



# Experimental and Numerical Study of Spring Back of C-die Forming in Austenitic Stainless Steel 316 and Carbon Steel ST37 Sheets with Different Thicknesses

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Rezai Ashtiani H.R.<sup>1\*</sup>,  
Meyghani N.<sup>1</sup>,  
Khalili O.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Rezai Ashtiani H.R., Meyghani N., Khalili O. Experimental and Numerical Study of Spring Back of C-die Forming in Austenitic Stainless Steel 316 and Carbon Steel ST37 Sheets with Different Thicknesses. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(12):651-659.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

hr\_rezaei@arakut.ac.ir

### Article History

Received: October 10, 2023  
Accepted: January 18, 2024  
ePublished: February 18, 2024

## ABSTRACT

At the end of the forming process, when the part is removed from the mandrel and the matrix and the part is loaded, a deformation occurs in the part, and this deformation after forming is called spring back. This research was carried out in order to experimentally determine the spring return of stainless steel 316 and carbon steel ST37 with different thicknesses in C-die forming and compare it with finite element simulation. The parts with three thicknesses of 1, 1.5, and 2 mm, forming and the geometrical dimensions of the spring back of the sheets have been verified. The results showed that the experimental spring back in the finite element simulation is consistent with the test, and also by reducing the thickness, spring back increases, which is affected by perfect elastic zone and surface plastic strain and membrane and bending stress.

**Keywords** Spring Back, Bending, Stainless Steel 316, Carbon Steel ST37, Elastic Strain, Sheet Thickness

## CITATION LINKS

1- Effect of the material-hardening mode ... 2- Finite element simulation of springback ... 3- Obtaining the equations to predict values of springback... 4- Variable blankholder force in U-shaped ... 5- Simulation of springback variation in ... 6- Electromagnetic partitioning forming ... 7- Role of plastic anisotropy and its evolution ... 8- prediction in sheet metal forming of ... 9- Numerical investigations on springback characteristics ... 10- On springback of double-curved autobody panels. 11- An experimental investigation of the influence ... 12- Springback characteristics of arched aluminum ... 13- Prediction and reduction of springback in ... 14- Time dependent springback of a magnesium alloy ... 15- Design and analysis of aircraft sheet metal ... 16- Finite element analysis of sheet metal ... 17- An analytical model for predicting springback ... 18- Springback in sheet metal u bending-Fea and ...

## بررسی تجربی و عددی برگشت فنی در شکل‌دهی دایروی ورق‌های فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷ با ضخامت‌های مختلف

حمیدرضا رضایی آشتیانی<sup>۱\*</sup>، ناصر میقانی<sup>۲</sup>، امید خلیلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی

اراک، اراک، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

### چکیده

در پایان فرایند شکل‌دهی ورق، هنگامی که ورق از درون سنبه و ماتریس بیرون آورده می‌شود و نیروهای شکل‌دهی خمشی حذف می‌گردد، مقداری از تغییر شکل ورق برمی‌گردد، این تغییر شکل پس از شکل‌دهی، برگشت فنی ورق می‌باشد. یکی از عوامل به دست آوردن اندازه مطلوب و طراحی صحیح قالب خم ورق به دانش طراح نسبت به مقادیر برگشت فنی بستگی دارد. این تحقیق به منظور تعیین تجربی برگشت فنی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷ با ضخامت‌های مختلف ورق در قالب‌های دایروی شکل و مقایسه با شبیه‌سازی به روش المان محدود صورت پذیرفته است. ورق‌ها با سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر شکل‌دهی و ابعاد هندسی و برگشت فنی ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر برگشت فنی در شبیه‌سازی المان محدود و آزمون تجربی از مطابقت قابل قبولی برخوردار بوده و با کاهش ضخامت ورق مقادیر برگشت فنی افزایش می‌یابد که متأثر از مقادیر تنش در سطوح ورق و در نتیجه مقادیر کرنش پلاستیک و ناحیه الاستیک خالص در ورق می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** برگشت فنی، خم‌کاری، فولاد ضدزنگ ۳۱۶، فولاد کربنی ST۳۷، کرنش الاستیک، ضخامت ورق

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۸

\* نویسنده مسئول: hr\_rezaei@arakut.ac.ir

### ۱- مقدمه

یکی از مواد اولیه‌ای که در صنایع کاربرد بالایی دارد فولاد کربنی ST۳۷ می‌باشد. این آلیاژ فولاد با توجه به ترکیب شیمیایی در زمره فولادهای نرم (کم‌کربن) با درصد کربن کمتر ۰/۲۵ درصد قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین کاربردهای این ورق فولادی می‌توان به استفاده در بدنه خودرو، تولید نبشی و ناودانی و بدنه لوازم خانگی مثل یخچال اشاره کرد. از دیگر ورق‌های پرکاربرد، ورق فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۱۶ می‌باشد. این آلیاژ علاوه بر کروم و نیکل، حاوی مقادیر مشخصی مولیبدن نیز در ترکیب شیمیایی می‌باشد از مهم‌ترین کاربردهای ورق‌های این فولاد می‌توان به استفاده در مخازن ذخیره و انتقال مواد شیمیایی و تجهیزات پزشکی، تجهیزات مرتبط با صنعت هوافضا، تجهیزات تولید، نگهداری و حمل مواد غذایی اشاره کرد. یکی از چالش‌های مهم در شکل‌دهی و به‌خصوص در خم‌کاری ورق‌ها فلزی، برگشت فنی می‌باشد.

برگشت فنی ناشی از تغییر شکل یک ورق پس از حذف نیروی بارگذاری به دلیل این‌که تمام قطعه کار وارد ناحیه پلاستیک نشده و بخش‌هایی از آن در ناحیه الاستیک باقی‌مانده است، می‌باشد. پیش‌بینی مقادیر برگشت فنی و شناخت پارامترهای مؤثر آن در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها و سایر مقاطع دارای اهمیت بسیاری است. زیرا برگشت فنی مهم‌ترین پدیده‌ای است که بر دقت قطعات ورق فلزی تأثیر می‌گذارد و اصلاح آن امکان‌پذیر نمی‌باشد و شامل هزینه‌های بسیار سنگین در تغییر قالب بخصوص اینکه شکل‌دهی در ورق عموماً برای تولید قطعات با تیراژ بالا می‌باشد. همچنین با تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر در برگشت فنی، ایراداتی مانند چروکیدگی، گوشواره‌ای شدن، پارگی را کاهش داده و همچنین می‌توان محصولی با کیفیت مناسب را تولید کرد.

لی و همکارانش<sup>[1]</sup> به بررسی تأثیر سخت شدن مواد بر دقت شبیه‌سازی برگشت فنی پرداختند، آن‌ها گزارش نمودند که مدل سخت شدن ماده مستقیماً بر دقت محاسبه برگشت فنی تأثیر می‌گذارد. هر چه صحت مدل سخت شدن بیشتر باشد، دقت محاسبه برگشت فنی بیشتر است. آن‌ها همچنین بیان کردند که مدول یانگ تأثیر زیادی بر دقت نتایج شبیه‌سازی برگشت فنی دارد. بطوریکه استفاده از تغییر مدول یانگ با تغییر شکل پلاستیک می‌تواند دقت شبیه‌سازی برگشت فنی را افزایش دهد.

پاپلوکس و همکارانش<sup>[2]</sup> در مقاله‌ای به بررسی شبیه‌سازی المان محدود برگشت فنی در شکل‌دهی ورق فلزی پرداختند، آن‌ها گزارش کردند که به‌طور تجربی برگشت فنی با نیروهای کوچک نگه‌دارنده قطعه کار افزایش می‌یابد، اما با افزایش نیرو برای مقادیر بزرگ نیرو، برگشت فنی کاهش می‌یابد. همان نتایج در شبیه‌سازی عددی نیز گزارش شده است.

شفیعی و همکارانش<sup>[3]</sup> در پژوهش خود به بررسی پیش‌بینی مقادیر بازگشت فنی و شعاع انحنا دیواره در خم‌کاری U شکل ورق‌هایی از جنس فولاد دوفازی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش نشان دادند که با افزایش نیروی ورق گیر در ابتدا میزان بازگشت فنی دیواره و فلنج و شعاع انحنا دیواره جانبی کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر نیروی ورق گیر از مقادیر معینی شرایط عکس می‌شود. همچنین نشان دادند که با افزایش استحکام تسلیم ورق، مقادیر هر سه پارامتر کاهش می‌یابد. لیو و همکارانش<sup>[4]</sup> استفاده از نیروی ورق گیر متغیر را برای کاهش بازگشت فنی و شعاع انحنا دیواره در کشش ورق به شکل U را پیشنهاد کردند. چن و همکاران<sup>[5]</sup> به بررسی برگشت فنی فولادهای با استحکام بالا به روش اجزا محدود و مقایسه آن با داده‌های تجربی پرداختند. آن‌ها روشی برای شبیه‌سازی تغییرات برگشت فنی توسعه دادند که درک درست از تأثیر تغییرات فرآیند تصادفی بر روی تغییر برگشت فنی قطعه تشکیل‌شده با استفاده از

پرداختند. آن‌ها گزارش کردند مدل‌های المان محدود ایجاد شده در حالت explicit برای شبیه‌سازی مرحله شکل‌دهی مناسب است درحالی‌که حالت implicit برای شبیه‌سازی مرحله بازگشت فنری مناسب است. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ برگشت فنری ورق با افزایش استحکام اسمی تسلیم و شعاع ورق افزایش می‌یابد.

کنزاک و همکاران [13] به بررسی و توسعه یک مدل المان محدود پرداختند که بتواند برگشت فنری را در یک فرآیند شکل‌دهی سه‌بعدی پیش‌بینی کند. در این فرآیند در کنار تغییر زاویه دیوار و شعاع انحنا دیواره، پیچش دیواره جانبی نیز مشاهده شد. بررسی آن‌ها نشان داد که کشش اضافی می‌تواند برگشت فنری را کاهش دهد و استفاده از نیروی نگهدارنده متغیر، انحنا دیوار جانبی و تغییر زاویه دیوار را به‌طور محسوس کاهش نمی‌دهد اما به‌طور قابل‌توجهی پیچش را کاهش می‌دهد. لی و همکاران [14] برگشت فنری وابسته به زمان در یک ورق آلیاژ روی AZ3 پس از خمش سه‌نقطه در دمای اتاق را بررسی نمودند. که به دو صورت آزمایش را انجام دادند شامل برگشت فنری پایه - نمونه‌ها خم شده و بلافاصله رها شدند و برگشت فنری هرماه اندازه‌گیری شد. برگشت فنری پس از نگهداری - پس از خم شدن، نمونه‌ها تا پنج ماه در حالت خم نگه‌داشته شدند و پس از رهاسازی، پشت فنری اندازه‌گیری شد. مشخص شد که برگشت فنری به‌طور غیرخطی با گذشت زمان در تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

گوپتا و همکاران [15] آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری زاویه برگشت فنری قطعه کار پس از عملیات خمش V شکل با مواد فولادی تحت سه زاویه خم متفاوت و سه ضخامت مختلف به‌منظور تأیید نتایج المان محدود مورد تجزیه و تحلیل قراردادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت برای زاویه خم برابر برگشت فنری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که با افزایش زاویه خم با ضخامت برابر، برگشت فنری افزایش می‌یابد.

پانتی و همکاران [16] از روش تحلیل المان محدود به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی مانند شعاع قالب و ضخامت ورق، خواص مکانیکی مواد مانند تنش تسلیم، مدول یانگ و توان سخت شدن کرنش بر برگشت فنری پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که نسبت برگشت فنری با افزایش شعاع قالب افزایش و با افزایش ضخامت ورق کاهش می‌یابد. همچنین برگشت فنری با افزایش تنش تسلیم افزایش اما با افزایش مدول یانگ کاهش می‌یابد.

ژانگ و همکاران [17] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی برگشت فنری ورق پس از خمش U شکل براساس معیار تسلیم هیل ۴۸ و شرایط کرنش صفحه ای در نظر گرفتند. این مدل اثرات تاریخی تغییر شکل، نازک شدگی ضخامت و تغییر سطح خنثی بر برگشت فنری ورق خمش U را در نظر می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که هنگامی که فاصله متغیر سطح خنثی از یک

تکنیک‌های FEA فراهم می‌کند که نیاز به آزمایش‌های فیزیکی طولانی و پرهزینه را از بین می‌برد. سو و همکارانش [6] در مطالعه‌ای، یک روش شکل‌دهی پارتیشن‌بندی الکترومغناطیسی پیشنهاد دادند که ساخت دقیق و کنترل دقیق برگشت فنری یک قطعه دارای انحنا را تسهیل می‌کند. آن‌ها بیان کردند که هم آزمایش تجربی و هم شبیه‌سازی برگشت فنری بسیار بزرگ را در ورق‌هایی که در معرض خمش خالص با شعاع خمشی بزرگ قرار دارند نشان می‌دهد، اما در ورق‌هایی که در معرض تشکیل پارتیشن‌بندی الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، فقط برگشت فنری کوچک را نشان می‌دهند. گنگ و واگونر [7] اثرات ناهمسانگردی پلاستیک و تکامل آن را در بازگشت فنری مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها یک معادله رفتاری برای آلیاژ آلومینیوم AA6022-T4 با استفاده از یک مدل سخت‌شوندگی ناهمسانگرد جدید پیشنهاد کردند.

چونگ‌هایرونگ روانگ و همکارانش [8] ویژگی‌های برگشت فنری فولاد نرم از گرید JSC270C و دو فولاد با استحکام بالا از گرید JSC780Y و JSC590R با استفاده از فرم دهی U شکل و مدل‌سازی FE با استفاده از مدل‌های Hill's 1948، Barlat's 2000 و Yoshida-Uemori را مورد بررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که استحکام مواد به‌طور قابل‌توجهی بر برگشت فنری تأثیرگذار است بطوریکه استحکام بالاتر منجر به افزایش برگشت فنری شد. هونگ سوک کیم و همکاران [9] تأثیر گرادیان دما بر برگشت فنری در شکل‌دهی گرم مواد سبک‌وزن را بررسی نمودند. آن‌ها با اندازه‌گیری دقیق مقدار برگشت فنری در سه ناحیه ابزار متمایز (یعنی گوشه قالب، گوشه پانچ و دیواره جانبی)، تأثیر توزیع دمای شکل‌دهی بر کیفیت قطعه تحت طیف گسترده‌ای از شرایط عملیاتی را ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که مقدار بازگشت فنری با افزایش دمای شکل‌دهی بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل کاهش استحکام مواد در دماهای بالا بسیار کاهش می‌یابد و با کاهش سرعت شکل‌دهی برگشت فنری کاهش می‌یابد. اسنافی [10] مدل‌های نظری را برای توضیح برگشت فنری ورق‌های فولادی و آلومینیومی در پانل‌های بدنه خودرو توسعه داد. او گزارش داد که بر اساس مطالعات تحلیلی و تجربی، می‌توان با افزایش نیروی نگه‌دارنده ورق، ضخامت ورق، و شعاع قالب و کاهش استحکام تسلیم، برگشت فنری را کاهش داد.

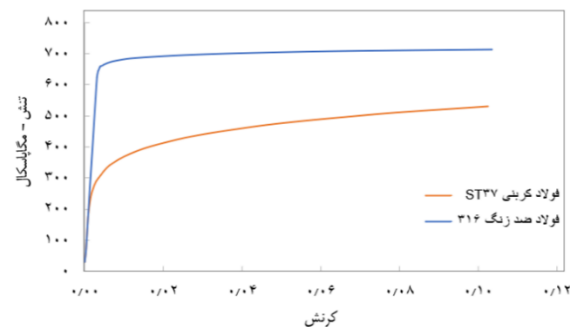
گاو و کینزل [11] به‌طور تجربی اثر بوشینگر برای فولاد و آلیاژهای آلومینیوم را در فرآیند خمش ساده بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اثر بوشینگر بر برگشت فنری آلیاژ آلومینیوم-AA6111-T4 بسیار مهم است، درحالی‌که این اثر بر ورق‌های فولادی HS، AKDQ و BK ناچیز است.

گوا و همکاران [12] بر اساس تحلیل‌های تجربی و عددی، به بررسی ویژگی‌های برگشت فنری صفحه آلیاژ آلومینیوم

جدول ۱) برخی از خصوصیات مکانیکی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و ST۳۷ مستخرج از آزمون کشش

فولاد	مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
ضدزنگ ۳۱۶	۲۰۰	۶۶۸	۷۱۴	۴۰
ST۳۷	۲۱۰	۳۰۰	۵۳۰	۲۲

برای انجام آزمایش از ورق هایی با عرض ۲۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر و با ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر استفاده شده که از هر ضخامت سه نمونه مورد آزمون قرار گرفته است. تصویر مربوط به قالب و دستگاه آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است که دارای یک سنبه و یک ماتریس با هندسه دایره می‌باشد. قطر ماتریس ۱۰۰ میلی‌متر و قطر سنبه ۹۶ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱) نمودار تنش و کرنش فولادهای ضدزنگ ۳۱۶ و کربنی ST۳۷ (بدست آمده از آزمون کشش)



شکل ۲) الف) نمایش دستگاه و تجهیزات آزمایش تجربی و قالب و ورق در حین خم کاری ب) روش اندازه‌گیری ابعاد قطعه در انتهای خمکاری

چهارم ضخامت ورق تجاوز می‌کند، برگشت فنری را می‌توان با افزایش نیروی نگهدارنده و اصطکاک بین ورق و قالب به طور موثری کاهش داد و برگشت فنری با اصطکاک بین ورق و سنبه افزایش می‌یابد و با ضخامت ورق کاهش می‌یابد.

گاواد و همکاران [18] به بررسی بازگشت فنری با استفاده از تحلیل المان محدود، برای شعاع قالب‌های مختلف، ضخامت ورق، نسبت شعاع قالب به ضخامت ورق و ضریب استحکام برای دو ماده مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برگشت فنری با افزایش ضخامت، برای هر دو ماده کاهش می‌یابد. همچنین برگشت فنری با افزایش نسبت شعاع قالب به ضخامت ورق و ضریب استحکام افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش ضریب سخت شدن کرنش، میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد.

فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST ۳۷ بطور گسترده در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز و صنایع دارویی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به مزایای قابل توجه فولاد ضدزنگ در مقایسه با فولاد کربنی، در صنایع مختلف بخصوص در صنایع دارویی، به مرور فولاد ضد زنگ ۳۱۶ به جای فولاد کربنی ST۳۷ در حال استفاده می‌باشد. برای این منظور پارامترهای مختلفی از جمله برگشت فنری برای تعیین امکان استفاده از قالب‌های موجود مورد بررسی قرارگیرد. لذا با توجه به اهمیت برگشت فنری در ورق‌های فولادی مورد بحث، در این تحقیق به بررسی و مقایسه تجربی و عددی مقدار برگشت فنری دو ورق فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST ۳۷ با سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر پس از خم‌کاری در قالب‌های دایروی شکل پرداخته می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده از روش تجربی با نتایج شبیه‌سازی به روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس مقایسه می‌گردد. همچنین در این تحقیق، مقادیر تنش در ضخامت قطعه، خطی‌سازی شده و مقادیر تنش خمشی و ممبران با مقدار برگشت فنری، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. و نیز تغییرات کرنش پلاستیک و الاستیک و نواحی و مقادیر آن در راستای ضخامت قطعه با استفاده از نرم افزار المان محدود محاسبه و با هم مقایسه شدند.

## ۲- روش انجام آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

همان‌طور که بیان شد جهت بررسی برگشت فنری در باضخامت‌های مختلف، مطالعه تجربی و شبیه‌سازی المان محدود صورت پذیرفت. ابتدا نمونه‌هایی از ورق‌های فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷ جهت مشخص کردن خواص مواد، تحت آزمون کشش قرار گرفت و نمودار تنش-کرنش آن‌ها مطابق با شکل ۱ استخراج گردید. مقادیر تنش تسلیم و استحکام نهایی مواد فولادهای تحت بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

در این شبیه سازی قالب در تمام جهات ثابت شده و سنبه با سرعت ثابت به سمت قالب حرکت می‌کند. بین سطح بالا و پایین ورق و سطوح سنبه و قالب، تماس سطح روی سطح بدون اصطکاک تعیین شده است.

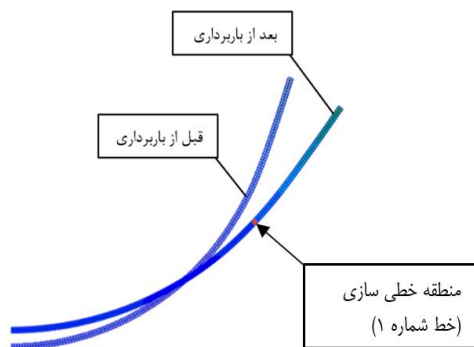
برای اندازه‌گیری برگشت فنری، پس از اتمام تغییر شکل، مختصات دو نقطه انتهایی قطعات استخراج و فاصله آن‌ها نسبت به یکدیگر اندازه‌گیری می‌شود و بعد از باربرداری از قطعه و اعمال برگشت فنری روی قطعه، مختصات همان دو نقطه مجدداً استخراج و اندازه‌گیری می‌شود که اختلاف ایجاد شده در این دو حالت، بعنوان معیاری از برگشت فنری ورق استفاده می‌شود.

برای بررسی تنش‌ها در ضخامت ورق نیاز است که تنش‌ها دسته‌بندی و تفکیک شده و مقادیر آن‌ها مقایسه گردد. برای این منظور از ابزار خطی سازی تنش در آباکوس استفاده شده است. در خطی‌سازی، تنش معادل وارده در یک مقطع، به تنش‌های ممبران، خمشی و متمرکز تفکیک می‌گردد. تنش ممبران، معادل میانگین تنش که به صورت ثابت و یکنواخت در طول ضخامت ورق توزیع شده است و تنش‌های متمرکز را شامل نمی‌شود. همچنین تنش خمشی، تنش معادلی است که در راستای ضخامت یک مقطع، با یک شیب ثابت از مقدار حداکثر فشاری به حداکثر کششی تغییر می‌کند. ناحیه خطی سازی قطعه برای استخراج نتایج مقادیر تنش ممبران و خمشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ نتایج مربوط به تغییر شکل نمونه قبل و پس از باربرداری و میزان برگشت فنری در قطعه پس از باربرداری مشاهده می‌گردد.

در جدول ۲ مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تجربی قطعات فولاد ضدزنگ ۳۱۶ که مربوط به ابعاد ورق در انتهای فرایند شکل‌دهی و همچنین ابعاد ورق پس از باربرداری می‌باشد، مشاهده می‌گردد.



شکل ۳) مقایسه شکل ورق شبیه سازی شده قبل و بعد از باربرداری

آزمایش‌ها با سرعت ثابت صورت پذیرفت، در این مرحله همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ماتریس به‌صورت ثابت و سنبه به‌صورت محرک می‌باشد که ماتریس روی محور دستگاه و سنبه روی صفحه ثابت شده است.

روند خم کردن قطعه دارای چهار مرحله می‌باشد:

- قرارگرفتن ورق در قالب و پایین آوردن سنبه تا تماس با ورق
- شروع آزمون خم کاری با پیشروی خودکار و سرعت ثابت سنبه
- توقف حرکت سنبه در انتهای عملیات شکل دهی، با مشاهده افزایش شدید نیرو در انتهای کورس
- اندازه‌گیری فاصله دهانه قطعه قبل از باربرداری با کولیس دیجیتال
- باربرداری از قطعه و بازگشت سنبه به مکان اولیه و اندازه‌گیری فاصله دهانه قطعه پس از باربرداری
- اندازه‌گیری دهانه قطعه پس از باربرداری جهت محاسبه مقدار برگشت فنری مشاهده صورت می‌پذیرد. در رابطه (۱)، روش محاسبه اختلاف دهانه ورق قبل و بعد از باربرداری نشان داده شده است.

$$DS = L_{ul} - L_{ef} \quad (1)$$

که در آن  $L_{ul}$  طول دهانه پس از باربرداری و  $L_{ef}$  طول دهانه در انتهای بارگذاری یا خم کاری می‌باشد.

هنگامی که قطعه در انتهای مسیر شکل دهی قرار گرفته و هنوز در داخل قالب تحت بارگذاری می‌باشد، فاصله دهانه قطعه توسط کولیس دیجیتال اندازه‌گیری می‌شود که این مقدار  $L_{ef}$  می‌باشد و پس از آن قطعه را از داخل قالب بیرون آورده و فاصله دهانه قطعه دوباره اندازه‌گیری شده است که این مقدار  $L_{ul}$  می‌باشد.

شبیه‌سازی برگشت فنری با استفاده از روش المان محدود و با نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفت. خواص به‌دست‌آمده از آزمون کشش مواد به‌عنوان پارامترهای ورودی تعیین شدند. در این فرایند ابتدا نمونه در یک مرحله دینامیکی تحت تغییر شکل ناشی از حرکت سنبه به‌طرف ماتریس قرار گرفت و سپس در یک مرحله استاتیکی باربرداری صورت گرفته و میزان برگشت فنری در نتایج آن مشاهده می‌گردد.

برای کاهش زمان حل نرم‌افزار، قطعات به‌صورت متقارن دوبعدی مدل‌سازی شده است. سنبه و ماتریس به‌صورت قطعات صلب در نظر گرفته شدند و اندازه مش برای ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر برابر ۰/۳ و اندازه مش برای ورق‌ها با ضخامت ۱ و ۱/۵ میلی‌متر برابر ۰/۲ و از نوع مربعی انتخاب شد. در این شبیه‌سازی از المان چهارضلعی CPE4R با توجه به هندسه قطعه و المان بندی با بالاترین کیفیت، استفاده شده است. بهینه‌سازی و استقلال از اندازه مش با استفاده از مقادیر کرنش پلاستیک بدست آمده است.

**جدول ۲)** مقادیر ابعاد به دست آمده از آزمایش‌ها تجربی فولاد ضد زنگ ۳۱۶

مقدار ضخامت ورق	نمونه	انتهای خم کاری (میلی متر)	پس از باربرداری (میلی متر)
۲ میلی متر	نمونه اول	۱۰۴/۵	۱۱۵/۲
	نمونه دوم	۱۰۵/۲	۱۱۴/۲
	نمونه سوم	۱۰۵/۴	۱۱۴/۴
۱/۵ میلی متر	نمونه اول	۱۰۶/۵	۱۱۸/۳
	نمونه دوم	۱۰۶/۴	۱۱۸/۷
	نمونه سوم	۱۰۵/۸	۱۱۸/۹
۱ میلی متر	نمونه اول	۱۰۶/۴	۱۲۴/۵
	نمونه دوم	۱۰۷	۱۲۴/۴
	نمونه سوم	۱۰۶/۸	۱۲۴/۸

مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها تجربی قطعات فولاد کربنی ST۳۷ که مربوط به ابعاد قطعه در انتهای فرایند شکل دهی و همچنین ابعاد قطعه پس از باربرداری می‌باشد، در جدول ۳ مشاهده می‌گردد.

در جدول ۴ نیز مقادیر به دست آمده از شبیه سازی عددی قطعات فولاد ضد زنگ ۳۱۶ که مربوط به ابعاد دهانه قطعه در انتهای فرایند شکل دهی و همچنین ابعاد دهانه قطعه پس از باربرداری می‌باشد، مشاهده می‌گردد.

مقادیر به دست آمده از شبیه سازی عددی ورق های فولاد کربنی ST۳۷ که شامل ابعاد دهانه قطعه در انتهای فرایند شکل دهی و همچنین ابعاد دهانه قطعه پس از باربرداری می‌باشد در جدول ۵ مشاهده می‌گردد.

**جدول ۳)** مقادیر ابعاد به دست آمده از آزمایش‌ها تجربی فولاد کربنی ST۳۷

مقدار ضخامت- نمونه	انتهای خم کاری (میلی متر)	پس از باربرداری (میلی متر)
۲ میلی متر	نمونه اول	۱۰۹/۶
	نمونه دوم	۱۰۹/۴
	نمونه سوم	۱۰۹/۴
۱/۵ میلی متر	نمونه اول	۱۱۰/۴
	نمونه دوم	۱۱۰/۵
	نمونه سوم	۱۱۰/۴
۱ میلی متر	نمونه اول	۱۱۲/۲
	نمونه دوم	۱۱۲/۵
	نمونه سوم	۱۱۲/۳

**جدول ۴)** مقادیر ابعاد بدست آمده از شبیه سازی عددی فولاد ضد زنگ ۳۱۶

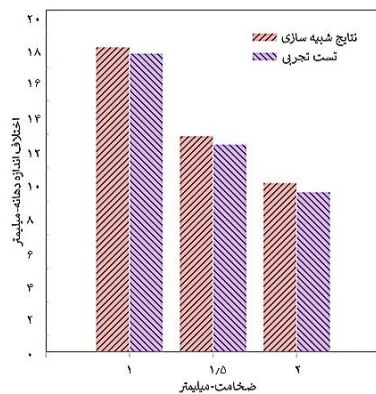
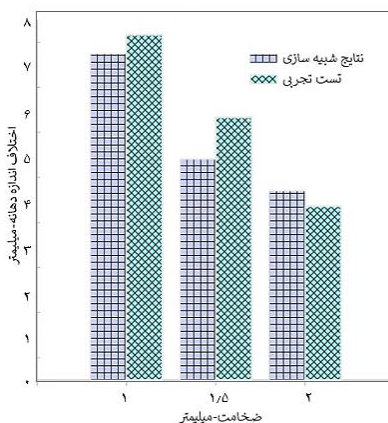
مقدار ضخامت ورق	انتهای خم کاری (میلی متر)	پس از باربرداری (میلی متر)
۲ میلی متر	۱۰۴/۱۶	۱۱۴/۱۲
۱/۵ میلی متر	۱۰۴/۰۲	۱۱۶/۵۸
۱ میلی متر	۱۰۳/۸	۱۲۴/۲

**جدول ۵)** مقادیر به دست آمده از شبیه سازی عددی فولاد کربنی ST۳۷

مقدار ضخامت ورق	انتهای خم کاری (میلی متر)	پس از باربرداری (میلی متر)
ورق ۲ میلی متر	۱۰۵/۸۹	۱۱۰/۰۹
ورق ۱/۵ میلی متر	۱۰۵/۰	۱۰۹/۹
ورق ۱ میلی متر	۱۰۴/۹۲	۱۱۲/۱۶

در شکل ۴، مقدار بازشدگی دهانه قطعه پس از باربرداری، از نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی برای مواد فولاد ضد زنگ ۳۱۶ باهم مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل المان محدود به خوبی توانسته است برگشت فنری تجربی را مدل سازی کند و می تواند در شبیه سازی فرآیند بکار رود.

مقایسه مقدار باز شدن دهانه ورق پس از باربرداری برای مواد فولاد کربنی ST۳۷ در نمودار شکل ۵ مشاهده می گردد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی در مواد فولاد ضد زنگ کمتر از ۵ درصد می باشد. در مطالعاتی که پانتی و همکاران [16] و همچنین گاواد و همکاران [18] انجام داده اند نیز کاهش برگشت فنری با افزایش ضخامت قطعات مشاهده شده است.

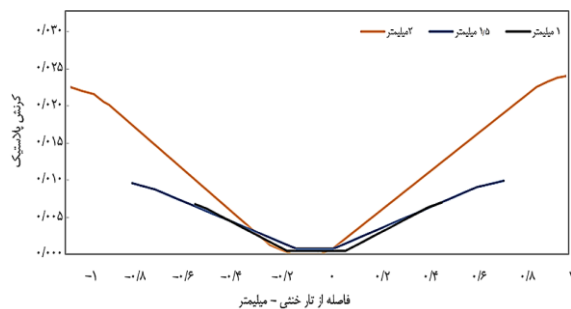
**شکل ۴)** اختلاف اندازه دهانه قبل و بعد از باربرداری در ضخامت های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر فولاد ضد زنگ ۳۱۶**شکل ۵)** اختلاف اندازه دهانه قبل و بعد از باربرداری در ضخامت های ۱ و ۱/۵ و ۲ میلی متر فولاد کربنی ST۳۷



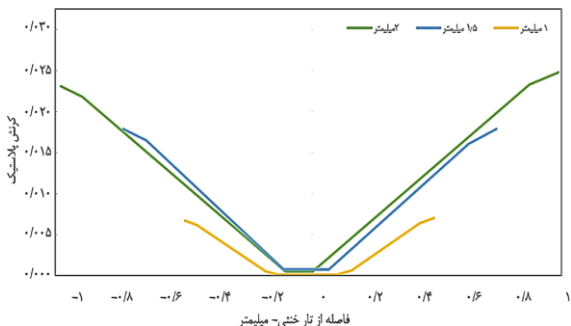
همانطور که از شکل ۶ و ۷ مشخص است جهت تغییرشکل یکسان ورق‌های فولادی مورد بررسی، ورق فولاد ضدزنگ نیاز به تنش خمشی و ممبران بیشتری جهت ایجاد تغییرشکل یکسان می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ضخامت در قطعه، بیشینه تنش خمشی نیز افزایش یافته و در نتیجه باعث تغییر شکل پلاستیک بیشتر در سطوح قطعه شده و در نهایت میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد.

مقادیر کرنش پلاستیک در ضخامت قطعه مواد فولاد ضدزنگ ۳۱۶ برای ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر کرنش پلاستیک و گرادیان کرنش با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. در نهایت مشاهده شد با افزایش ضخامت در قطعه، تنش ممبران نیز افزایش یافته و باعث تغییر شکل‌های پلاستیک شده و در مجموع با تنش‌های خمشی باعث کاهش برگشت فنری در قطعه می‌گردد.

در شکل ۹ مقادیر کرنش پلاستیک در منطقه خطی سازی شماره یک در جهت داخل به بیرون ورق و برای هر سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر ورق فولاد کربنی ST۳۷ نشان داده شده است. بررسی نمودارهای تغییرات کرنش دو ورق فولادی نشان می‌دهد که حداکثر کرنش پلاستیک در طول ضخامت ورق برای هر دو جنس نزدیک بهم می‌باشد که با کمی اختلاف مقدار آن در فولاد کربنی بیشتر از فولاد ضدزنگ می‌باشد و گرادیان کرنش پلاستیک تاحدودی در ورق فولاد کربنی کمتر از فولاد ضدزنگ می‌باشد.



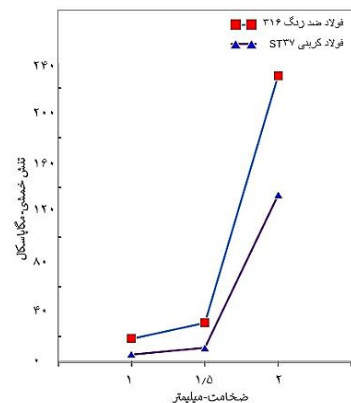
شکل ۸) تغییرات کرنش پلاستیک فولاد ضد زنگ ۳۱۶ در طول ضخامت ورق خم شده در محل خطی سازی شکل ۳ در ضخامت‌های مختلف ورق



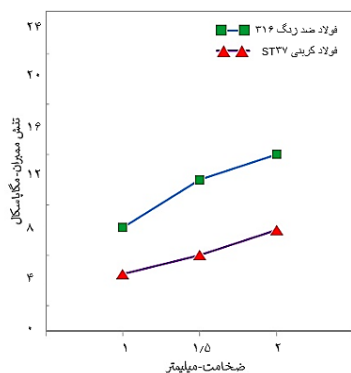
شکل ۹) تغییرات کرنش پلاستیک فولاد کربنی ST ۳۷ در طول ضخامت ورق خم شده در محل خطی سازی شکل ۳ در ضخامت‌های مختلف ورق

همانطور که در شکل ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت ورق خم کاری شده برای هر دو فولاد مورد بررسی از میزان برگشت فنری ورق کاسته می‌شود. در حالیکه میزان برگشت فنری در ورق فولاد ضدزنگ مورد استفاده خیلی بیشتر از فولاد کربنی مورد بررسی می‌باشد. که علت آن در میزان کرنش پلاستیک اعمالی و نسبت کرنش الاستیک به کل کرنش و همچنین استحکام تسلیم فولاد های تحت بررسی می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی در مواد فولاد ضد زنگ بین ۶ تا ۱۳ درصد می‌باشد. همچنین گاواد و همکاران [18] و همچنین گوا و همکاران [12] به این نتیجه دست یافتند که با افزایش استحکام مواد، میزان برگشت فنری نیز افزایش می‌یابد که در اینجا نیز مشاهده می‌گردد که میزان برگشت فنری مواد فولاد ضد زنگ ۳۱۶ از مواد فولاد کربنی ST۳۷ بالاتر می‌باشد.

مقادیر تنش‌های نرمال و خمشی توسط خطی سازی استخراج و دسته‌بندی شده است. مقایسه نتایج استخراج شده از خطی سازی تنش خمشی در دو ورق فولادی در شکل ۶ نشان داده شده است در حالیکه مقادیر تنش ممبران مربوط به خط شماره ۱ در شبیه سازی خمکاری ورق با ضخامت‌های مختلف ورق‌های فولادی مختلف در شکل ۷ مشاهده می‌گردد.



شکل ۶) مقادیر تنش خمشی در خط شماره ۱ در ضخامت‌های مختلف ورق فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷



شکل ۷) مقادیر تنش ممبران در خط شماره ۱ در ضخامت‌های مختلف فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷

مشخص گردید که با افزایش ضخامت ورق، مقدار برگشت فنری کاهش می‌یابد.

از مقایسه نتایج خطی سازی تنش نیز مشاهده شد که افزایش تنش خمشی و ممبران در ورق‌ها باعث کاهش میزان برگشت فنری می‌گردد و همچنین با افزایش ضخامت قطعه، مقادیر تنش ممبران و خمشی نیز افزایش می‌یابد و تعیین گردید که افزایش مقدار تنش خمشی تأثیر بیشتری در مقدار برگشت فنری در قطعات دارد.

مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک در قطعات نشان داد که افزایش ناحیه الاستیک در قطعه باعث افزایش مقدار برگشت فنری شده و با افزایش ضخامت قطعه در یک خم ثابت، ناحیه الاستیک کاهش و ناحیه پلاستیک افزایش داشته است.

همچنین با مقایسه مقادیر نسبت ناحیه الاستیک که در هر دو ورق فولاد به دست آمد، ملاحظه شد که فولاد کربنی ST۳۷ دارای ناحیه الاستیک کمتری نسبت به فولاد ضدزنگ ۳۱۶ می‌باشد. با کاهش استحکام تسلیم و تنش نهایی فولاد، مقادیر نسبت ناحیه الاستیک کاهش یافته و در نهایت باعث کاهش مقادیر برگشت فنری می‌گردد.

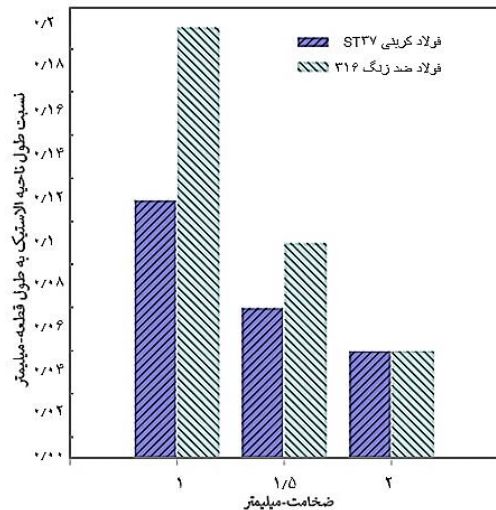
در نهایت مشخص شد که مقدار برگشت فنری در فولاد ضد زنگ ۳۱۶ تقریباً دو برابر فولاد کربنی ST۳۷ می‌باشد، لذا امکان استفاده از قالب‌های موجود فولاد کربنی ST۳۷ برای تولید قطعه مشابه با جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ نمی‌باشد و می‌بایست تمهیدات لازم برای طراحی مناسب قالب صورت پذیرد تا با قالب‌های مناسب پس از شکل دهی فولاد ضد زنگ ۳۱۶، به شکل مورد نظر با ابعاد مشخص شده دست یافت.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

#### منابع

- 1- Li X, Yang Y, Wang Y, Bao J, Li S. Effect of the material-hardening mode on the springback simulation accuracy of V-free bending. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Apr 30;123(2):209-11.
- 2- Papeleux L, Ponthot JP. Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Sep 9;125:785-91.
- 3- Shafiei Alavijeh, M., torabian, H., Amirabadi, H. Obtaining the equations to predict values of springback and side-wall curl radius of U-bending of DP600 dual-phase steel plates. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2016; 47(2): 35-44.



شکل ۱۰) مقایسه نسبت طول ناحیه الاستیک در ضخامت‌های مختلف.

با توجه به مقادیر کرنش پلاستیک استخراج شده از نتایج شبیه‌سازی، نسبت ناحیه الاستیک در مواد فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷ با ضخامت‌های مختلف در شکل ۱۰ مقایسه شده است. تحلیل نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد نسبت طول ناحیه الاستیک به طول کل ناحیه مورد بررسی در فولاد ضد زنگ آستنیتی خیلی بیشتر از فولاد کربنی ST۳۷ می‌باشد. در حالیکه با افزایش ضخامت این اختلاف بین دو فولاد کاهش می‌یابد. بطوریکه همانطور که در نمودار شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد در ضخامت ورق ۲ میلی‌متر هر دو ورق فولادی اختلاف یکسانی دارند.

به دلیل استحکام بالاتر فولاد ضد زنگ مورد آزمایش نسبت به فولاد کربنی، با افزایش ضخامت ورق‌ها کاهش کمتری در ناحیه الاستیک فولاد ضد زنگ در مقایسه با ورق فولاد کربنی ملاحظه می‌شود، که باعث برگشت فنری بیشتری در مقایسه با فولاد کربنی می‌شود. از طرف دیگر افزایش ضخامت ورق نیز در یک خم یکسان باعث کاهش برگشت فنری می‌گردد که با توجه به تغییرات کرنش در طول ضخامت و تغییرات تنش ممبران و خمشی مقدار برگشت فنری در ورق فولاد ضدزنگ بیشتر از ورق فولاد کربنی می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان برگشت فنری در دو ورق فولاد ضد زنگ ۳۱۶ و فولاد کربنی ST۳۷ خم کاری شده، در ضخامت‌های مختلف ورق ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در انتهای شکل‌دهی و پس از باربرداری در شبیه‌سازی المان محدود و تحلیل تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج برگشت فنری شبیه‌سازی با تجربی در ورق فولاد ضدزنگ ۳۱۶ خطای کمتر از ۵ درصد و در فولاد کربنی ST۳۷ خطای کمتر از ۱۳ درصد را نشان داد. همچنین



- 4- Liu G, Lin Z, Xu W, Bao Y. Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminating springback error. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Jan 15;120(1-3):259-64.
- 5- Chen P, Koc M. Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 Jul 23;190(1-3):189-98.
- 6- Cui X, Du Z, Xiao A, Yan Z, Qiu D, Yu H, Chen B. Electromagnetic partitioning forming and springback control in the fabrication of curved parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021 Feb 1;288:116889.
- 7- Geng L, Wagoner RH. Role of plastic anisotropy and its evolution on springback. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002 Jan 1;44(1):123-48.
- 8- Chongthairungruang B, Uthaisangsuk V, Suranuntchai S, Jiratharanat S. Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials & Design*. 2013 Sep 1;50:253-66.
- 9- Kim HS, Koç M. Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions. *Journal of materials processing technology*. 2008 Aug 11;204(1-3):370-83.
- 10- Asnafi N. On springback of double-curved autobody panels. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001 Jan 1;43(1):5-37.
- 11- Gau JT, Kinzel GL. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001 Jan 17;108(3):369-75.
- 12- Guo X, Xu H, Zeng Q, Pet T. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate after stamping forming. *Thin-Walled Structures*. 2021 Feb 1;159:107294.
- 13- Konzack S, Radonjic R, Liewald M, Altan T. Prediction and reduction of springback in 3D hat shape forming of AHSS. *Procedia Manufacturing*. 2018 Jan 1;15:660-7.
- 14- Li B, McClelland Z, Horstemeyer SJ, Aslam I, Wang PT, Horstemeyer MF. Time dependent springback of a magnesium alloy. *Materials & Design*. 2015 Feb 5;66:575-80.
- 15- Gupta MS, Reddy DR. Design and analysis of aircraft sheet metal for spring back effect. *Materials Today: Proceedings*. 2017 Jan 1;4(8):8287-95.
- 16- Panthi SK, Ramakrishnan N, Ahmed M, Singh SS, Goel MD. Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials & Design*. 2010 Feb 1;31(2):657-62.
- 17- Zhang D, Cui Z, Ruan X, Li Y. An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending. *Computational Materials Science*. 2007 Feb 1;38(4):707-15.
- 18- Sharad G, Nandedkar VM. Springback in sheet metal u bending-Fea and neural network approach. *Procedia materials science*. 2014 Jan 1;6:835-9.