



ارائه یک رویکرد جدید بر کاهش زاویه برگشت فنری ورق‌های مسی آنیل شده

هادی ابراهیمی^۱، محمدمراد شیخی^{۲*}، محمد مقداد فلاح^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.Sheikhi@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۹ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

نیروی پیش فرم

مدل المان محدود

برگشت فنری

ناهمسانگردی

تاگوچی

چکیده

صنایع مختلف به‌طور گسترده‌ای از فرایندهای شکل‌دهی جهت تولید قطعات استفاده می‌کنند. پدیده برگشت فنری یک مسئله مهم در ارتباط با فرایندهای شکل‌دهی است که تاثیر مستقیمی بر دقت ابعادی و هندسی قطعه نهایی دارد. در تحقیق حاضر از نیروی پیش فرم به‌عنوان یک رویکرد جدید جهت کنترل و کاهش زاویه برگشت فنری استفاده شده است. جهت بهینه‌سازی پارامترهای ورودی از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده گردید. در این طراحی نیروی پیش فرم، دمای آنیلینگ، ناهمسانگردی و شعاع سنبه پیش فرم به‌عنوان متغیرهای ورودی و زاویه برگشت فنری به‌عنوان شاخص کیفیت در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های طراحی شده به کمک مدل المان محدود و آزمایشات تجربی اجرا شده و زاویه برگشت فنری برای هر آزمایش استخراج گردید. با بررسی نتایج، مشخص گردید که نیروی پیش فرم و دمای آنیلینگ بیشترین تاثیر را بر کاهش زاویه برگشت فنری دارند. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد با انتخاب سطوح بهینه پارامترهای فرایندی، زاویه برگشت فنری کاهش چشمگیری می‌یابد.

Presenting a new approach to reduce the spring-back angle of annealed copper sheets

Hadi Ebrahimi¹, Mohammadmorad Sheikhi^{2*}, Mohammad Meghdad Fallah³

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m.Sheikhi@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 10 December 2023

Accepted: 22 June 2024

Keywords:

Preform Force

Finite Element Model

Spring-back

Anisotropic

Taguchi

Abstract

Various industries widely use forming processes to produce parts. The phenomenon of spring-back is an important issue related to forming process, which has a direct effect on the dimensional and geometric accuracy of the final part. In the present study, the preform force is used as a new approach to control and reduce the spring-back angle. To optimize the input parameters, the Taguchi test design method was used. In this design, preform force, annealing temperature, anisotropic and preform punch radius were considered as input variables and spring-back angle as quality index. The designed tests were carried out with the help of finite element model and experimental tests, and the spring-back angle was extracted for each test. By examining the results, it was found that the preform force and annealing temperature have the greatest effect on reducing the spring-back angle. The results of the experimental tests show that by choosing the optimal levels of the process parameters, the angle of the spring-back decreases significantly.

Please cite this article using:

Ebrahimi H, Sheikhi M, Meghdad Fallah M. Presenting a new approach to reduce the spring-back angle of annealed copper sheets. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 May 21;11(3):38-50. doi: 10.22034/IJME.2024.429401.1886 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سالیان اخیر، تقاضا برای استفاده از ورق‌های مسی به دلیل خاصیت استحکام، هدایت الکتریکی و گرمایی بسیار بالا و همچنین شکل‌پذیری^۱ عالی در صنایع مختلف نظیر صنعت الکترونیک، هوافضا و شبکه برق هوشمند به شدت گسترش یافته است. ورق‌های مسی، یکی از مناسب‌ترین مواد در ساخت اتصال‌دهنده‌های راکتورهای آزمایشی حرارتی هسته‌ای محسوب می‌شوند که با توجه به هندسه این نوع از اتصال‌دهنده‌ها معمولاً به روش فرایند خمکاری^۲ تولید می‌شوند [۱]. بر طبق DIN8586، فرایند خمکاری به‌عنوان یک فرایند تغییر شکل خمشی محسوب می‌شود که در آن یک ورق فلزی در امتداد یک محور مستقیم شکل‌دهی می‌شود. این فرایند بر اساس شکل نهایی قطعه به سه گروه خمکاری U، V و L طبقه‌بندی می‌شود؛ اما از مهم‌ترین مزیت‌های این فرایند نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی ورق می‌توان به امکان تولید خم‌های متوالی با زوایای دلخواه، هزینه پایین ساخت مجموعه قالب خمکاری، کاهش زمان تولید و در نهایت به کنترل آسان و سریع پارامترهای فرایندی در حین فرایند شکل‌دهی اشاره نمود [۲]؛ اما در تولید این قطعات رعایت تلورانس‌های ابعادی و هندسی مطابق با استانداردهای حوزه هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از عیوب تأثیرگذار بر دقت ابعادی و هندسی این قطعات، برگشت فنری^۳ است. این پدیده بیان‌گر تغییر شکل پلاستیک ورق پس از باربرداری و رها شدن ورق از نیروی پرس است [۳]. بر اساس برخی از کتاب‌های مرجع شکل‌دهی ورق شامل مارسینیاک، دانکن و هو [۴]، کورت لانگ [۵] و ASM [۶] پارامترهای تأثیرگذار بر پدیده برگشت فنری عبارت است از جریان تنش^۴، مدول الاستیک^۵، شعاع خم^۶، زاویه خم^۷ و ضخامت ورق؛ اما بر اساس مطالعات انجام شده مشخص گردید که علاوه بر پارامترهای ذکر شده، پارامترهایی نظیر هندسه قالب، سایز دانه^۸، سرعت بارگذاری، نرخ کرنش^۹، دما و جریان الکتریکی نیز بر پدیده برگشت فنری تأثیرگذار است. بنابراین مطالعه دقیق رابطه بین این پارامترها و پدیده برگشت فنری و دستیابی به ترکیب پارامترهای بهینه در این فرایند از اهمیت بالایی برخوردار است. در چند سال اخیر، در زمینه پدیده برگشت فنری، تحقیقات زیادی انجام شده است به طوری که تأثیر برخی از پارامترهای ذکر شده به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. ناندرکار و همکاران [۷] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر زاویه سنبه، طول دهانه قالب، نرخ شعاع قالب به ضخامت ورق و شعاع سنبه را بر رفتار برگشت فنری بررسی نمودند. در نهایت نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه سنبه مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در برگشت فنری است. لیو و همکاران [۸] تأثیر ضخامت و سایز دانه بر رفتار برگشت فنری فویل‌های برنجی در یک قالب V شکل با زائده‌ای به شعاع ۰٫۴ میلی‌متر را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت فویل برنجی، سایز دانه و نسبت ضخامت ورق به سایز دانه تأثیر چشمگیری بر استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول در آزمایش کشش داشته است به طوری که با کاهش نرخ ضخامت ورق به سایز دانه استحکام تسلیم کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نرخ ضخامت ورق به سایز دانه و افزایش ضخامت، زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [۹] تأثیر سایز دانه، ضخامت ورق و شعاع سنبه را بر رفتار برگشت فنری ورقه‌هایی از جنس مس در یک قالب به فرم U را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج ثابت کرد با کاهش ضخامت ورق به ازای مقادیر مختلف شعاع سنبه، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه دانه، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد و در نتیجه سبب کاهش دقت ابعادی قطعه نهایی می‌شود. لیو و همکاران [۱۰] تأثیر سایز بر روی رفتار برگشت فنری فویل‌های از جنس مس را در یک قالب خمکاری میکرو مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش سایز دانه و کاهش ضخامت فویل مسی، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. چانگ و همکاران [۱۱] تأثیر سایز دانه و شعاع سنبه را در فرایند خمکاری میکرو در یک قالب با شکل دهانه V مطالعه کردند. نتایج نشان داد با افزایش نسبت شعاع سنبه به ضخامت ورق، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. همچنین زاویه برگشت فنری با کاهش سایز دانه، کاهش می‌یابد. شیوا و همکاران [۱۲] اثرات عبور جریان الکتریکی بر رفتار خمکاری ورق‌های از جنس آلیاژ Ti-6Al4V را مورد پژوهش قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که با عبور جریان از ناحیه تغییر شکل در مقایسه با کل قطعه، نیروی خمکاری و برگشت

¹ Ductility

² Bending

³ Spring-Back

⁴ Flow Stress

⁵ Elastic Module

⁶ Bending Radii

⁷ Bend Angle

⁸ Grain Size

⁹ Strain Rate

فنری کاهش می‌یابد. همچنین با عبور جریان الکتریکی در انتهای فرایند خمکاری و هم‌زمان با مرحله باربرداری، پدیده برگشت فنری به شدت کاهش می‌یابد. ژاوو و همکاران [۱۳] با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تأثیر ضخامت فویل، ناهمسانگردی^۱، سایز دانه و ارتعاش سنبه بر رفتار برگشت فنری را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات ضخامت فویل و ارتعاش سنبه بیشترین تأثیر را در کاهش زاویه برگشت فنری دارد. محمودا و همکاران [۱۴] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر سرعت بارگذاری و زمان توقف سنبه در مرحله بارگذاری را بر پدیده برگشت فنری یک فویل مسی به ضخامت ۰٫۱ میلی‌متر را مطالعه نمودند. نتایج عددی و تجربی حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری و زمان توقف سنبه، زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد. لیو و همکاران در تحقیقی دیگر [۱۵] تأثیر اندازه بر رفتار برگشت فنری فویل‌های فلزی در خمش میکرو را به روش تحلیلی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها یک مدل ساختاری بر اساس مدل لایه سطحی^۲ جهت تجزیه و تحلیل پدیده برگشت فنری ارائه دادند. در این مدل برای هر بخش داخلی، هر دانه به‌عنوان یک کامپوزیت در نظر گرفته شد که شامل بخش داخلی دانه و لایه مرزی سخت شده دانه بود؛ سپس از یک مدل کامپوزیت کلاسیک برای محاسبه تنش جریان استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش ضخامت فویل یا افزایش اندازه دانه، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۶] رفتار برگشت فنری فویل‌های ترکیبی نیکل و مس را در یک قالب انعطاف‌پذیر به روش خمکاری میکرو بررسی نمودند. آن‌ها آزمایش‌های تجربی را برای سه زاویه مختلف سنبه و تحت دمای مختلف آنیلینگ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه برگشت فنری با افزایش زاویه خم و دمای آنیلینگ افزایش می‌یابد. ابراهیمی و همکاران [۱۷] تأثیر هندسه قالب، سایز دانه، نسبت ضخامت ورق به سایز دانه بر رفتار برگشت فنری ورق‌های مسی آئیل شده را بررسی نمودند. آن‌ها از یک قالب جدید با هندسه W در طول فرایند خمکاری استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین زاویه برگشت فنری برای سایز دانه $33 \mu\text{m}$ و کمترین زاویه برگشت فنری مربوط به سایز دانه $133 \mu\text{m}$ است. همچنین با کاهش نسبت ضخامت ورق به سایز دانه، زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند با فرض ثابت بودن پارامترهای فرایندی، با افزایش سایز قالب رفتار برگشت فنری به‌صورت زاویه منفی نمایان می‌شود.

با مطالعه پیشینه تحقیق می‌توان دریافت در اکثر تحقیقات، تنها تأثیر پارامترهای ابزار و ماده بر پدیده برگشت فنری بررسی شده است. همچنین در مبحث بهینه‌سازی پارامترها، تاکنون تحقیقی جامع و کامل که دربرگیرنده تمام عوامل مؤثر بر پدیده برگشت فنری باشد انجام نگردیده است. در این پژوهش، به‌عنوان یک نوآوری در مبحث کنترل زاویه برگشت فنری، سعی شده است از یک نیروی فشاری به‌عنوان نیروی پیش فرم قبل از فرایند خمکاری استفاده شود. جهت مطالعه تأثیر هم‌زمان پارامترهای فرایندی نظیر نیروی پیش فرم، دمای آنیلینگ، شعاع سنبه پیش فرم و ناهمسانگردی از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شده است.

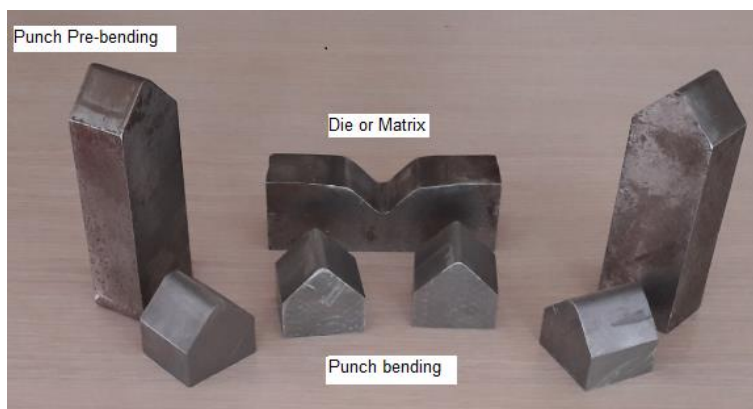
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت مجموعه قالب خمکاری

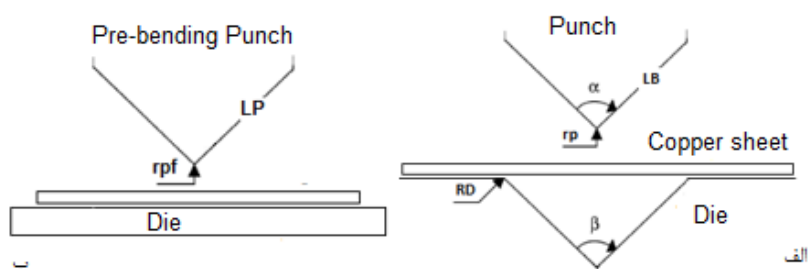
مجموعه قالب خمکاری ساخته شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. این مجموعه شامل یک ماتریس با فرم دهانه V و سنبه‌های خمکاری و پیش فرم می‌باشد که از فولاد CK45 ساخته شده است؛ زیرا این فولاد هنگام آبکاری تغییر فرم نمی‌دهد و دارای سختی بین 41-48 راکول C می‌باشد. همچنین جزئیات اجزای قالب خمکاری و سنبه پیش فرم در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ طول ساق سنبه $L_B = L_p = 25 \text{ mm}$ و زاویه دهانه سنبه و ماتریس $\beta = \alpha = 90^\circ$ در نظر گرفته شد. همچنین بر اساس نتایج ابراهیمی و همکاران [۱۷] بهترین محدوده شعاع سنبه و ماتریس برای ورق‌های مسی آنیلینگ شده در بازه دمای 500-900 درجه سانتی‌گراد $R_p = R_D = 0.6t$ است. لازم به ذکر است لقی مجاز بین سنبه و ماتریس خمکاری برابر $C=1.2t$ انتخاب شده است [۱۸]. در شکل ۲-ب، پارامتر r_{pf} بیان‌کننده شعاع سنبه پیش فرم می‌باشد؛ محدوده این پارامتر در پژوهش حاضر 0.8-1.6t در نظر گرفته شده است.

¹ Texture

² Surface Layer



شکل ۱ تصویر اجزای قالب خمکاری



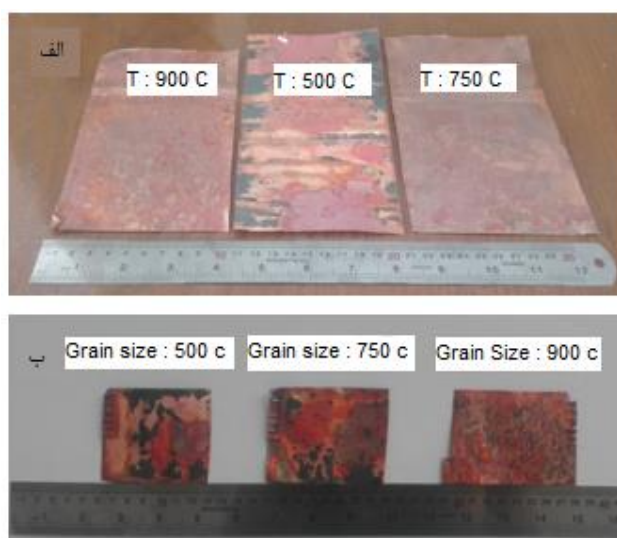
شکل ۲ نمای شماتیک الف) قالب خمکاری ب) قالب پیش فرم

۲-۲- سیکل عملیات حرارتی

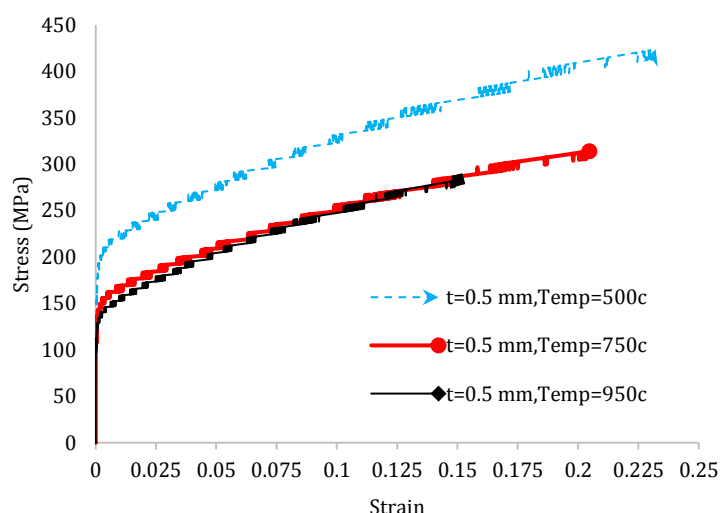
در این تحقیق از ورق مس بانام تجاری C12200 به ضخامت ۰٫۵ میلی‌متر استفاده شده است. اولین مرحله جهت آماده‌سازی ورق اولیه، انجام عملیات حرارتی از نوع آنیلینگ است. در این مرحله از یک کوره الکتریکی با دقت دمایی ± 2 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. مطابق شکل ۳-الف، نمونه‌ها در سه دمای ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به مدت ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. پس از عملیات آنیلینگ، تعیین اندازه دانه مطابق با استاندارد ASTM E3-17 انجام گرفت (شکل ۳-ب). لازم به ذکر است آماده‌سازی متالوگرافی توسط دستگاه Struers و تصاویر موردنیاز از سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپی نوری مطابق با استاندارد ASTM-E883 انجام شد. در گام بعد جهت تعیین خواص مکانیکی، آزمایش کشش تک‌محوره مطابق با استاندارد ASTM-E8 بر روی نمونه‌های آنیل شده در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد انجام شد. مقادیر ناهمسانگردی نیز طبق استاندارد ASTM-E517 [۱۹] محاسبه شد و نهایتاً مقدار ناهمسانگردی در هر جهت بدست آمد. شکل ۴ منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش تک‌محوری در جهت نورد ورق را نشان می‌دهد. همچنین خواص مکانیکی و ضرایب ناهمسانگردی ورق مس آنیل شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی و ناهمسانگردی ورق مسی آنیل شده

	دمای آنیلینگ (°C)	مدول الاستیک (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام تسلیم نهایی (MPa)	ضرایب ناهمسانگردی
r_0	500	119.3	155.6	410.2	0.88
	750		129.3	305.4	0.82
	900		118.7	275.8	0.825
r_{45}	500	115.1	150.1	381	1.38
	750		127	357.4	1.42
	900		115.6	339	1.47
r_{90}	500	122.4	159.2	398.6	0.76
	750		133.7	363	0.62
	900		126.5	357.8	0.6



شکل ۳ آماده‌سازی نمونه‌ها الف) آئیلینگ ب) سایز دانه



شکل ۴ منحنی تنش- کرنش حقیقی به‌دست‌آمده از آزمون کشش (راستای نورد)

۲-۳- شبیه‌سازی فرایند

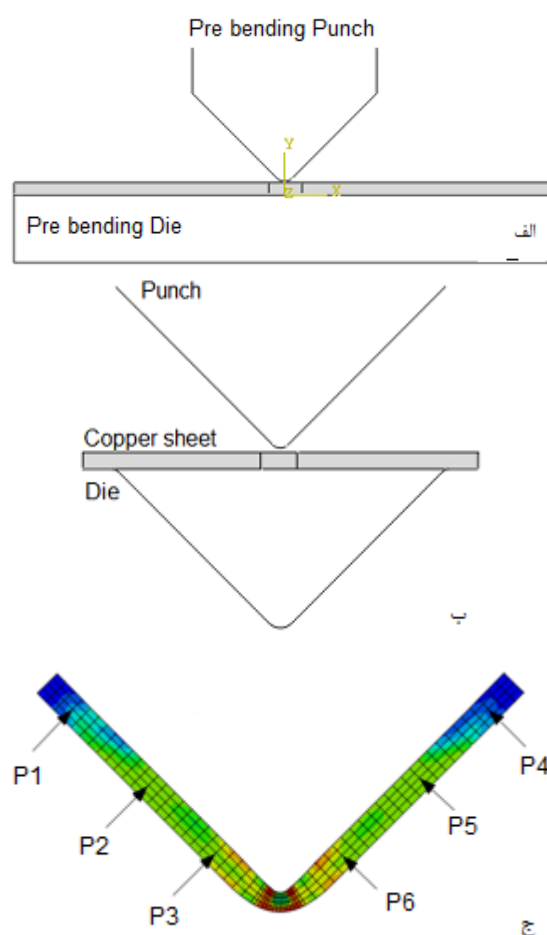
از آن‌جا که انجام تست‌های تجربی و آزمایشگاهی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است، استفاده از روش المان محدود می‌تواند روشی مناسب و مقرون و به‌صرفه باشد. اما نکته بسیار مهم در به‌کارگیری روش المان محدود، نزدیک بودن مراحل شبیه‌سازی به فرایند فیزیکی مسئله است [۲۱]. در پژوهش حاضر، جهت بررسی و مطالعه تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای پاسخ از نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس استفاده شده است. در گام اول شبیه‌سازی، سنبه پیش‌فرم یک نیروی فشاری کنترل‌شده به محل خمکاری اعمال می‌کند. تنش‌های ایجاد شده به‌عنوان یک میدان تنش در قالب یک بارگذاری اولیه^۱، در مرحله فرایند خمکاری در نظر گرفته شده و سپس به‌منظور محاسبه زاویه برگشت فنری، مرحله باربرداری نیز مدل‌سازی شده است. مطابق شکل ۵ الف و ب، سنبه و ماتریس خمکاری و پیش‌فرم به‌صورت صلب^۲ و ورق به‌صورت شکل‌پذیر^۳ به نرم‌افزار معرفی و ورق اولیه با استفاده از المان CPS4R مدل‌سازی شد. این نوع مش یک المان دوبعدی چهار گره‌ای با انتگرال کاهش یافته است. برای تعریف خواص مکانیکی در نرم‌افزار آباکوس از داده‌های جدول

¹ Predefined

² Rigid

³ Deformable

۱ استفاده شد؛ همچنین جهت بررسی اثر ناهمسانگردی در مرحله شبیه‌سازی از معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل 48 [۲۰] استفاده شد به طوری که برای محاسبه ضرایب این معیار از مقادیر جدول ۱ استفاده گردید. تحلیل مسئله در مرحله خمکاری با استفاده از حلگر صریح دینامیکی^۱ انجام شده است. جهت تعیین زاویه برگشت فنری، نتایج تغییر شکل در مدل آباکوس استاندارد وارد و شبیه‌سازی بازگشت فنری انجام شد [۲۱]. برای تعیین زاویه برگشت فنری، مطابق شکل ۵-ج موقعیت ۶ نقطه در مرحله باربرداری مشخص شد سپس با انتقال مختصات هر نقطه به بخش ترسیمی نرم‌افزار زاویه برگشت فنری بدست آمد. شرایط مرزی ماتریس به صورت کاملاً مقید، جابه‌جایی سنبه پیش فرم و سنبه خمکاری به صورت یک جابجایی در راستای محور Y در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تعریف شده است [۲۱]. یکی از نکات مهم در تحلیل اجزا محدود، آنالیز حساسیت مش است. برای این مهم اندازه مش اطراف منطقه‌ای که بیشترین تغییر شکل را دارد، در نظر گرفته شد و تغییرات تنش و ن مایسز به دست آمده از تحلیل، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس از دو سایز مش جهت شبکه‌بندی ورق استفاده شده است. برای ناحیه مرکزی و حساس ورق سایز مش برابر با ۰,۱۱ میلی‌متر و برای سایر قسمت‌ها سایز مش ۰,۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۲۳].



شکل ۵ مدل المان محدود الف) قالب پیش فرم ب) قالب خمکاری ج) موقعیت گره‌ها جهت محاسبه زاویه برگشت فنری

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

بدون شک یکی از بهترین روش‌های مدل‌سازی و تحلیل اثرات پارامترها در هر مدلی، استفاده از داده‌های تجربی است. از سوی دیگر، انجام صحیح آزمایش‌ها و اخذ نتایج دقیق و واقعی، گامی بلند در تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مدل مورد مطالعه است. گاهی اوقات برای تحلیل مدل‌های پیچیده و چند متغیره، تفسیر تمام ویژگی‌ها توسط انجام آزمایش‌هایی با کلیه حالت‌های ممکن، به زمان زیادی نیاز

¹ Dynamic Explicit

دارد. در چنین مواقعی روش طراحی آزمایش‌ها جهت انتخاب بهترین داده‌ها اهمیت می‌یابد. روش طراحی آزمایش تاگوشی را می‌توان یک روش مناسب جهت تحلیل سیستم‌های چند متغیره دانست؛ زیرا با استفاده از این روش انجام آزمایش‌ها ساده‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه می‌شود. در این مقاله، شعاع سنبه پیش فرم، ناهمسانگردی، نیروی پیش فرم و دمای آنیلینگ در مرحله خمکاری به‌عنوان متغیرهای ورودی و زاویه برگشت فنری به عنوان تابع پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است هرکدام از متغیرهای ورودی، در سه سطح مطابق جدول ۲ تعریف شده‌اند. با توجه به تعداد متغیرها و سطوح آن‌ها از یک آرایه‌ی متعامد L9 در نرم‌افزار مینی‌تب برای طراحی و تحلیل آزمایش‌ها استفاده شده است (جدول ۳) [۲۴].

جدول ۲ محدوده پارامترهای ورودی

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	نماد	واحد	پارامترهای ورودی
2.5	2	1.5	FP	KN	نیروی پیش فرم
90	45	0	r	deg	ناهمسانگردی
0.8	0.6	0.4	r _{pf}	mm	شعاع سنبه پیش فرم
900	750	500	T	°C	دمای آنیلینگ

جدول ۳ ترتیب آزمایش‌های مورد نیاز مطابق با آرایه استاندارد L9

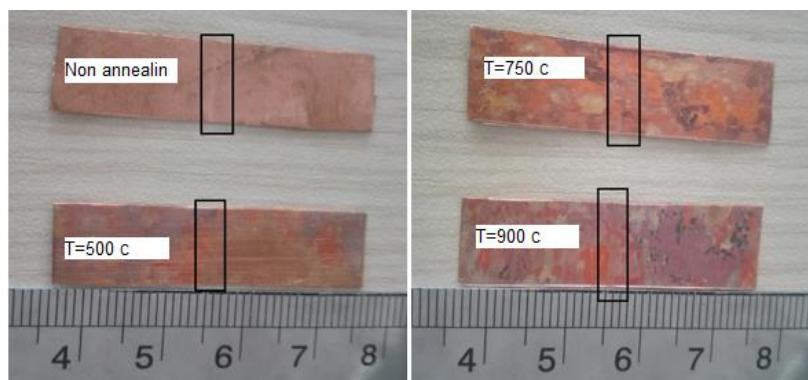
شماره آزمایش	نیروی پیش فرم (KN)	ناهمسانگردی (deg)	شعاع سنبه پیش فرم (mm)	دمای آنیلینگ (C)
1	1.5	0	0.4	500
2	1.5	45	0.6	750
3	1.5	90	0.8	900
4	2	0	0.6	900
5	2	45	0.8	500
6	2	90	0.4	750
7	2.5	0	0.8	750
8	2.5	45	0.4	900
9	2.5	90	0.6	500

۳- تست تجربی جهت صحه‌گذاری شبیه‌سازی

به‌منظور صحه‌گذاری بر نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود، آزمایش‌های تجربی مطابق با شرایط جدول طراحی آزمایش‌ها انجام شد. همچنین به منظور دقت و صحت در نتایج، سه نمونه بصورت تکرار تحت آزمایش خمکاری قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌های تجربی از یک دستگاه کشش یونیورسال گوتک^۱ ساخت کشور تایوان با ظرفیت ۵۰ تن، دقت 0.1 μm و سرعت ثابت ۰،۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شده است. برای انجام فرایند پیش فرم، ابتدا مجموعه قالب پیش فرم بین فک‌های دستگاه کشش تنظیم و بسته شد؛ سپس نمونه‌های مسی برش داده شده به‌وسیله دستگاه برش لیزر به ابعاد 40×10 میلی‌متر و به ضخامت ۰،۵ میلی‌متر بروی ماتریس پیش فرم جانمایی و فرایند پیش شکل‌دهی انجام شد (شکل ۶). در این مرحله برای اندازه‌گیری ضخامت ناحیه شکل‌دهی شده از یک ضخامت سنج ساعتی مدل ACCUD با دقت ۰،۰۱ میلی‌متر استفاده شد. در مرحله بعد، بر روی نمونه‌های پیش فرم شده عملیات شکل‌دهی انجام گردید. نتایج چنان و همکاران [۲۵] نشان داد در صورت عدم کنترل صحیح جابه‌جایی پانچ در مرحله آزمایش‌های تجربی، سنبه به داخل قطعه نفوذ پیدا کرده و اندازه‌گیری دقیق زاویه برگشت فنری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای این مهم در پژوهش حاضر، مقدار جابه‌جایی پانچ به‌وسیله کامپیوتر متصل به دستگاه و سیستم سروو درایو کنترل شده است. در پایان فرایند خمکاری، زاویه برگشت فنری به کمک زاویه‌سنج^۲ اندازه‌گیری شده است.

¹ Gotech

² Protractor



شکل ۶ اعمال نیروی پیش خمکاری بر روی نمونه‌ها

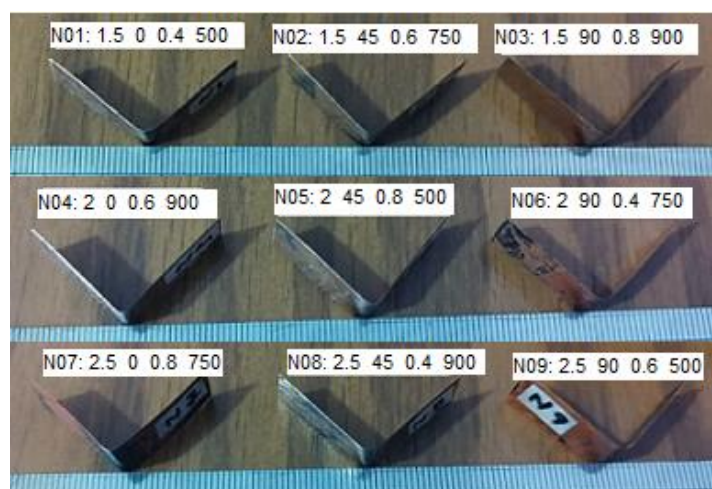
۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تاثیر پارامترها بر پدیده برگشت فنری

شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش‌های تجربی مطابق جدول ۳ انجام شد. مقادیر زاویه برگشت فنری حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در جدول ۴ و شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس جدول ۴ میانگین درصد خطا بین نتایج المان محدود و آزمایش‌های تجربی حدود ۸٫۸ درصد می‌باشد که این مهم صحت مدل المان محدود را نشان می‌دهد. انحراف مشاهده شده ناشی از این است که در نرم‌افزار المان محدود آباکوس رفتار ماده به صورت رابطه بین سایز دانه و تنش جریان تعریف شده است و از اثر هندسه دانه در معادله حساسیت^۱ ماده صرف نظر شده است [۹].

جدول ۴ نتایج زاویه برگشت فنری

شماره آزمایش	نتایج المان محدود (درجه)	آزمایش‌های تجربی (درجه)	درصد خطا %
1	3.46	3.8	8
2	2.7	3.05	10
3	3	3.4	9
4	1.32	1.45	8.5
5	2.45	2.8	9
6	2.7	2.95	8
7	1.45	1.6	8.5
8	1.08	1.2	10
9	2.26	2.45	8



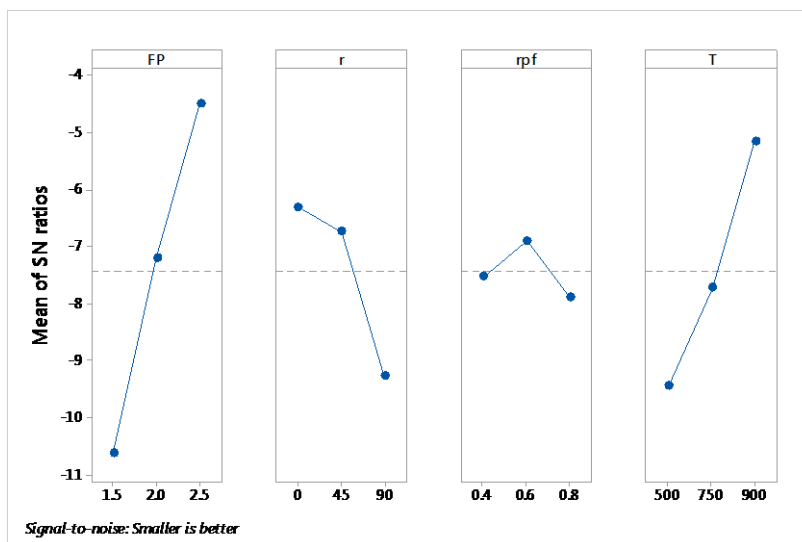
شکل ۷ نتایج آزمایشات تجربی براساس جدول ۴

¹ Sensitivity Equation

با توجه به اینکه در این پژوهش هدف کمینه نمودن زاویه برگشت فنری بوده لذا بر اساس تابع زیان تاگوچی، از رابطه ۱ جهت بررسی اثر پارامترهای ورودی بر پارامتر پاسخ استفاده شده است. در این معادله y_i بیانگر مقدار پاسخ و n نشان‌دهنده تعداد تکرارها است [۲۵].

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right) \quad (1)$$

بنابراین نسبت سیگنال به نویز هر سطح از پارامترهای ورودی، با وارد کردن نتایج جدول ۳ در نرم‌افزار مینیتی تب و انجام آنالیز S/N بدست آمد. نمودار سطح به نویز برای پارامترهای ورودی در برگشت فنری مطابق شکل ۸ نشان داده شده است.

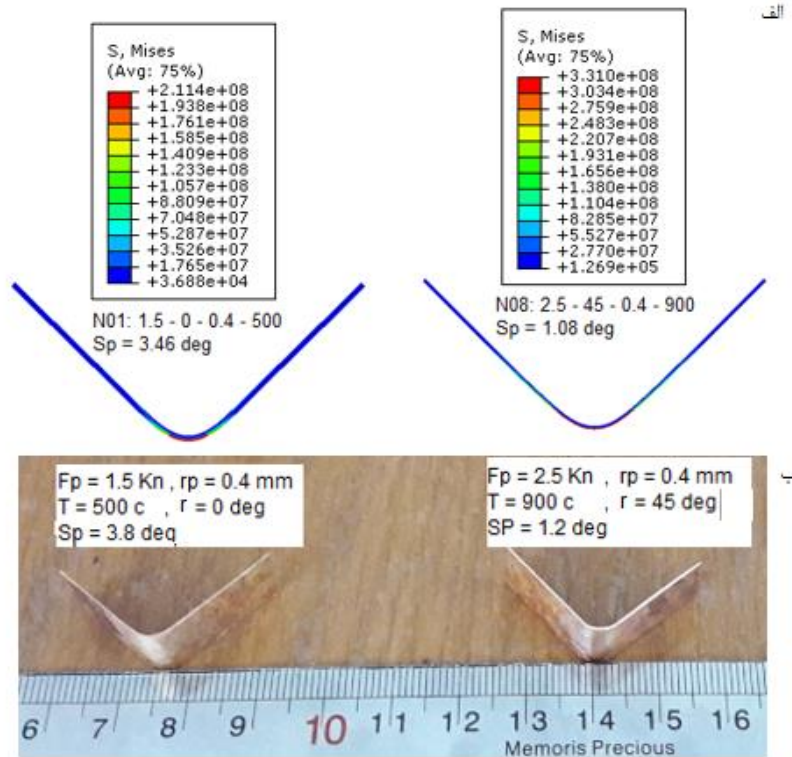


شکل ۸ نمودار سطح به نویز برای زاویه برگشت‌پذیری

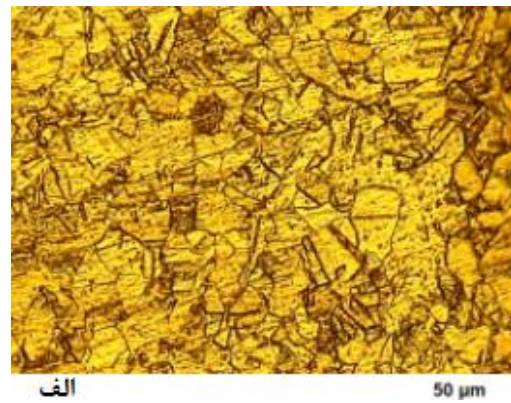
با توجه به شکل ۸، نیروی پیش فرم بیش‌ترین تاثیر را بر روی پدیده برگشت فنری دارد به طوری که با افزایش نیروی پیش فرم از ۱،۵ تا ۲،۵ کیلو نیوتن زاویه برگشت فنری از ۳،۴۱ درجه به ۱،۷۵ درجه کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش نیروی پیش فرم، ضخامت ورق کاهش می‌یابد و سبب افزایش نسبت ناحیه پلاستیک به الاستیک در منطقه شکل‌دهی می‌شود (شکل ۹). بر اساس شکل ۹ و نتایج شبیه‌سازی المان محدود، نیروی پیش فرم رابطه مستقیمی با ضخامت اولیه ورق دارد؛ یعنی با افزایش نیروی پیش فرم $F_p > 2.5 \text{KN}$ ضخامت منطقه تغییر شکل حدود ۶۳ درصد کاهش می‌یابد و فرم هندسی قطعه نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین مشاهده شد با کاهش نیروی پیش فرم $F_p < 1.5 \text{KN}$ ، فشردگی ضخامت منطقه تغییر شکل کاهش می‌یابد و پارامتر نیروی پیش فرم تاثیر چندانی بر کنترل و کاهش زاویه برگشت فنری ندارد. بر این اساس محدوده مناسب کاهش ضخامت ورق بین ۰.۳-۰.۵t است.

دمای آنیلینگ به عنوان دومین پارامتر مؤثر بر کاهش زاویه برگشت فنری معرفی شده است. با توجه به نتایج جدول ۴، با افزایش دمای آنیلینگ از ۵۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه دانه از ۳۳ به ۱۶۱ میکرومتر افزایش پیدا کرده و زاویه برگشت فنری کاهش یافته است که این مهم با نتایج مرجع [۱۷] کاملاً مطابقت دارد. از سوی دیگر، بر اساس اثر حال-پیچ رابطه معکوسی بین اندازه دانه و تنش تسلیم وجود دارد یعنی با افزایش دمای آنیلینگ اندازه دانه افزایش و تنش تسلیم کاهش (شکل ۴) می‌یابد و این مهم سبب کاهش زاویه برگشت فنری می‌شود [۲۶]. شکل ۱۰ ریزساختار مس C12200 را نشان می‌دهد.

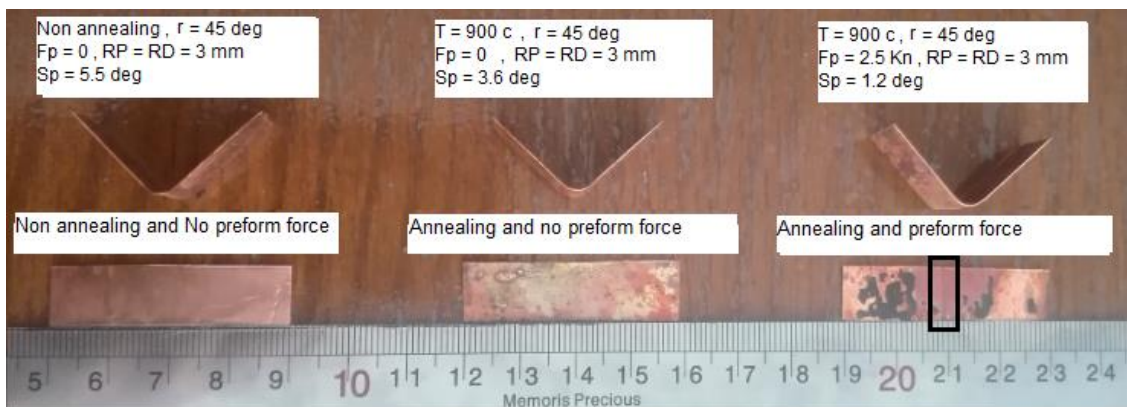
به منظور تأیید نتایج حاصل از این بخش و بررسی تاثیر دمای آنیلینگ و نیروی پیش فرم بر زاویه برگشت فنری یک مقایسه تجربی انجام شد. نتایج نشان داد زاویه برگشت فنری نمونه‌های آئیل شده نسبت به نمونه‌های بدون سیکل آنیلینگ حدود ۱،۹ درجه کمتر می‌باشد. همچنین با اعمال نیروی پیش فرم به نمونه‌های آنیلینگ شده زاویه برگشت فنری حدود ۲،۴ درجه کاهش می‌یابد (شکل ۱۱).



شکل ۹ الف) نتایج مدل المان محدود ب) تجربی

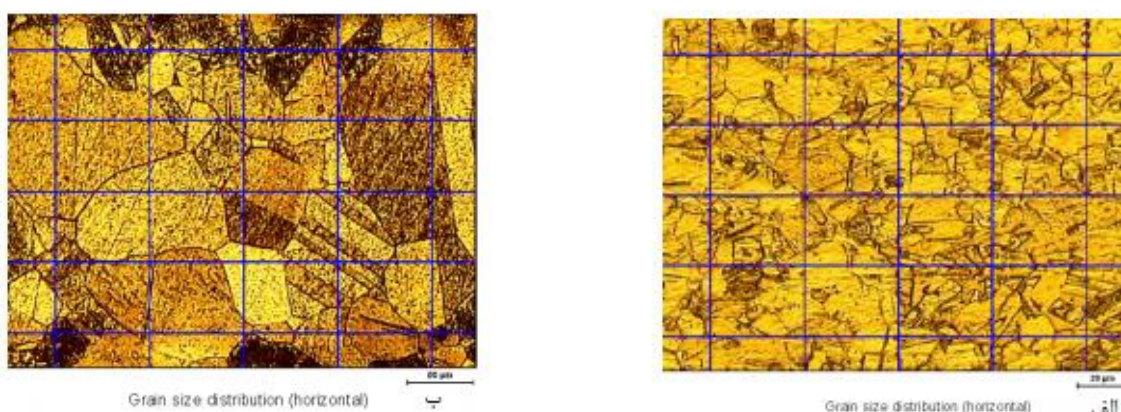


شکل ۱۰ ریزساختار مس C12200 الف) زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ب) زمان ۱۵۰ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۱ تاثیر دما و نیروی پیش‌خمکاری

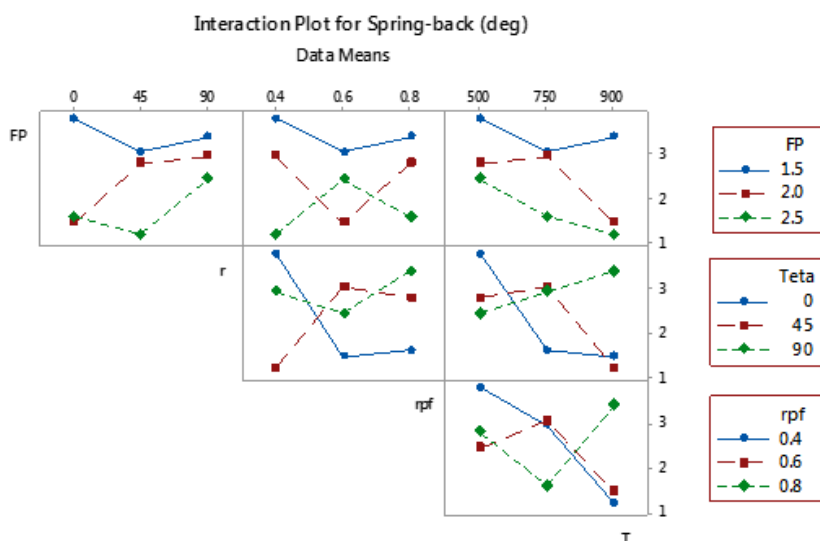
بر اساس شکل ۸، ناهمسانگردی سومین پارامتر تأثیرگذار بر زاویه برگشت فنری است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان داد $r = 45$ سبب کاهش زاویه برگشت فنری می‌شود [۷]؛ اما با تغییر ناهمسانگردی از ۰ به ۹۰ درجه و کاهش نیروی پیش‌فرم، زاویه برگشت فنری حدود ۱ درجه افزایش می‌یابد. همچنین اختلاف زاویه برگشت فنری برای دو جهت ۰ و ۴۵ درجه حدود ۰,۱۳ درجه است. علت اختلاف زاویه برگشت فنری، مربوط به اندازه متوسط سایز دانه‌ها و جهت‌گیری دانه‌ها در پایان سیکل عملیات حرارتی آنیل می‌باشد [۹]. براساس نتایج متالوگرافی اختلاف اندازه دانه در دو جهت افقی و عمودی برای دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۶,۷ میکرومتر است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ اختلاف اندازه دانه در دو جهت افقی و عمودی (الف دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ب) دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد شعاع سنبه پیش‌فرم کوچک‌ترین سهم را بر کاهش زاویه برگشت فنری دارد. با افزایش شعاع سنبه پیش‌فرم از ۰,۴ تا ۰,۶ میلی‌متر میزان زاویه برگشت فنری از ۲,۶۵ به ۲,۳۱ درجه کاهش می‌یابد؛ زیرا بر اساس تئوری‌های کلاسیک خمکاری با افزایش شعاع سنبه پیش‌فرم، سطح تماس سنبه و ورق افزایش می‌یابد. در این شرایط حداکثر نیروی پیش‌فرم به ورق اعمال شده و سبب کاهش تنش‌های پسماند می‌شود [۲۸]؛ اما با افزایش شعاع سنبه پیش‌فرم از ۰,۶ تا ۰,۸ میلی‌متر زاویه برگشت فنری حدود ۰,۲۹ درجه افزایش یافته است. همچنین رفتار برگشت فنری ورق در این شرایط به صورت زاویه منفی مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۳ نمودارهای اثرات متقابل فاکتورها نشان داده شده است. مشاهده شد که اکثر پارامترها باهم تداخل ندارد ولی پارامترهای دما با ناهمسانگردی و دما با شعاع سنبه پیش‌فرم اثر تعاملی دارند. همچنین سایر پارامترها اثر تعاملی خیلی کمی دارند.



شکل ۱۳ نمودارهای اثرات متقابل بر روی زاویه برگشت فنری

طبق شکل ۱۳، مشاهده شد با افزایش دما در صورتی که شعاع سنبه پیش فرم در سطح کم باشد، زاویه برگشت فنری بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای سیکل آنیلینگ، اگر خمکاری بر روی نمونه‌ها با $r=45$ درجه انجام شود زاویه برگشت فنری کاهش و در صورتی که $r=90$ درجه باشد زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از تحلیل پارامترها، ترکیب مناسب هر پارامتر بر اساس سطوح برای کنترل و کاهش زاویه برگشت فنری به ترتیب نیروی پیش فرم ۲٫۵ کیلونیوتن، دمای آنیلینگ ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، ناهمسانگردی ۴۵ درجه و شعاع سنبه پیش فرم ۰٫۶ میلی‌متر تعیین گردید. لازم به ذکر است ترکیب سطوح بالا در هیچ‌کدام از حالت‌های جدول طراحی آزمایشات تاگوچی بیان نشده است. براین اساس یک آزمایش مطابق ترکیب بهینه پارامترها انجام شد. براساس شرایط بهینه، زاویه برگشت فنری نسبت به آزمایش شماره ۸ حدود ۰٫۴۳ درجه کاهش داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر چهار پارامتر نیروی پیش فرم، شعاع سنبه پیش فرم، ناهمسانگردی و دمای آنیلینگ بر پدیده برگشت فنری ورق‌های مسی به ضخامت ۰٫۵ میلی‌متر مطالعه و بررسی شد. پس از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و اجرای آن بر اساس مدل المان محدود و آزمایش‌های تجربی نتایج استخراج و سطوح بهینه هر پارامتر به دست آمد. با بررسی نتایج مشخص شد که:

- نیروی پیش فرم و دمای آنیلینگ به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها بر کنترل و کاهش زاویه برگشت فنری می‌باشند.
- با افزایش نیروی پیش فرم از ۱٫۵ به ۲٫۵ کیلونیوتن، زاویه برگشت فنری حدود ۱٫۶۶ درجه کاهش می‌یابد.
- به ازای نیروی پیش فرم ۱٫۵ تا ۲٫۵ کیلونیوتن، محدوده مناسب فشردگی ضخامت ورق 0.3-0.5t می‌باشد.
- با افزایش دمای آنیلینگ از ۵۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، زاویه برگشت فنری حدود ۱ درجه کاهش می‌یابد.
- با اعمال نیروی پیش فرم و دمای آنیلینگ، زاویه برگشت فنری نسبت به حالت بدون نیروی پیش فرم و دمای آنیلینگ حدود ۴٫۳ درجه کاهش می‌یابد.
- مناسب‌ترین جهت نورد و شعاع سنبه پیش فرم جهت کاهش پدیده برگشت فنری، به ترتیب زاویه ۴۵ درجه و شعاع ۰٫۶ میلی‌متر می‌باشد.
- پارامترهای بهینه برای کاهش زاویه برگشت فنری نیروی پیش فرم ۲٫۵ کیلونیوتن، دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، شعاع سنبه ۰٫۶ میلی‌متر و ناهمسانگردی ۴۵ درجه بدست آمد.
- براساس شرایط بهینه، زاویه برگشت فنری نسبت به آزمایش شماره ۸ حدود ۰٫۴۳ درجه کاهش داشته است.

References

- [1] Tekiner Z. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of materials processing technology*. 2004 Jan 1;145(1):109-17. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.07.005
- [2] Esat V, Darendeliler H, Gokler MI. Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets. *Materials & design*. 2002 Apr 1;23(2):223-9. doi: 10.1016/S0261-3069(01)00062-0
- [3] Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. *Mechanics of sheet metal forming*. 2nd ed. Oxford; 2002.
- [4] Lange K. *Handbook of metal forming*. Springer; 1985.
- [5] *Metals Handbook*. 8nd ed. American society for metals; 1969.
- [6] Karaağaç İ. The evaluation of process parameters on springback in V-bending using the flexforming process. *Materials research*. 2017 Jul 24;20:1291-9. doi: 10.1590/1980-5373-MR20160799
- [7] Chikalthankar SB, Belurkar GD, Nandedkar VM. Factors affecting on springback in sheet metal bending: a review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2014;3(4):247-51.
- [8] Liu X, Zhao S, Qin Y, Wang C, Wan-Nawang WA. Size effects on the springback of CuZn37 brass foils in tension and micro W-bending. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2018 Dec;232(14):2439-48. doi: 10.1177/0954405417690557
- [9] Wang J, Fu M, Ran J. Analysis of the Size Effect on Springback Behavior in Micro-Scaled U-B ending Process of Sheet Metals. *Advanced Engineering Materials*. 2014 Apr;16(4):421-32. doi: 10.1002/adem.201300275
- [10] Liu JG, Fu MW, Lu J, Chan WL. Influence of size effect on the springback of sheet metal foils in micro-bending. *Computational Materials Science*. 2011 Jul 1;50(9):2604-14. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.136

- [11] Chen CC. Experimental study on punch radius and grain size effects in V-bending process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014 Apr 3;29(4):461-5. doi: [10.1080/10426914.2014.880468](https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880468)
- [12] Shivaprasad C, Subrahmanyam A, Reddy NV. Effect of electric path in electric pulse aided V-bending of Ti-6Al4V: An experimental and numerical study. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Aug 25;100:75-84. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.018)
- [13] Liu X, Zhao S, Qin Y, Zhao J, Wan-Nawang WA. A parametric study on the bending accuracy in micro W-bending using Taguchi method. *Measurement*. 2017 Mar 1;100:233-42. doi: [10.1016/j.measurement.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.007)
- [14] Kiswanto G, Mahmudah A, Priadi D. Preliminary Investigation of Micro-V-Bending. In *MATEC web of conferences 2017 (Vol. 108, p. 06001)*. EDP Sciences. doi: [10.1051/mateconf/201710806001](https://doi.org/10.1051/mateconf/201710806001)
- [15] Liu X, Han X, Zhao S, Qin Y, Wan-Nawang WA, Yang T. Optimisation of micro W-bending process parameters using I-optimal design-based response surface methodology. *Manufacturing review*. 2021 Mar 2;8(7):1-10. doi: [10.1051/mfreview/2021005](https://doi.org/10.1051/mfreview/2021005)
- [16] Wang C, Wang S, Wang S, Chen G, Zhang P. Investigation on springback behavior of Cu/Ni clad foils during flexible die micro V-bending process. *Metals*. 2019 Aug 15;9(8):892. doi: [10.3390/met9080892](https://doi.org/10.3390/met9080892)
- [17] Podinehei R, Shahraki S, Ebrahimi H. The experimental and numerical study of the effect die parameters, grain size and ratio t/d on spring-back in micro W-bending. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov 22;9(9):1-9. doi: [10.22034/ijme.2023.338676.7](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.338676.7) [In Persian]
- [18] Fonseca F. *Handbook of Die Design*. 2nd ed. United States of America; 1990.
- [19] Standard test Method for Plastic strain Ratio (R) for sheet Metal-E 517. *ASTM International*: 2019 Oct 31. doi: [10.1520/E0517-19](https://doi.org/10.1520/E0517-19)
- [20] Papeleux L, Ponhot JP. Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Sep 9;125:785-91. doi: [10.1016/S0924-0136\(02\)00393-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00393-X)
- [21] Hai VG, Minh NT, Nguyen DT. A study on experiment and simulation to predict the spring-back of SS400 steel sheet in large radius of V-bending process. *Materials Research Express*. 2020 Jan 20;7(1):016562. doi: [10.1088/2053-1591/ab67f5](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab67f5)
- [22] Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948 May 27;193(1033):281-97. doi: [10.1098/rspa.1948.0045](https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045)
- [23] Hong JH, Kim H, Han S, Kwon YN, Park H, Kim D. Bendability assessment of high strength aluminum alloy sheets via V-die air bending method. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022 Sep 1;20:1481-94. doi: [10.1016/j.jmrt.2022.07.123](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.123)
- [24] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons; 2017.
- [25] 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 May 1;148(1):15-24. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2003.11.038](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.038)
- [26] Callister WD, Rethwisch DG. *Fundamentals of materials science and engineering*. 2nd ed. Wiley; 2007.
- [27] Adelhani A, Ebrahimi H, Attar M. The experimental and numerical study of the effects of welding angle on forming multilayered sheets in U-bending operations. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020 Jan;34:239-44. doi: [10.1007/s12206-019-1225-x](https://doi.org/10.1007/s12206-019-1225-x)
- [28] Hakan D, Mustafa Ö, Murat S. Effects of material properties and punch tip radius on spring-forward in 90 V bending processes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013 Oct;20(10):64-9. doi: [10.1016/S1006-706X\(13\)60178-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60178-8)