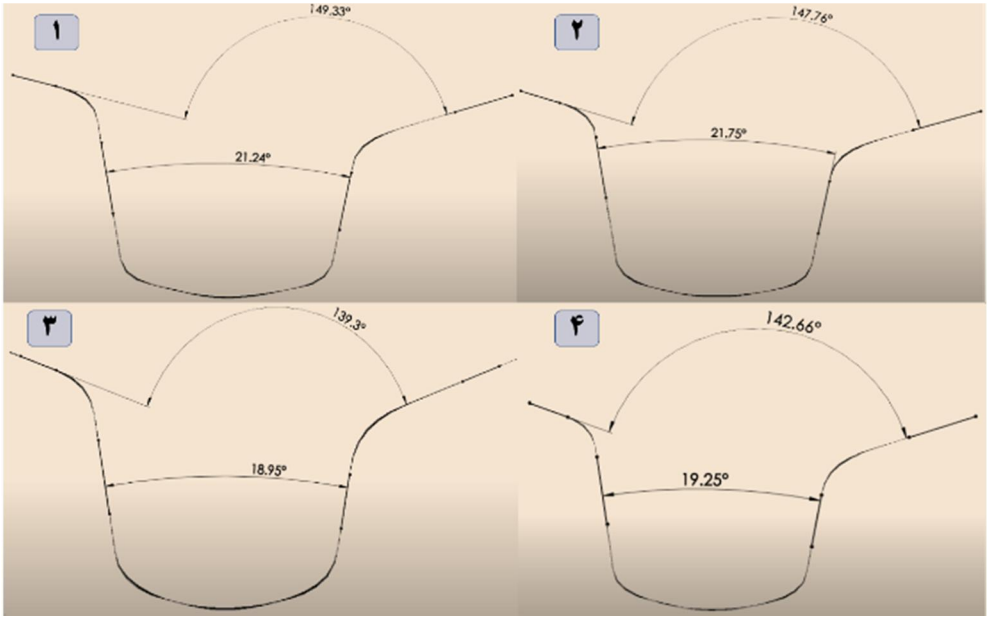
پارامتر	مقدار
K (MPa)	۱۵۰۵
n	۰/۶۵
کرنش متناظر با تنش تسلیم (mm/mm)	۰/۰۶

پس از تعریف پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار، مدل‌های آماده شده را به کمک حل گر نرم افزار ال اس-داینا توسط روش ایمپلیسیت حل کرده و نتایج شبیه‌سازی در محیط پس پردازش را مطالعه می‌کنیم. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی که شامل محاسبه تنش موثر در ورق پس از شکل‌دهی، تنش موثر بعد از بازگشت فنری (مقدار تنش بر حسب MPa محاسبه شده است) و همچنین زوایای θ_1 و θ_2 بعد از پدیده بازگشت فنری در ورق نشان داده شده است (شکل ۸ و ۹).

در جدول ۶ مقادیر به‌دست‌آمده برای زوایای θ_1 و θ_2 پس از بازگشت فنری در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در هر چهار حالت با هم مقایسه شده است.



شکل ۸ ستون سمت چپ مقدار تنش موثر پس از شکل‌دهی و ستون سمت راست مقدار تنش موثر بعد از بازگشت فنری در هر چهار حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۹ زوایای θ_1 و θ_2 بدست آمده از شبیه سازی برای هر چهار حالت

جدول ۶ مقایسه مقادیر θ_1 و θ_2 در آزمایش و شبیه‌سازی

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
زاویه θ_1 در آزمایش (درجه)	۲۱/۴۵	۲۲	۱۹/۸۳	۲۱
زاویه θ_1 در شبیه‌سازی (درجه)	۲۱/۲۴	۲۱/۷۵	۱۸/۹۵	۱۹/۲۵
خطا (٪)	۰/۹۷۹	۱/۱۳۶	۴/۴۳	۸/۳۳
زاویه θ_2 در آزمایش (درجه)	۱۴۵/۱۹	۱۴۶/۸۵	۱۴۳/۹۶	۱۴۶/۵۹
زاویه θ_2 در شبیه‌سازی (درجه)	۱۴۹/۳۳	۱۴۷/۷۶	۱۳۹/۳	۱۴۲/۶۶
خطا (٪)	۲/۸۵	۰/۶۲	۳/۲۳	۲/۶۸

طبق نتایج به‌دست آمده، بیشترین خطای حاصل از شبیه‌سازی بازگشت فنری، زیر مقدار ۱۰ درصد است که بیانگر نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی به مقادیر واقعی زوایای θ_1 و θ_2 و مناسب بودن فرآیند شبیه سازی به کار برده شده می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی قطعه اسپیسر و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی می‌توان این برداشت را داشت که روش تقریبی المان محدود می‌تواند در پیش‌بینی پدیده بازگشت فنری در تولید قطعات صنعتی از دقت مناسبی برخوردار باشد به شرطی که تمام پارامتر های موردنیاز برای انجام شبیه‌سازی به کمک انواع تست‌های مکانیکی و طراحی آزمایشات مرتبط، با دقت بالا محاسبه و استخراج شود. در این پژوهش، ابتدا و جهت اطمینان از فرآیند شبیه‌سازی که در پیش گرفته شده است، به کمک نرم افزار ال-اس داینا مسئله خمش استوانه‌ای ورق آلومینیومی شبیه‌سازی شد که حاصل آن درصد خطای حدود ۱٪ در مقایسه زاویه مقیاس مسئله و زاویه محاسبه شده توسط فرآیند شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین جهت صحت‌سنجی فرآیند شبیه‌سازی، آزمایش تجربی بر روی یک قطعه صنعتی برای چهار حالت مختلف پارامترهای موثر بر شکل‌دهی طراحی گردید و نتایج حاصله از این آزمایش با شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی به خوبی زوایای θ_1 و $-\theta_2$ که موثر بر هندسه و عملکرد قطعه می‌باشند- در انتهای فرآیند شکل‌دهی و پس از بازگشت فنری محاسبه شده و بیشترین درصد خطا در محاسبه این زوایا در چهار حالت مختلف آزمایش، کمتر از ۱۰٪ بوده است.

References

[1] Gau JT, Kinzel GL. A new model for spring back prediction in which the Bauschinger effect is considered. International Journal of Mechanical Sciences. 2001;43(8):1813-32. doi: 10.1016/S0020-7403(01)00012-1

[2] Yoon JW, Pourboghrat F, Chung K, Yang DY. spring back prediction for sheet metal forming process using a 3D hybrid membrane/shell method. International Journal of Mechanical Sciences. 2002;44(10):2133-53. doi: 10.1016/S0020-7403(02)00165-0

[3] Papeleux L, Ponthot JP. Finite element simulation of spring back in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology. 2002;125-126:785-91. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00393-X

[4] Chan WM, Chew HI, Lee HP, Cheok BT. Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes. Journal of Materials Processing Technology. 2004;148(1):15-24. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.038

[5] Eggertsen PA, Mattiasson K. On constitutive modeling for spring back analysis. International Journal of Mechanical Sciences, 2010;52(6):804-18. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.008

[6] Jafari M, Lotfi M, Ghaseminejad P, Roodi M, Teimouri R. Numerical control and optimization of spring back in L-bending of magnesium alloy through FE analysis and artificial intelligence. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015;68(5):969-79. doi: 10.1007/s12666-015-0535-7

[7] Kashfi M, Bakhtiyari D, Ghavamian A, Kashfi M, Kahal P. A numerical-experimental investigation on spring back in rectangular section thin wall hollows and extracting a relation to estimate twisted angle by considering strain harden behavior. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2017;4(1):38-43. [In Persian]

[8] Mahmoudi M, karkehabadi M, Hajighorbani RA. Investigating the Effective Parameters in the Spring Back of Two Layers Sheet Copper-Austenitic Stainless Steel in the Incremental Sheet Forming. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2019;6(8):10-20. [In Persian]

[9] Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. Mechanics of Sheet Metal Forming. Second Edition. Butterworth-Heinemann; 2002. doi: 10.1016/B978-075065300-8/50004-2

[10] Davis JR. Steel Sheet, Strip, and Plate. Metals Handbook Desk Edition. Second Edition. ASM International;1998. doi: 10.31399/asm.hb.mhde2.a0003094

[11] Lee M, Kim S, Wagoner R, Chung K, Kim H. Constitutive modeling for anisotropic/asymmetric hardening behavior of magnesium alloy sheets: Application to sheet spring back. International Journal of Plasticity. 2009;25(1):70-104. doi: 10.1016/j.ijplas.2007.12.003