



## بررسی پارامترهای مؤثر در برگشت فنری ورق دولایه مس - فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در فرایند شکل‌دهی افزایشی

مسعود محمودی<sup>1\*</sup>، محمد کرکه ابادی<sup>2</sup>، رمضانعلی حاجی قربانی<sup>3</sup>

1- استاد یار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

3- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

\* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، mahmoodi@semnan.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 اسفند 1397

پذیرش: 28 اردیبهشت 1398

ارائه در سایت: دی 1398

### کلیدواژگان:

شکل‌دهی تدریجی

ورق دو لایه

برگشت فنری

مس-فولاد آستنیتی

نیروی شکل‌دهی

شکل‌دهی افزایشی ورق فلزی یکی از فرایندهای فرم دهی بدون قالب می‌باشد. در این فرایند ابزار سر کروی مسیر از پیش تعیین شده را طی می‌نماید تا با اعمال فشار موضعی به ورق آن را به شکل مد نظر تبدیل نماید. یکی از معایب موجود در فرایند شکل‌دهی افزایشی، پدیده برگشت فنری ورق می‌باشد. در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر برگشت‌پذیری فنری در ورق دو لایه مس- فولاد آستنیتی حاصل از شکل‌دهی افزایشی، پرداخته شده است. پارامترهای ورودی این فرایند شامل قطر ابزار، گام عمودی، ضخامت ورق، عمق شکل‌دهی، سرعت پیشروی و ترتیب قرارگیری لایه‌های ورق دولایه می‌باشد. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرایند به کمک نرم‌افزار آباکوس و روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی به کمک نرم‌افزار مینی تب، تأثیر پارامترهای ورودی بر روی برگشت‌پذیری فنری و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی توسط آزمون تجربی اعتبار سنجی شده و مشخص شد که نتایج شبیه‌سازی المان محدود دارای همپوشانی مناسبی در مقایسه با جواب‌های نهایی بدست آمده از آزمون عملی می‌باشند. در پایان میزان تأثیر هر یک از پارامترهای نام برده شده بر روی برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و مشخص شد که پارامتر ضخامت ورق بیشترین تأثیر را هم در برگشت فنری و هم نیروی شکل‌دهی دارا می‌باشد.

## Investigating the Effective Parameters in the Spring Back of Two Layers Sheet Copper-Austenitic Stainless Steel in the Incremental Sheet Forming

Masoud Mahmoudi\*, Mohammad karkehabadi, Ramezan Ali Hajighorbani

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

\* P.O.B. 3513119111 Semnan, Iran, mahmoodi@semnan.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 10 March 2019  
Accepted 18 May 2019  
Available December 2019

### Keywords:

Incremental Forming  
Two layers sheet  
Springback  
Copper-AusteniticStainless Steel  
Forming force

### Abstract

The Incremental Sheet metal forming is one of the dieless forming processes. In this process, the ball nose tool runs the predetermined path to form the sheet by applying the local pressure on the sheet. One of the disadvantages of the incremental forming process is the springback phenomenon. In this paper, the effect of parameters on the springback in the two layear sheet Cu / Austenite St produced by the Single Point Incremental Sheet Forming has been investigated. The input parameters of this process include the tool diameter, vertical step, sheet thickness, depth of form, forward velocity, and arrangement of layers of the double layer sheet. Using the finite element simulation via Abaqus software and the Taguchi design of experiments method via Minitab software, the effect of input parameters on springback and forming force has been investigated. Also, the results of the simulation were validated by the empirical test and it was determined that the finite element has an appropriate overlap in extraction of the final results. At the end, the effect of each of the parameters mentioned on the springback and forming force was analyzed. It was determined that the thickness of the sheet had the greatest effect on both springback and forming force.

### 1- مقدمه

این فرایند برای کاربردهای گوناگون به اثبات رسیده است که به عنوان نمونه می‌توان به ساخت قطعات صنایع خودرو سازی و محصولات پزشکی، صنایع هوایی، صنایع تزئینی و دکوراسیون اشاره کرد. در فرایند شکل‌دهی افزایشی، ابزار سر کروی نصب شده بر روی ماشین کنترل عددی، ورق مهارد شده بر روی قالب را با حرکت پیوسته و فشار موضعی شکل می‌دهد. در این فرایند

شکل‌دهی افزایشی<sup>1</sup> روشی مناسب برای شکل دادن ورق‌های فلزی محسوب می‌شود و از نظر اقتصادی برای تولیدات در حجم کم و به طور ویژه برای یک نمونه بسیار مناسب می‌باشد. قابلیت

<sup>1</sup> Incremental Sheet Forming

Please cite this article using:

M. Mahmoudi, M. karkehabadi, R. A. Hajighorbani, 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, Vol. 6, No. 8, pp. 10-20, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

داد که با افزایش گام عمودی میزان شکل پذیری کاهش یافته و همچنین احتمال پارگی ورق زودتر از میزان پیش بینی شده وجود دارد [10، 11]. تحقیقات پیرامون تأثیر پارامترهای ضخامت ورق و عمق شکل دهی در فرایند شکل دهی افزایشی بیانگر این است که با افزایش ضخامت ورق و کاهش عمق، تغییرات در ضخامت دیواره کاهش یافته و بنابراین میزان شکل پذیری افزایش می یابد [12-14]. روان کار نیز به عنوان یکی از ورودی های تأثیرگذار در فرایند مورد بررسی قرار گرفته که نتایج تحقیقات نشان داده که استفاده از روان کار ضمن کاهش اصطکاک به علت ایجاد بستر مناسب جهت انتقال حرارت ایجاد شده در فرایند باعث افزایش شکل پذیری و ایجاد صافی سطح مناسب در پایان کار می گردد [15]. فرایند شکل دهی افزایشی متناسب با قالب استفاده شده به دو گروه اصلی تقسیم می شود. همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است در شکل دهی افزایشی دو نقطه ای و یا مثبت، ورق فلزی بر روی سنبه ای با شکل خاص قرار می گیرد. اگر فقط از ابزار شکل دهی روی ورق استفاده شود آن را شکل دهی افزایشی تک نقطه ای و یا منفی می نامند.

امروزه با توجه به گسترش فن آوری های نوین و میل صنعت به دستیابی به بالاترین راندمان با صرف کمترین هزینه زمانی و مالی استفاده از ورق های چند لایه و کامپوزیتی در حال گسترش می باشد [16]. از جمله کامپوزیت های موجود در صنعت می توان به ورق دو لایه مس - فولاد زنگ نزن آستنیتی اشاره کرد. از این ترکیب بیشتر در صنایع پتروشیمی استفاده می شود. از جمله کاربردهای این ورق دولایه، استفاده در شیرهای انبساطی می باشد به طوری که جنس لایه داخلی مس و جنس لایه خارجی را فولاد زنگ نزن آستنیتی در نظر می گیرند. با توجه به اینکه هدایت حرارتی فولاد آستنیتی نسبت به مس پایین تر می باشد، این نوع ترتیب قرارگیری ورق باعث نگهداری حرارت شده و به حرارت ورودی کمتری نیاز می باشد [17].

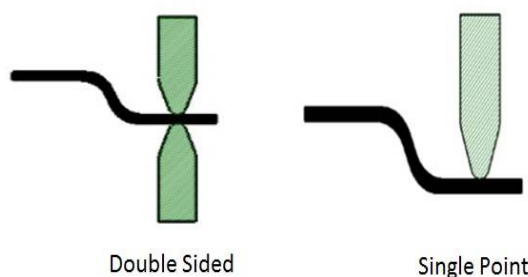


Fig. 1 Types of incremental forming processes

شکل 1 انواع فرایندهای شکل دهی افزایشی

ابزار معمولاً با سرعت ثابت دوران می کند و با سرعت پیشروی مشخص در مسیری که از پیش برای آن تعریف شده است حرکت می کند. این روش حتی قادر است اشکال پیچیده همانند صورت انسان را که دارای برجستگی ها و فرو رفتگی های خاص می باشد را بر روی ورق مورد نظر طراحی کند [1، 2].

از سال 2000 میلادی به بعد این فرایند در زمره یکی از فرایندهای نوین شکل دهی شناخته شد. در این فرایند چندین عامل نقش بیشتری در شرایط کاری ایفا می کنند که می توان از جمله آنها به جنس ورق، ضخامت ورق، سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، مسیر ابزار، گام ابزار و شعاع ابزار اشاره کرد [3]. از نمونه تحقیقات انجام گرفته بر روی تأثیر پارامترهای ورودی فرایند شکل دهی می توان به بررسی تأثیر قطر ابزار در فرایند شکل دهی اشاره کرد، نتیجه تحقیقات در این زمینه را می توان به رابطه مستقیم قطر ابزار بر نیروی شکل دهی فرایند و تأثیر معکوس آن بر صافی سطح نهایی قطعه کار اشاره کرد. با افزایش قطر ابزار نیروی شکل دهی افزایش و صافی سطح کاهش می یابد [4، 5]. در بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر شکل پذیری ورق، محققان کرنشهای اصلی  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  ورق را در شکل دهی افزایشی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی مقدار کرنشهای اصلی اعمال شده کاهش می یابند. نتیجه تحقیقات بیانگر این است که با افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش کرنشهای اصلی، شکل پذیری ورق کاهش می یابد [6، 7]. همچنین برای بررسی تأثیر سرعت دورانی ابزار بر روی شکل پذیری ورق و کیفیت سطح نهایی تحقیقات نشان داده است که با افزایش سرعت دورانی ابزار، حرکت نسبی بین ابزار و ورق افزایش یافته و لذا گرمای بوجود آمده در اثر اصطکاک افزایش می یابد. به دلیل ایجاد گرمای بیشتر و کاهش ضریب اصطکاک، نیروی لازم برای شکل دهی نیز کاهش می یابد. اما زبری متوسط به میزان کمی کاهش می یابد که قابل توجه نمی باشد [8]. تحقیق بر روی اثر زاویه شکل دهی، شعاع نوک ابزار و ضخامت اولیه ورق بر نیروی وارد بر ابزار شکل دهی منجر به استخراج معادله (1) شده است.

$$F_{Tool} = \left(\frac{\pi}{2}\right) YR^2 \left[\left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right) (1 - \cos \alpha)\right] + \left(\frac{\pi}{2}\right) YR^2 \left[\left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{\mu R}{T_0}\right) (\alpha - \tan \alpha)\right] \quad (1)$$

در معادله (1)،  $\alpha$  زاویه شکل دهی،  $Y$  تنش تسلیم ورق،  $R$  شعاع نوک ابزار،  $\mu$  ضریب اصطکاک و  $T_0$  ضخامت اولیه ورق می باشد [9].

تحقیق بر روی تأثیر گام عمودی در شکل پذیری ورق نشان

محاسبه می‌باشد:

$$\text{Spring Back (S.B)} = H_1 - H_2 \quad (2)$$

که  $H_1$  عمق اعمال شده واقعی توسط ابزار و  $H_2$  عمق اندازه‌گیری شده بعد از برداشتن ابزار می‌باشد.

پارامترهای ورودی در این تحقیق عبارتند از قطر ابزار، ضخامت ورق، سرعت پیشروی، گام عمودی، عمق کلی شکل‌دهی و نحوه چیدمان ورق دو لایه. برای بررسی تأثیر هر یک از موارد بیان شده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است تا تأثیر هر یک از پارامترها را در دو سطح پایین و بالا بروی ورق دو لایه مورد بررسی قرار گیرد. در روش تاگوچی نتایج بدست آمده از آزمایشات در چند فاز استاندارد تحلیل می‌شوند. ابتدا اثرات فاکتورها ارزیابی شده و به صورت کیفی برآورده می‌شوند. شرایط بهینه و عملکرد در حالت بهینه نیز با بررسی اثرات فاکتورها تعیین می‌گردند. در فاز بعدی، تحلیل واریانس بر روی نتایج انجام می‌شود. تحلیل واریانس اثر نسبی فاکتورها را در بخش‌های مجزا تعیین می‌کند. در جدول 1 سطح‌های مورد بررسی در روش طراحی تاگوچی مشاهده می‌شود. در جدول 1، منظور از نوع چینش، سطح فلز در تماس با ابزار می‌باشد. با توجه به تعداد پارامترهای ورودی و سطوح مورد بررسی آنها، روش طراحی تاگوچی و استفاده از آرایه اورتوگونال با هشت آزمایش پیشنهاد شده است. در جدول 2 لیست آزمایش‌های طراحی شده نشان داده شده است.

جدول 1 سطوح مورد بررسی در روش طراحی تاگوچی

Table 1 Levels examined in the Taguchi design method

| سطح 2     | سطح 1     | پارامترهای مورد بررسی |
|-----------|-----------|-----------------------|
| 0/4       | 0/2       | گام عمودی             |
| 1600      | 800       | سرعت پیشروی (mm/min)  |
| فولاد/ مس | مس/ فولاد | نوع چینش ورق          |
| 5/5       | 11        | قطر ابزار (mm)        |
| 1         | 2         | ضخامت ورق (mm)*       |
| 20        | 15        | عمق کلی (mm)          |

\* ضخامت هر لایه نصف ضخامت ورق است.

### 3-آزمون عملی

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، آزمون عملی مطابق با شرایط آزمون شبیه‌سازی، انجام گرفته است.

ادوارد و همکاران به بررسی برگشت فنری در نمونه‌های پلی کربنات حاصل از فرایند شکل‌دهی افزایش تک نقطه ای پرداخته و تأثیر پارامتر حرارت را علاوه بر پارامترهای سرعت دوران و سرعت پیشروی بر برگشت فنری بررسی کرده اند [18]. ژانگ و همکاران با بکارگیری عملیات حرارتی آنیل، میزان برگشت فنری را در نمونه‌های حاصل از شکل‌دهی مرحله ای کاهش داده‌اند [19]. هونگ با بکارگیری روش ارزیابی جبرانی و طراح آزمایش سعی در کاهش برگشت فنری نمونه‌های حاصل از شکل‌دهی افزایشی داشته است [20]. بنابراین در فرایند شکل‌دهی افزایشی به علت وجود تنش‌های ارتجاعی بعد از برداشتن فشار ابزار از روی ورق، تمایل به برگشت فنری در ورق مشاهده می‌شود.

با توجه به نیاز صنایع مختلف به تولید قطعات با دقت بالا و تolerانس‌های بسته، ضرورت بررسی و مطالعه چگونگی ایجاد قطعات با خصوصیات ذکر شده در فرایند شکل‌دهی افزایشی نیز امری اجتناب ناپذیر می‌باشد.

عوامل مهم و تأثیر گذار بر روی برگشت فنری ورق را میتوان: سرعت پیشروی، گام عمودی، قطر ابزار، ضخامت ورق، عمق کلی شکل‌دهی ورق‌ها نام برد [20]. در صورتی که نیروی کششی ایجاد شده توسط ابزار، برای ایجاد تسلیم در سر تا سر مقطع ورق کافی باشد، برگشت فنری به حداقل می‌رسد. اگر میزان برگشت فنری ورق در مراحل اولیه طراحی پیش بینی نشود ممکن است بعد از انجام فرایند باعث خارج شدن نمونه از محدوده تolerانسی خود شود. در این تحقیق در بررسی تأثیر پارامترها بر برگشت فنری، چون از ورق دو لایه استفاده شده، لذا تأثیر پارامتر چیدمان لایه‌ها هم در نظر گرفته شده است. از این رو با توجه به مهم بودن بررسی شکل پذیری و نیز برگشت پذیری ورق‌های دولایه در فرایند شکل‌دهی افزایشی و اهمیت ورق دولایه مس فولاد در صنعت، در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بروی برگشت فنری ورق دولایه مس - فولاد آستنیتی با ضخامت 2 میلی‌متر پرداخته شده است.

### 2- طراحی آزمایش

با توجه به تحقیقات انجام گرفته توسط محققان بر روی برگشت‌پذیری ورق تک لایه، بررسی پارامترهای ورودی در دو سطح بالا و پایین مورد نیاز می‌باشد. برای مشاهده تأثیر پارامترهای ورودی بر روی پدیده برگشت‌پذیری بهتر است از دو سطح با اختلاف نسبتاً زیاد (دو برابری) برای ورودی‌های فرایند استفاده شود [21]. مقدار عددی برگشت فنری از معادله (2) قابل

جدول 2 مشخصات آزمایشات طراحی تاگوچی

Table 2 Taguchi design specifications

| شماره آزمایش | گام عمودی | سرعت پیشروی | چیدمان    | قطر ابزار | ضخامت | عمق کلی |
|--------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------|---------|
| 1            | 0/2       | 800         | مس/ فولاد | 11        | 2     | 15      |
| 2            | 0/2       | 800         | مس/ فولاد | 5/5       | 1     | 20      |
| 3            | 0/2       | 1600        | فولاد/ مس | 11        | 2     | 20      |
| 4            | 0/2       | 1600        | فولاد/ مس | 5/5       | 1     | 15      |
| 5            | 0/4       | 800         | فولاد/ مس | 11        | 1     | 15      |
| 6            | 0/4       | 800         | فولاد/ مس | 5/5       | 2     | 20      |
| 7            | 0/4       | 1600        | مس/ فولاد | 11        | 1     | 20      |
| 8            | 0/4       | 1600        | مس/ فولاد | 5/5       | 2     | 15      |

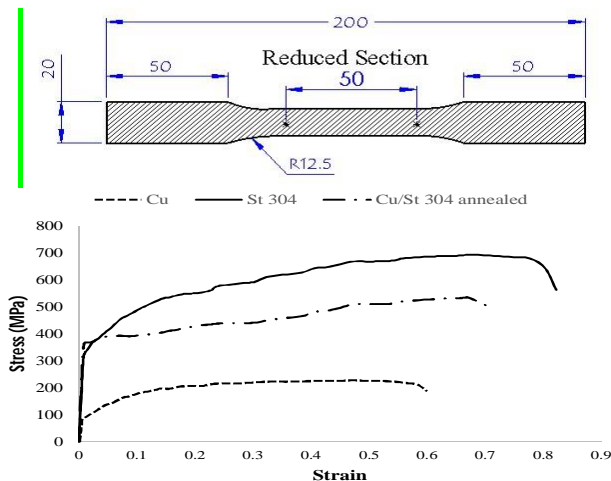


Fig. 3 Sample dimensions of tensile test and the engineering stress-strain curve of samples

شکل 3 ابعاد نمونه آزمایش تست کشش ونمودار تنش کرنش مهندسی نمونه ها

لذا برای حذف این اثر، یک نورد با کاهش بسیار جزئی در حد 0/05 میلی متر روی نمونه انجام شده و ضخامت در کل نمونه به 2 میلی متر می رسد. در نهایت برای اتصال متالورژیکی و ایجاد سطح مشترک مناسب بین دو لایه ورق و همچنین افزایش شکل پذیری ورق و کاهش تنش های پسماند، ورق به مدت 30 ساعت در دمای 300 درجه سانتی گراد تحت عملیات حرارتی قرار داده و در دمای کوره خنک کاری شده است. نحوه اتصال دو ورق فولاد/ مس حاصل از جوش کاری انفجاری در فصل مشترک به طور جامع توسط ژانگ و همکاران [22] در سال 2018 بررسی شده است. در این آزمایش نوع چیدمان ورق دولایه به گونه ای است که ورق مسی روی کار و درگیر با ابزار و ورق آستنیتی در زیر قرار دارد. ورق دو لایه مورد نظر بعد از عملیات حرارتی در داخل قالب خود که در شکل 4 نشان داده شده است قرار گرفته و توسط 16 پیچ در داخل فیکسچر خود محکم گردیده است. سطح قابل دسترسی به ورق دو لایه بعد از بسته شدن در داخل فیکسچر دایره ای به قطر 120 میلی متر می باشد. برای انجام آزمایش از ماشین کنترل عددی سه محوره استفاده شده است. همچنین برای کم کردن اصطکاک بین ورق و ابزار، از روان کار با مشخصات VG 46 از گروه HL که خاصیت ضد خوردگی و روان کاری مناسب را دارا بوده استفاده شده است. در این نوع مسیر، ابزار بعد از طی کردن مسیر دایره ای به میزان مشخص شده به داخل (گام افقی) و سپس به میزان تعیین شده (گام عمودی) به سمت پایین رفته و با اعمال فشار به ورق، مسیر دایره ای جدید را طی می کند و این پروسه تا رسیدن به انتهای مسیر تعریف شده ادامه دارد.

در این تحقیق، جنس ابزار از فولاد VCN انتخاب شده که برای افزایش استحکام و جلوگیری از سایش نوک ابزار تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و سختی آن به 60 HRC رسیده است. سپس زبری متوسط آن مطابق کار حسین و همکاران [15] به 3 میکرومتر رسانده شده است. در شکل 2 ابزار به همراه ابعاد طراحی شده نشان داده شده است. همچنین در این آزمایش از ورق دولایه مس با خلوص 99%- فولاد زنگ نزن آستنیتی (گرید 304) که توسط عملیات جوش کاری انفجاری به هم متصل شده اند استفاده شده است. ورق های مس و فولاد آنیل بصورت جداگانه ای تهیه شدند. ابعاد ورق های استفاده شده مربعی به طول ضلع 160 میلی متر بوده که ضخامت هر لایه ورق 1/03 میلی متر می باشد که در مجموع ضخامت ورق دو لایه بعد از اتصال نزدیک به 2 میلی متر می باشد. برای مشخص شدن خواص ورق ها، روی آنها آزمون کشش انجام گرفته است. نمونه های کشش طبق استاندارد ASTM E8M-04 تهیه شده اند. در شکل 3 نمایی از ابعاد نمونه جهت آزمون کشش و نتایج تنش کرنشی مس و فولاد نشان داده شده است. سپس ورق ها توسط اعمال فرایند جوش انفجاری به هم متصل شدند. نمونه جوش کاری انفجاری شده بدلیل نرخ کرنش بالای فرایند و ضخامت کم نمونه، کمی دچار غیر تختی و اعوجاج در سطح می گردد.

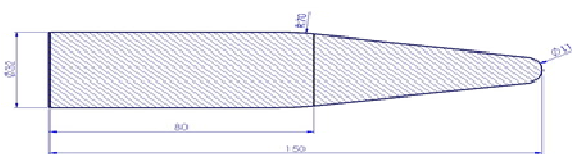


Fig. 2 An illustration of the incremental forming tool

شکل 2 مشخصات هندسی ابزار مورد استفاده در شکل دهی افزایشی

همچنین قالب به عنوان عضو صلب در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی از تحلیل صریح دینامیکی استفاده شده است. ابعاد ورق‌های مدل شده مربعی به طول ضلع 160 میلی‌متر بوده و با توجه به انجام آزمایش اول قطر ابزار 11 میلی‌متر طراحی شده است.

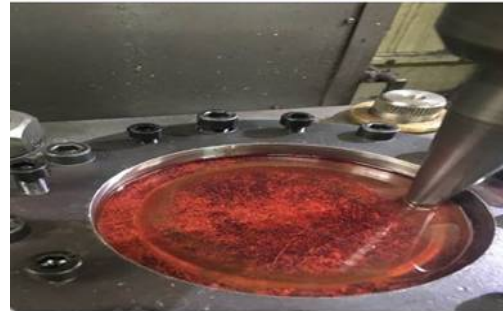
با توجه به عدم دخالت اندازه و طول ساق ابزار در تحلیل، فقط قسمت کروی آن شبیه‌سازی شده است. همچنین برای قالب نیز تنها قسمت درگیر با ورق دولایه مدل سازی شده است. در فرایند تحلیل، ورق‌ها به صورت المان پوسته و ضخامت هر لایه ورق 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است (مطابق با آزمایش تجربی). خواص مکانیکی ورق‌های استفاده شده مطابق با نتایج تنش کرنش حقیقی حاصل از نتایج نمودار شکل 3 به نرم‌افزار المان محدود معرفی گردیده است. با توجه به مسیر حرکت ابزار و نیز عدم تقارن در شکل‌دهی، شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام می‌پذیرد. جهت تعریف شرایط اتصال دو ورق از قید Tie برای شناسایی خواص تماسی استفاده شده است. همچنین در این تحقیق از الگوریتم تماس عمومی برای شبیه‌سازی رفتار تماس بین ورق و ابزار استفاده شده است. در این الگوریتم با توجه به نوع تماس بین ابزار و ورق روش پنالتی در نظر گرفته شده و برای تعریف شرایط اصطکاکی بین ورق و ابزار در اینجا اصطکاک کولمبی تعریف شده است. همچنین ضریب اصطکاک به میزان 0/06 برای ورق مس و به میزان 0/05 برای ورق فولاد در نظر گرفته شده است [21].

برای انتخاب المان مناسب برای شبیه‌سازی فرایند باید المانی انتخاب شود که بتواند تغییر شکل‌های زیاد را در این فرایند نشان دهد و تحلیل‌های صورت گرفته از دقت قابل قبولی برخوردار باشد. هیرت در سال 2005 تحقیقی را در رابطه با انتخاب المان مناسب در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی با هندسه شبیه به این کار بر روی ورق St14 با ضخامت 1/5 میلی‌متر انجام داد [23].

با توجه به تحقیق هیرت و بررسی روی نمونه دولایه، مشاهده شد المان پوسته S4R زمان کمتری برای پردازش نیاز دارد و همچنین در مقایسه با سایر المان‌ها هندسه نمونه مورد بررسی را دقیقتر ارائه می‌نماید. برای انتخاب تعداد المان لازم برای شبیه‌سازی با توجه به اینکه افزایش این تعداد زمان لازم برای شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد و با توجه به اینکه این افزایش خطی نیست لازم است تا با در نظر گرفتن خطای قابل قبولی در همگرایی جواب‌ها، این تعداد المان انتخاب شود. خطای همگرایی از رابطه (3) بدست می‌آید.



الف



ب



ج

Fig. 4 A view of the die and the clamped sheet on the CNC machine: a) before b) during c) after the process

شکل 4 نمایی از قالب و ورق بسته شده بروی دستگاه الف - قبل از انجام فرایند ب - در حین فرایند ج - تکمیل فرایند و تشکیل ظرف

گام عمودی مطابق با جدول 2 به میزان 0/2 میلی‌متر در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه زاویه شکل‌دهی 45 درجه می‌باشد گام افقی نیز برابر با گام عمودی می‌باشد. سرعت پیشروی ابزار نیز برابر با 800 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. شکل نهایی ورق بعد از فرایند شکل‌دهی مخروط ناقصی به قطر بالای 100 میلی‌متر و قطر پایین 70 میلی‌متر و به عمق 15 میلی‌متر می‌باشد. برای جلوگیری از سایش ورق و همچنین بهبود کیفیت سطح، قبل از شروع فرایند از روغن تا ضخامت 1 سانتی‌متر استفاده شده است تا همواره فیلمی از روغن در حین فرایند حضور داشته باشد.

#### 4- شبیه‌سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در این تحلیل ورق دولایه مس - فولاد آستنیتی به عنوان عضو انعطاف پذیر و ابزار سر کروی و

$$\text{Convergence Error} = \frac{\text{Result}_n - \text{Result}_{n-1}}{\text{Result}_n} \quad (3)$$

شبیه‌سازی برای آزمایش اول انجام شده و میزان همگرایی جواب‌ها با افزایش المان‌ها بدست آمد. با توجه به دقت حل مسئله و نیز زمان لازم برای انجام شبیه‌سازی‌ها مدل S4R برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شده است. نمودار حساسیت برگشت پذیری فنری نسبت به سایز مش مطابق با شکل 6 رسم شده است.

بعد از مقایسه المان‌ها جهت همگرایی، المان انتخابی برای ورق دو لایه (هرلایه) از نوع S4R با اندازه 2 میلی‌متر برای هر ورق و با توجه به صلب بودن ابزار و قالب نگه دارنده ورق از المان R3D4 با اندازه 0/35 برای ابزار و با اندازه 3 برای قالب نگهدارنده ورق استفاده شده است. حرکت ابزار در این مقاله با استفاده از زیر برنامه VDISP به نرم‌افزار المان محدود معرفی گردیده است. در این تحلیل از اثر ناهمسانگردی ورق صرف نظر شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی مواد و رفتار کارسختی آنها از تست کشش استفاده شده است و نتایج بدست آمده در جدول 3 و شکل 3 نشان داده شده است.

جدول 3 خواص مکانیکی ورق مس و فولاد آستنیتی

Table 3 Mechanical properties for Cu and St 304 Steel

| جنس   | استحکام نهایی (MPa) | تنش تسلیم (MPa) | مدول الاستیسیته (G Pa) | چگالی (Kg/m3) | ضریب پواسون |
|-------|---------------------|-----------------|------------------------|---------------|-------------|
| مس    | 227                 | 76              | 117                    | 8960          | 0/24        |
| فولاد | 694                 | 290             | 193                    | 7800          | 0/27        |

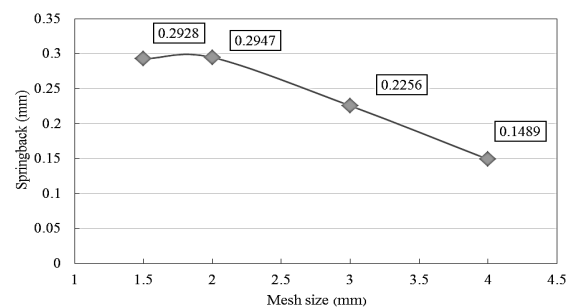


Fig. 6 Mesh sensitivity diagram based on the springback.

شکل 6 دیاگرام حساسیت مش با خروجی برگشت پذیری فنری

میزان برگشت فنری و تغییر در زاویه دیواره محاسبه شده است. جهت تعریف حرکت ابزار، ابتدا شکل نهایی ظرف توسط نرم‌افزار سالیدورک طراحی شده و مسیر حرکت ابزار بر مبنای آن به کمک نرم‌افزار پاورمیل مشخص می‌گردد. لذا هر گونه تغییر در نمونه تجربی، نسبت به هندسه طراحی شده اولیه که حرکت ابزار نیز بر مبنای آن صورت گرفته به عنوان برگشت فنری در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری میزان برگشت فنری ورق در آزمون عملی در ابتدا با قرار دادن ساعت اندازه‌گیری در چندین موقعیت و اندازه‌گیری نقاط و رسم نمودار پروفیل آنها و مقایسه با نمودار واقعی مسیر که توسط نرم‌افزار رسم شده است بیشترین میزان اختلاف مطابق رابطه (2) اندازه‌گیری شده و به عنوان میزان برگشت فنری ورق ثبت می‌شود. شرح کار بدین صورت است که برای اندازه‌گیری ابعاد نمونه، با انتخاب لبه داخلی قالب به عنوان مینا، ساعت اندازه‌گیری را بر روی نمونه به صورت شعاعی در فواصل مشخص که با کولیس اندازه دقیق آن مشخص شده است حرکت داده و اندازه خوانده شده در نرم‌افزار اکسل وارد شده و در انتها با مشخص شدن دیتاهای مورد نظر نمودار مربوطه رسم می‌گردد. سپس دیتاهای متناظر که از مدل طراحی شده بدون برگشت فنری بدست آمده با نمودار تجربی حاصل از ساعت اندازه‌گیری مقایسه می‌گردد.

همچنین برای اندازه‌گیری میزان برگشت فنری در نرم‌افزار المان محدود با اتصال نودها در نرم‌افزار به یکدیگر و رسم گراف دو بعدی قبل و بعد از برداشت ابزار میزان برگشت فنری طبق رابطه (2) اندازه‌گیری شده است. در شکل 7 نمایی از ورق دولایه بعد از آزمون عملی و فرایند شبیه‌سازی نشان داده شده است. با توجه به اطلاعات بدست آمده، بیشترین میزان برگشت فنری مربوط به کف ورق دو لایه و به میزان 0/29 میلی‌متر می‌باشد. در جدول 4 مقایسه نتایج برگشت فنری حاصل از آزمون عملی و شبیه‌سازی نشان داده شده است.

خطای محاسبه شده ناشی از این است که در نرم‌افزار شرایطی مثل همسانگرد بودن و هموزن بودن ماده در نظر گرفته شده و اصطکاک در تمام نقاط یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین رفتار ماده نزدیک به رفتار حقیقی آن تعریف شده است. از طرفی می‌توان بخشی از این مقدار را مربوط به نحوه اندازه‌گیری تجربی برگشت فنری دانست.

همچنین جهت اعتبار سنجی و مقایسه بین آزمون عملی و شبیه‌سازی میزان تغییرات ضخامت ورق دولایه بعد از آزمون عملی با استفاده از دستگاه ضخامت سنج التراسونیک با دقت 0/01 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

## 5- نتایج و بحث

بعد از انجام آزمون عملی، با استفاده از ساعت اندازه‌گیری، نمودار دو بعدی ورق بعد از برداشتن ابزار رسم شده و با نمودار دو بعدی که از نرم‌افزار طراحی بدست آمده مقایسه گردیده و

علت این امر افزایش تنش و در نتیجه کرنش کششی در عمق‌های بیشتر حین شکل‌دهی می‌باشد. بعد از انجام تمامی آزمایشات طراحی شده توسط طرح تاگوچی با نرم‌افزار المان محدود میزان برگشت فنری برای هشت آزمایش طراحی شده در جدول 5 نشان داده شده است.

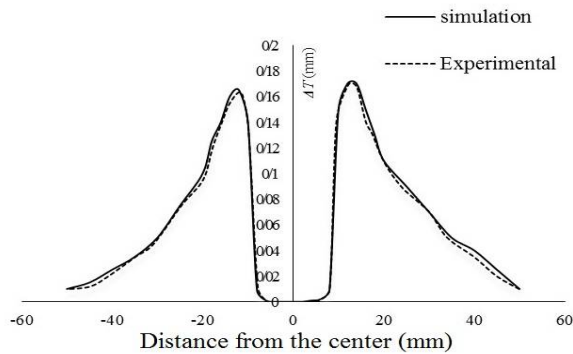


Fig. 8 Comparison of the Thickness variation in two layers sheet

شکل 8 مقایسه میزان تغییرات ضخامت ورق دولایه

جدول 5 نتایج برگشت فنری هشت آزمایش طراحی شده

Table 5 Spring back results of eight trials

| آزمایش           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| برگشت پذیری (mm) | 0/29 | 0/26 | 0/31 | 0/36 | 0/53 | 0/26 | 0/31 | 0/27 |

پس از انجام کامل شبیه‌سازی برای تمامی آزمایش‌ها نیروی وارد شده به ابزار در جهت Y مورد بررسی قرار داده شده و نتایج مورد نیاز استخراج شده است. بنابر این نمودار نیرو به روش شبیه‌سازی به دست آمده است. به نحوی که مقدار نیرو در راستای عمودی که بر نقطه مرجع ابزار صلب وارد شده به ازای افزایش عمق شکل‌دهی استخراج شده است.

در شکل 9 نمودار نیروهای وارده به ابزار در جهت Y برای آزمایش اول نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل وجود تماس دایم ابزار با ورق و همچنین اصطکاک ما بین ابزار و ورق، ارتعاش زیادی در نمودار دیده می‌شود. نمودار با استفاده از نرم‌افزار متلب فیلتر شده است.

با توجه به تعیین خروجی‌های مورد نظر در نرم‌افزار المان محدود، میزان بیشترین نیروی وارده بر ابزار مطابق با جدول 6 برای تمامی آزمایش‌های طراحی شده استخراج گردیده است.

برای بدست آوردن تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی میزان برگشت پذیری و نیروی وارد بر ابزار از روابط (4) تا (6) حاکم در روش طراحی تاگوچی استفاده شده است. رابطه (4) بیانگر نسبت سیگنال به نویز و رابطه (5) تم بزرگتر بهتر و رابطه

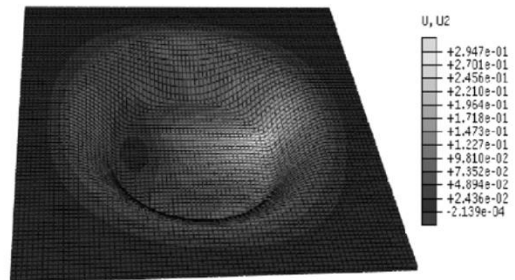
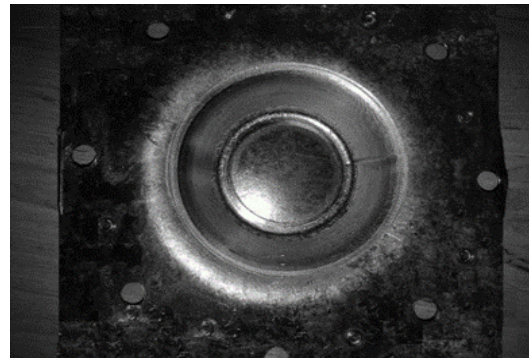


Fig. 7 View of the double layer sheet after practical and simulation (U2: displacement after springback (mm))

شکل 7 نمای از ورق دولایه بعد از انجام آزمون عملی و شبیه‌سازی (U2) میزان جابجایی بعد از برگشت فنری بر حسب میلی‌متر)

جدول 4 مقایسه میزان برگشت پذیری آزمون عملی و شبیه‌سازی

Table 4 Comparison of practical and simulation springback values

| درصد خطا | نرم‌افزار المان محدود | آزمون تجربی | برگشت‌پذیری کف (mm) |
|----------|-----------------------|-------------|---------------------|
| 17%      | 0/29                  | 0/35        |                     |

اندازه‌گیری ضخامت به صورت شعاعی با شروع از مرکز کف ظرف با فواصل پنج میلی‌متری به سمت کنارین انجام شده است. محور پروب تماسی ضخامت سنج همواره بر سطح بررسی عمود بوده است.

سپس برای بررسی تغییرات ضخامت، تفاوت ضخامت اولیه و ضخامت اندازه‌گیری شده محاسبه شده است. در شکل 8 نمودار مقایسه تغییرات ضخامت ورق در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. با توجه به تحلیل انجام شده و استخراج نتایج و با مقایسه با نتایج بدست آمده توسط آزمایش تجربی مشاهده می‌شود که نرم‌افزار المان محدود دارای همپوشانی خوبی نسبت به ارائه جواب‌های نهایی بوده و اختلاف موجود در نتایج ناشی از ایده آل فرض کردن تمامی شرایط در نرم‌افزار المان محدود می‌باشد. طبق شکل 8، در کف ظرف ضخامت ثابت است اما با فاصله از مرکز کف ظرف، کاهش شدید ضخامتی در دیواره ی مجاور کف ظرف به میزان 0/17 میلی‌متر دیده می‌شود. این بخش نازکترین قسمت ظرف تشکیل شده است.

(6) تم کوچکتر بهتر را نشان می‌دهد.

$$S/N = -10 \times \log(\text{MSD}) \quad (4)$$

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum \frac{y_i^2}{n} \quad (5)$$

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum \frac{y_i^2}{n} \quad (6)$$

در روابط فوق، عبارت MSD بیانگر میانگین مربع انحرافات است و همچنین  $n$  شماره‌ی آزمایش و  $y$  بیشترین مقدار برگشت‌پذیری اندازه‌گیری شده (و بیشترین نیرو شکل‌دهی) در هر آزمایش است. انتخاب قید (بزرگ‌تر بهتر یا کوچک‌تر بهتر) در رابطه‌ی فوق بستگی به شاخص خروجی دارد. برای تحلیل عیب برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی از تم کوچکتر بهتر، استفاده شده است. دلیل این امر این است که هرچه میزان برگشت فنری در ورق کمتر باشد، نمونه تولید شده به قطعه طراحی شده نزدیکتر بوده و از کیفیت بالاتری برخوردار خواهد بود و هرچه نیروی شکل‌دهی کمتر باشد فشار بر دستگاه کمتر بوده و نیروی کمتری برای شکل‌دهی ورق لازم می‌باشد.

نمودار سطح به نوبت برای پارامترهای ورودی در برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی مطابق با تم کمتر بهتر مطابق با شکل 10 نشان داده شده است. با کمک شکل 10، برای برگشت فنری می‌توان این‌گونه بیان کرد که بیشترین تأثیر مربوط به ضخامت ورق دولایه می‌باشد، به گونه‌ای که با افزایش ضخامت ورق دولایه میزان برگشت‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که توزیع تنش در راستای ضخامت بیشتر به نحوی است که سهم بیشتری از ضخامت تحت تنش پلاستیک نسبت به تنش الاستیک قرار گرفته و با افزایش نسبت ناحیه پلاستیک نسبت به الاستیک باعث کاهش میزان برگشت فنری می‌شود.

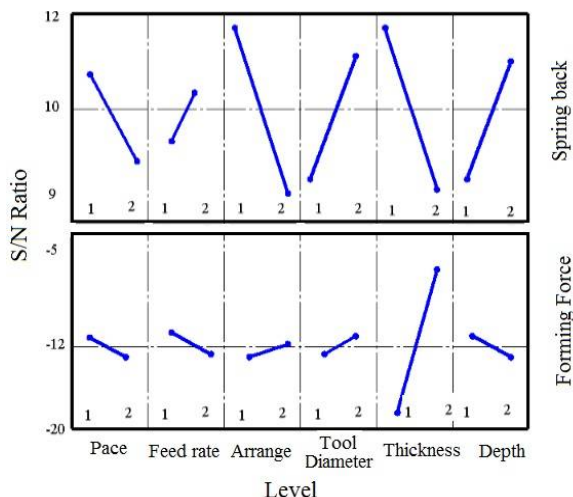


Fig. 10 S/N Diagram for springback and Forming Force

شکل 10 نمودار سطح به نوبت برای برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی

قابل ذکر است با افزایش ضخامت ورق نازک شدگی ورق دیواره کاهش یافته و باعث کاهش پدیده برگشت‌پذیری فنری می‌شود. در مرتبه دوم نوع چینش ورق دولایه قرار دارد به گونه‌ای که چینش مس - فولاد آستنیتی نسبت به چینش فولاد آستنیتی - مس دارای برگشت‌پذیری کمتری می‌باشد یکی از مهم‌ترین دلایل این امر خواص مکانیکی ورق مس می‌باشد که با توجه به نرم تر بودن آن دارای ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به فولاد آستنیتی می‌باشد، این پدیده باعث افزایش درجه حرارت در قسمت شکل‌دهی می‌شود و با توجه به اینکه رسانش گرمایی مس از فولاد بالاتر می‌باشد این گرما به لایه زیرین ورق مس یعنی ورق فولاد 304 منتقل شده و باعث نرم تر شدن و افزایش شکل‌پذیری ورق دولایه می‌گردد.

در مرتبه سوم میزان عمق کلی شکل‌دهی مطرح می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش عمق کلی شکل‌دهی میزان برگشت‌پذیری نیز کمتر می‌شود دلیل این امر نیز افزایش تنش در عمق‌های بیشتر می‌باشد [6]. در رتبه چهارم می‌توان به قطر ابزار اشاره کرد به طوری که با کاهش قطر ابزار میزان برگشت‌پذیری فنری نیز کاهش می‌یابد زیرا با کاهش قطر ابزار فشار بر روی آن بیشتر شده و باعث افزایش تنش در زیر ابزار می‌گردد [4، 5] که این امر باعث کمتر شدن برگشت‌پذیری فنری می‌شود، در مرتبه پنجم

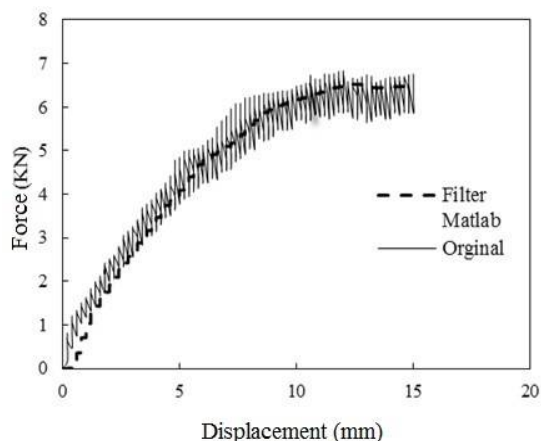


Fig. 9 The forming force curve for the first test

شکل 9 نمودار نیروی شکل‌دهی آزمایش اول

جدول 6 ماکزیمم نیروی وارد بر ابزار برای تمامی آزمایش‌های طراحی شده

Table 6 The maximum force is applied to the tool for all design of experiments

| آزمایش            | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| ماکزیمم نیرو (kN) | 6/8 | 2/1 | 7/6 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 2/6 | 7 |



دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت تنش‌های محیطی افزایش یافته و ابزار به حالت براده برداری عمل می‌کند که این امر باعث فشار به ابزار و افزایش نیروی شکل‌دهی و پایین آمدن کیفیت سطح نهایی کار می‌شود [6، 7]. چهارمین عامل تأثیرگذار قطر ابزار شکل‌دهی می‌باشد بطوری که با افزایش قطر ابزار میزان نیروی وارده به ابزار به علت افزایش سطح تماس ابزار با ورق افزایش می‌یابد. پنجمین عامل تأثیرگذار مقدار گام عمودی می‌باشد بطوری که با افزایش گام عمودی نیروی وارد به ابزار به علت افزایش تغییر شکل پلاستیک در سطح زیر ابزار افزایش می‌یابد [11].

در انتها می‌توان به نوع چینش ورق اشاره کرد بطوری که چینش فولاد- مس نیروی بیشتری به ابزار وارد می‌کند تا چینش مس-فولاد، یکی از مهم‌ترین دلایل این امر ضریب هدایت حرارتی پایین تر فولاد نسبت به مس می‌باشد به گونه‌ای که اگر ورق مسی در زیر ابزار قرار داشته باشد حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک بیشتر مس با ابزار با توجه به بالا بودن ضریب انتقال حرارت ورق مس، به فولاد آستنیتی منتقل شده و باعث نرم تر شدن ورق و شکل پذیری بهتر آن می‌شود. این امر باعث کاهش فشار و نیروی وارده به ابزار می‌گردد. همچنین می‌توان گفت با وجود اصطکاک بیشتر بین ابزار و لایه مس گرمای بیشتری نیز تولید خواهد شد. در صورتی که از ورق آستنیتی در زیر ابزار استفاده شود به علت پایین تر بودن ضریب انتقال حرارت فولاد آستنیتی نسبت به مس حرارت ایجاد شده به خوبی بین لایه‌های ورق انتقال نیافته و باعث افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شود. از دیگر دلایل به تأثیر شرایط کارسختی متفاوت مس و فولاد با توجه به میزان کرنش اعمال شده می‌توان اشاره کرد. هنرپیشه و همکاران ادعا کرده اند که تغییر فرم بیشتر در لایه سطحی ورق دولایه رخ داده و تغییر فرم لایه تحتانی متأثر از لایه سطحی بوده است [24]. با استفاده از فرمول‌های زیر درصد تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی را بر روی میزان برگشت پذیری و نیروی شکل‌دهی را بدست آورد. برای بدست آوردن درصد تأثیر پارامترهای ورودی در ابتدا میانگین نسبت S/N از معادله (7) بدست می‌آید.

$$\overline{S/N} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (S/N)_i \quad (7)$$

برای بدست آوردن فاکتور تصحیح C.F از معادله (8) استفاده شده که در آن N تعداد آزمایشات و T مجموع نتایج بدست آمده است.

$$C.F = \frac{T^2}{N} \quad (8)$$

می‌توان به گام عمودی اشاره کرد تأثیر گام عمودی به این گونه می‌باشد که با کاهش گام عمودی میزان برگشت‌پذیری نیز کاهش می‌یابد دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که با کاهش گام عمودی منطقه کمتری تحت تنش پلاستیک قرار می‌گیرند و همچنین نازک شدگی ورق دیواره کاهش می‌یابد که باعث کمتر شدن برگشت‌پذیری فنی ورق می‌شود [18]. در انتها می‌توان به سرعت پیشروی اشاره کرد که با افزایش سرعت پیشروی میزان برگشت‌پذیری کاهش می‌یابد دلیل این امر را می‌توان افزایش تنش‌های محیطی و نصف النهاری و همچنین ایجاد اصطکاک بیشتر در اثر سرعت بالاتر پیشروی بیان نمود.

طبق شکل 11 برای نیروی وارد بر ابزار، تأثیر عامل ضخامت ورق، از دیگر پارامترها بیشتر می‌باشد بطوری که با افزایش ضخامت، میزان نیروی شکل‌دهی ورق به علت افزایش مقادیر تنش افزایش یافته که این امر باعث نازک شدگی بیش از حد و ترک ناگهانی در سطح ورق می‌شود [6].

دومین عامل تأثیرگذار بر روی نیروی شکل‌دهی ورق، عمق شکل‌دهی می‌باشد به طوری که با افزایش عمق شکل‌دهی میزان نیروی وارده به ابزار نیز افزایش می‌یابد، قابل ذکر است در اثر افزایش عمق شکل‌دهی میزان نازک شدگی دیواره افزایش یافته که این امر باعث بروز پارگی در ورق می‌شود [10].

سومین پارامتر تأثیرگذار سرعت پیشروی ابزار می‌باشد به طوری که با افزایش سرعت پیشروی مقدار نیروی وارد به ابزار نیز افزایش می‌یابد.

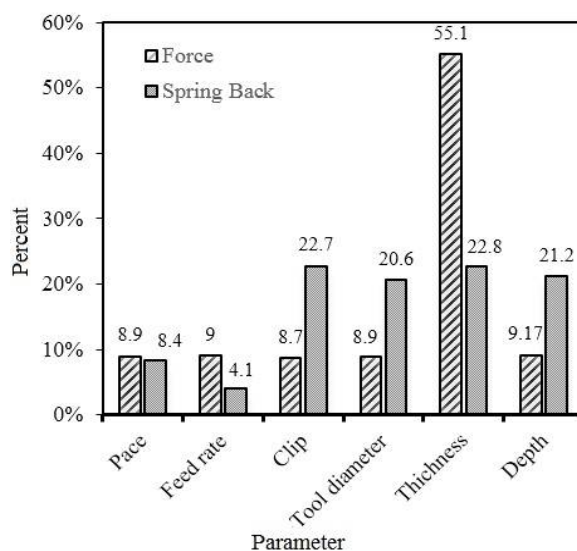


Fig. 11 Percentage of influence of input parameters on the spring back and forming force of tool.

شکل 11 درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر برگشت فنی و نیروی شکل‌دهی ابزار

شکل‌دهی، با ترکیب مناسبی از متغیرهای فرایند شکل‌دهی افزایشی و چیدمان آنها در آزمایش‌های طراحی شده، خروجی قابل اعتمادی برای انجام آزمایش‌ها فراهم ساخته است.

### 7- مراجع

- [1] B. Lu, D. K. Xu, R. Z. Liu, H. Ou, H. Long, J. Chen, Cranial reconstruction using double side incremental forming, *Key Engineering Materials*, Vol. 639, pp. 535-542, 2015 .
- [2] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, L. Mazzoni, Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization, *Journal of materials processing technology*, Vol. 197, No. 1-3, pp. 59-67, 2008.
- [3] W. Emmens, G. Sebastiani, A. H. van den Boogaard, The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 8, pp. 981-997, 2010.
- [4] Y. Kim, J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002 .
- [5] M. Silva, P. Martins, Two-point incremental forming with partial die: theory and experimentation, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 4, pp. 1018-1027, 2013 .
- [6] A. Petek, K. Kuzman, J. Kopac, Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming, *Archives of Materials science and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 35-42, 2009 .
- [7] R. Varthini, R. Ghandhinathan, C. Pandivelan, A. K. Jeevanantham, Modelling And Optimization Of Process Parameters of the Single Point Incremental Forming of Aluminium 5052 Alloy Sheet Using Genetic Algorithm-Back Propagation Neural Network, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, Vol. 2, No. 5, 2014 .
- [8] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. M. C. Minutolo, The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4621-4626, 2009 .
- [9] S. M. S. A. Saberi, M. Kadkhodaei, F. Rabiei, Two point incremental forming analysis using slab analysis whit experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 61-69, 2013. (in Persian).
- [10] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114, 2005 .
- [11] P. Suriyapran, Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050, Thesis, Universidade do Porto (Portugal), 2013.

همچنین برای بدست آوردن مجموع مربعات کل از رابطه (9) استفاده می‌شود.

$$ST = \sum_{i=1}^8 (Y_i^2) - C_F \quad (9)$$

مجموع مربعات هر فاکتور به صورت جداگانه مطابق با رابطه (10) محاسبه می‌گردد. همچنین در نهایت برای بدست آوردن درصد تأثیر هر پارامتر از رابطه (11) استفاده می‌شود.

$$SS = \sum_{i=1}^6 ((S/N)_i - \overline{S/N})^2 \quad (10)$$

$$\%Contribution = \frac{SS_i}{S_T} \times 100 \quad (11)$$

در نهایت با استفاده از روابط (7) تا (11) درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر برگشت پذیری فنری و نیروی شکل‌دهی بدست می‌آید.

همان‌طور که در شکل 11 مشخص شده است، بیشترین تأثیر هم برای برگشت پذیری فنری و هم برای نیروی شکل‌دهی مربوط به ضخامت ورق می‌باشد.

### 6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برگشت فنری ورق دولایه مس - فولاد آستنیتی حاصل از فرایند شکل‌دهی افزایشی مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این هدف تحلیل المان محدود فرایند انجام شده و توسط آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی شدند. در ادامه به کمک روش طراحی تاگوچی به بررسی تأثیر پارامترها بر روی برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی پرداخته و نتایج زیر استخراج شده است:

- پارامتر ضخامت ورق دو لایه بیشترین تأثیر را بر روی میزان برگشت فنری و نیروی شکل‌دهی دارد؛ به طوری که با افزایش ضخامت ورق دولایه میزان برگشت فنری کاهش و میزان نیرو افزایش می‌یابد.
- سرعت پیشروی کمترین تأثیر را بر روی برگشت فنری داشته است. همچنین با افزایش سرعت پیشروی میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد.
- چیدمان ورق دولایه کمترین تأثیر را بر نیروی شکل‌دهی دارد و در چیدمان مس- فولاد نیروی شکل‌دهی کاهش می‌یابد.
- نتایج شبیه‌سازی المان محدود و آزمون عملی در مورد ضخامت و میزان برگشت فنری نشان از انطباق بسیار خوب بین آنها دارد.
- روش طراحی آزمایش تاگوچی برای بدست آوردن تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر روی میزان برگشت فنری و نیروی

- [19] Z. Zhang, H. Zhang, Y. Shi, N. Moser, H. Ren, K. F. Ehmann, J. Cao, Springback reduction by annealing for incremental sheet forming, *Procedia Manufacturing*, Vol. 5, pp. 696-706, 2016.
- [20] H. Wei, W. Chen, L. Gao, Springback Investigation on sheet metal incremental formed parts, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 285-289, 2011.
- [21] G. Ngaile, S. Jaeger, T. Altan, Lubrication in tube hydroforming (THF): Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 108-115, 2004.
- [22] H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, J. Liu, Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding, *Materials & Design*, Vol 154, pp. 140-152, 2018.
- [23] M. Bambach, G. Hirt, Performance assessment of element formulations and constitutive laws for the simulation of incremental sheet forming (ISF), In 8th International Conference on Computational Plasticity COMPLAS, Barcelona September 5-7, 2005.
- [24] M. R. Sakhemanian, M. Honarpisheh, S. Amini, Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental forming process of explosive-welded low-carbon steel/CP-titanium bimetal sheet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1462-z>.
- [12] M. Ham, J. Jeswiet, Forming limit curves in single point incremental forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 277-280, 2007.
- [13] F. A. Lora, L. Schaeffer, Incremental forming process strategy variation analysis through applied strains, *Brazilian Journal of Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 5, 2014.
- [14] J. Min, B. Kuhlenkötter, C. Shu, D. Störkle, L. Thyssen, Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 605-612, 2018.
- [15] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, Z. Cui, Y. Pang, N. Dar, Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp. 193-201, 2008.
- [16] A. Zahedi, B. Mollaei, M.R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 1-8, 2014. (in Persian. فارسی)
- [17] A. Vestergaard, H. T. Denning, Valve, in particular expansion valve for refrigeration systems, and a method for the manufacture thereof, Google Patents, 1998.
- [18] W. L. Edwards, T. J. Grimm, I. Ragai, J. T. Roth, Optimum Process Parameters for Springback Reduction of Single Point Incrementally Formed Polycarbonate, *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, pp. 329-338, 2017.