



مطالعه عددی پارامترهای هندسی هسته و پوسته سولنوئید ضربه زن در فرآیند قلمزنی ورق‌های فلزی

محمد ریاحی^{1*}، محمد صدیقی¹، حسن رحمانیان²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846، riahi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 فروردین 1394

پذیرش: 03 خرداد 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

شکل‌دهی تدریجی ورق

ضربه زن مغناطیسی

قلمزنی

نمونه اولیه

چکیده

در این پژوهش مکانیزم طراحی شده برای قلمزنی ورق‌های فلزی بررسی عددی شده است. این مکانیزم شباهت زیادی به شکل‌دهی تدریجی ورق دارد. در این روش شکل‌دهی، ورق مقید شده و ابزار شکل‌دهنده با حرکت تدریجی خود، طرح مورد نظر را روی ورق ایجاد می‌نماید. تفاوت اصلی مکانیزم طراحی شده با شکل‌دهی تدریجی معمولی عبارت است از: امکان کنترل انرژی و زمان ضربه و مقید کردن ورق به کمک ماده محافظ پشت آن، بجای گرفتن اطراف ورق. در این مکانیزم از سولنوئید جهت تولید حرکت ضربه‌ای استفاده شده است تا بتوان ضربه را کنترل نمود. با تحریک سولنوئید هسته به سمت مرکز سیم‌پیچ حرکت می‌کند. با کنترل ولتاژ می‌توان قدرت ضربه و با تغییر شیوه تحریک می‌توان سرعت ضربه را کنترل نمود. در این مقاله سولنوئید مورد استفاده شبیه‌سازی شده است. بدین منظور نرم‌افزار به کمک معادلات مغناطیس نیروی وارد بر هسته را بدست می‌آورد. سپس به کمک رابطه نیوتن که با یک معادله دیفرانسیل درجه دو خطی بیان شده است جایجایی هسته محاسبه می‌شود، برای ایجاد قابلیت جایجایی هسته، در مدل‌سازی از مش انعطاف‌پذیر استفاده شده است، برای صحت‌سنجی مدل آزمایشی صورت گرفته است که نیروی وارد بر هسته را در طول کورس به دست می‌آورد. هندسه نوک هسته یکی از پارامترهایی است که بر انرژی ضربه مؤثر است، از این رو زاویه مناسب برای نوک هسته بدست آمده است. از آنجاکه جرم هسته قابل تغییر است تأثیر این پارامتر و سوراخ کردن هسته برای کاهش وزن آن مدنظر قرار گرفته است. در نهایت تأثیر پوسته دربرگیرنده سیم‌پیچ بر قدرت و انرژی ضربه بررسی شده است.

Numerical study of geometrical parameters of hammering solenoid plunger and cover in chasing and repoussé of sheet metals

Mohammad Riahi*, Mohammad Sedighi, Hassan Rahmanian

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Address

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 April 2015
Accepted 20 June 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Incremental sheet metal forming
magnetic hammer
chasing and repoussé
prototyping

ABSTRACT

In this research the designed mechanism for chasing and repoussé of sheet metal is studied. This mechanism is similar to incremental sheet metal forming. In this kind of sheet metal forming, sheet surrounding is fixed and forming tool pastes the desired pattern on sheet metal incrementally. The major differences between designed mechanism and traditional incremental forming are as follows: control on the punch energy and sequence, and fixing the sheet by using protectant material behind it instead of clamping sheet sides. In this mechanism, the solenoid is used as a hammer. The plunger moves to the center of the coil while energized. Striking energy could be controlled by controlling the excitement voltage and punching sequence could be adjusted by manipulating the excitement algorithm. In this paper, the utilized solenoid is simulated. The mechanical and magnetic relations are merged for this. Flexible mesh is used to make it possible for the plunger to have movement. An experimental setup is executed to measure force on the plunger during stroke, this is used for validation. Plunger head is one important parameter affecting strike energy, thus an appropriate plunger head angle is investigated. Plunger mass is changeable, so this parameter is considered and drilled plunger is simulated. Finally, the effect of coil cover on strike energy and power is studied.

1- مقدمه

بر روی میز ثابت می‌شود و شکل‌دهی به کمک یک ابزار کوچک انجام می‌گیرد. با کنترل ماشین حامل ابزار، می‌توان شکل موردنظر کاربر را روی ورق ایجاد کرد. ابزار شکل‌دهنده می‌تواند حرکت چرخشی و یا ضربه‌ای داشته باشد [1]. شیفر [2] مکانیزم‌های مختلف شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای را

شکل‌دهی تدریجی¹ برای ساخت نمونه اولیه کاربرد فراوان دارد. در این نمونه شکل‌دهی هیچ‌گونه قالبی نیاز نیست، ورق از اطراف توسط گیره مهار شده و

1- Incremental Sheet Metal Forming (ISMF)

Please cite this article using:

M. Riahi, M. Sedighi, H. Rahmanian, Numerical study of geometrical parameters of hammering solenoid plunger and cover in chasing and repoussé of sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 10-18, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آزماچاکه حرکت هسته خطی بوده و سرعت آن زیاد است، به این مکانیزم می توان " تفنگ مغناطیسی " اطلاق کرد. در برخی از روش های شکل دهی تدریجی از ترنسیدوسر اولتراسونیک به عنوان ابزار شکل دهنده استفاده می شود [13]. چنانچه در شکل 1 (ب و د) نشان داده شده است مکانیزم طراحی شده از چند بخش اساسی تشکیل شده است، الف) بخش تولید فرمان توسط کاربر، ب) ارسال فرمان راه اندازی ماشین کنترل عددی، ج) ارسال فرمان و تأمین انرژی ضربه توسط برد الکترونیکی و د) بخش تبدیل انرژی الکتریکی به حرکت رفت و برگشتی توسط عملگر مغناطیسی.

دستور ضربه طبق نظر کاربر توسط نرم افزار طراحی شده تولید می شود این فرمان مشخص می کند چه زمانی ضربه زده شود، فرکانس ضربه زنی چقدر باشد، و چگونه تغییر کند و قدرت ضربه چقدر باشد و ضربه زنی تا کجا ادامه داشته باشد. داده ها پس از ارسال توسط برد الکترونیکی دریافت شده، انرژی مورد نیاز ضربه را از منبع تغذیه تأمین می کند. با تحریک سیم پیچ ضربه با قدرت به سطح ورق نواخته می شود. آزماچاکه ورق گیر مانع از حرکت اضافی ورق می شود، با اصابت ضربه به ورق اثر ابزار بر روی ورق شکل می گیرد.

برای ضربه زنی کنترل شده با استفاده از سولنوئید، تمهیدات خاصی نیاز است، مثلاً باید بتوان هسته را پس از ضربه زنی به عقب راند، چنانچه بدین منظور از فنر استفاده شود، باید بتوان نیروی فنر را کنترل نمود. نیروی زیاد فنر مانع از حرکت هسته خواهد شد و نیروی کم فنر نمی تواند هسته را به موقع از انتهای کورس به مکان اولیه بازگرداند. مغناطیس شدن موقت پوسته سولنوئید در اثر اعمال میدان مغناطیسی، ضرورت این امر را تشدید می کند. سهولت اتصال مکانیزم طراحی شده به ماشین کنترل عددی حائز اهمیت است، به گونه ای که اگر مجموعه طراحی شده بزرگ و سنگین باشد و یا حجم زیادی را اشغال نماید، اتصال آن بر روی ماشین های کنترل عددی کوچک دشوار خواهد بود. همچنین نحوه طراحی باید به گونه ای باشد که بدون نیاز به تغییر خاصی در ماشین بتوان دستگاه را بر آن سوار کرد و به راحتی بتوان آن را بر روی انواع ماشین کنترل عددی وصل نمود. چنانچه مکانیزم ضربه زنی متقارن نباشد، لرزش ابزار ضربه زن و اعوجاج ناخواسته افزایش خواهد یافت. آزماچاکه با تغییر کورس هسته انرژی ضربه تغییر می کند، به کمک کنترل کورس حرکتی هسته می توان انرژی ضربه را کنترل کرد.

با در نظر گرفتن این پارامترها طراحی صورت گرفته در شکل 1 (الف) مشاهده می شود، سولنوئید توسط شاسی فلزی احاطه شده، به خاطر سبکی و زیبایی دستگاه از حفاظ آلومینیومی استفاده شده است. جهت اتصال دستگاه به اسپیندل یک میله بالای آن تعبیه گردیده است. در مکانیزم ضربه زن طراحی شده می توان به سادگی پارامترهای ضربه را کنترل نمود، طول اولیه فنر بازگرداننده هسته به سادگی قابل تغییر است و کورس حرکتی هسته را به آسانی می توان تنظیم نمود. در این طراحی سعی شده است تقارن محوری حفظ شود تا از تابیدگی مکانیزم در اثر ضربه جلوگیری شود. ارتفاع مکانیزم ضربه زن کمتر از 15 سانتیمتر است که امکان استفاده آن در ماشین های کنترل عددی کوچک را امکان پذیر می سازد. همچنین وزن کل مجموعه کم بوده و حجم زیادی را اشغال نمی کند. نکته مهم دیگر آن است که برای کار مکانیزم ضربه زن اتصال تنها دو سیم نازک به سیم پیچ کافی است و نیازی به اتصالات بادی و هیدرولیکی نیست، از این رو مکانیزم ضربه زن به راحتی می تواند روی میز حرکت کند، و کار آن آلودگی در بر نخواهد داشت. از این رو امکان صنعتی نمودن دستگاه وجود دارد.

در روش تدریجی برای شکل دهی ورق، آن را ثابت نگه می دارند، چنانچه ورق از اطراف مقید شود حین شکل دهی میانه ورق که از گیره های اطراف

آزمایش نمود و پس از مقایسه و عیب یابی آن ها، دستگاه ضربه زن قابل اعتماد برای مصارف صنعتی ساخت. بلیچر [3] از ابزار ضربه زن مغناطیسی پیوسته جهت عملیات ساچمه زنی استفاده نمود. میر [4] نیز از دو ربات جهت شکل دهی ورق استفاده نمود که یکی وظیفه شکل دهی روی ورق را دارد و دیگری به عنوان قالب عمل کرده از اعوجاج ناخواسته ورق جلوگیری می کند. به کمک این روش شکل دهی ورق های چندلایه را نیز می توان شکل داد [5]. برای جلوگیری از نازک شدگی ورق می توان شکل دهی تدریجی را در چند مرحله انجام داد [6].

برای تولید حرکت خطی روش های گوناگونی وجود دارد، گاهی حرکت دورانی را به حرکت خطی تبدیل می کنند، گاهی نیز از پیستون های بادی و یا هیدرولیکی بدین منظور استفاده می شود، اما در این موارد علاوه بر حجم بزرگ دستگاه ضربه زن، کنترل ضربه دشوار است و تجهیزات جانبی زیادی نیاز است، از جمله مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی یا کمپرسور باد یا یک هیدرولیک و غیره. یکی از روش های مناسب برای تولید حرکت خطی با فضای کم استفاده از سولنوئید است. سولنوئیدها، گونه ای از عملگرهای مغناطیسی هستند که در صورت تحریک هسته را به سمت مرکز سوق می دهند. از این رو می توان از سولنوئید برای تولید حرکت خطی استفاده کرد. به کمک سولنوئید می توان ضربه را کنترل کرد. با تغییر جریان تحریک قدرت ضربه کنترل می شود. نیروی وارد بر هسته یکی از پارامترهای مهم کنترلی محسوب می شود [7]. از جمله کاربردهای سولنوئید در شیرهای برقی است. شیرهای برقی برای کنترل جریان سیال [8] و یا در پمپ های حرارتی [9] و دستگاه های تهویه مطبوع [10] استفاده می شوند. استنبر [11] در نرم افزار کامل¹ یک شیر الکتریکی برای موتورهای احتراق داخلی را مدل سازی نمود و درجه اطمینان سیستم را توضیح داد. بیلر [12] نیز به کمک همین نرم افزار تأثیر جریان گردابی بر سرعت خاموش و روشن شدن یک نمونه سولنوئید را بررسی نمود.

فرآیند قلمزنی یک فرآیند سنتی و زمان بر محسوب می شود. این فرآیند شباهت زیادی به روش شکل دهی تدریجی ضربه ای دارد. اما در روش های تدریجی که تاکنون استفاده می شده است کنترل ضربه امکان پذیر نبوده است و ابزار ضربه زن با فرکانس ثابت فرآیند شکل دهی را انجام می داده است. برای مکانیزه نمودن این روش سنتی باید بتوان ضربه را کنترل نمود. در این تحقیق، مکانیزم ضربه زن مغناطیسی طراحی شده است که قابلیت کنترل ضربه را فراهم می سازد و به کمک آن می توان مراحل اولیه قلمزنی را انجام داد. با استفاده از شبیه سازی انجام شده برخی از پارامترهای هندسی هسته و پوسته سولنوئید ضربه زن بررسی شده اند این پارامترها عبارتند از: 1) زاویه نوک هسته 2) تغییر جرم هسته 3) پوسته ی دربرگیرنده سولنوئید. تأثیر این پارامترها بر انرژی ضربه مدنظر قرار گرفته است. شبیه سازی به وسیله آزمایش تجربی صحت سنجی شده است. در نهایت چند نمونه قلمزنی شده به کمک مکانیزم طراحی شده ارائه گردیده است.

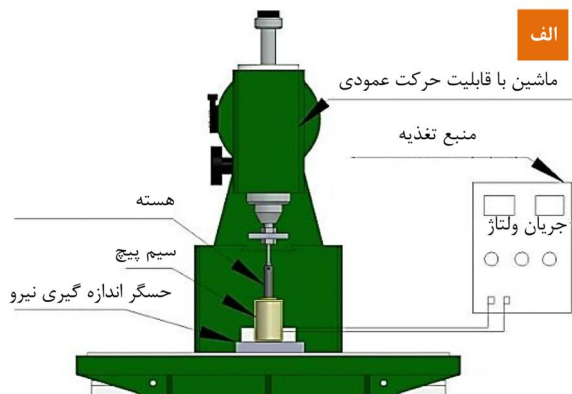
2- تجهیزات آزمایشگاهی

در فرآیند قلمزنی طراحی شده، ابتدا ورق کاملاً مقید می شود و ابزار ضربه زن با حرکت تدریجی خود به ورق شکل می دهد، در اینجا ابزار شکل دهنده حرکت ضربه ای دارد و فرمان هر ضربه از طرف کامپیوتر صادر می شود. اساس کار مکانیزم ضربه زنی اعمال ولتاژ به سولنوئید و کشش هسته به سمت مرکز سیم پیچ است، این مکانیزم به سادگی قابلیت تولید حرکت خطی را دارا است.

البته عمق شکل دهی در این روش محدود به ضخامت فوم خواهد بود. این روش مقید کردن ورق برای کارهای هنری مناسب است. در نهایت فوم به روی یک ورق آهنی ضخیم به ضخامت 5 میلی متر چسب می شود. ابعاد ورق ضخیم، کمی بزرگ تر از فوم در نظر گرفته شده است تا بتوان به کمک رویند آن را به سادگی بر روی میز ماشین کنترل عددی محکم نمود. جزئیات در شکل 1 (ج) نشان داده شده است.

با داشتن مشخصات سولنوئید می توان از آن به صورت بهینه استفاده نمود. در سولنوئید با کورس کم معمولاً نیرو در انتهای کورس مهم است [7]. برای افزایش انرژی ضربه می توان از سولنوئید با کورس زیاد استفاده کرد تا بتوان از انرژی ذخیره شده در فضای بین سیم پیچ و هسته بهر استفاده نمود. از آنجاکه کورس حرکتی متغیر انتخاب شده است می توان انرژی ضربه را نیز به کمک سخت افزار تغییر داد. مشخصات مربوط به سولنوئید انتخاب شده در جدول 1 آمده است. چنانچه جریان گذرا باشد می توان ولتاژ تحریک را از مقدار نامی بیشتر در نظر گرفت و قدرت ضربه را افزایش داد. کافی است ولتاژ میانگین کمتر از ولتاژ نامی سولنوئید باشد. ولتاژ نامی این سولنوئید 24 ولت است اما در آزمایش های انجام شده جهت افزایش قدرت و سرعت ضربه از تحریک 40 ولت گذرا استفاده شده است. در مواردی که از جریان پیوسته استفاده می شود، مانند درب های قفل شونده، چنانچه از جریان بیش از مقدار نامی استفاده شود، سولنوئید داغ شده و می سوزد [14].

چنانچه در شکل 2 مشاهده می شود برای آزمایش و محاسبه نیرو در حالت استاتیکی آزمایشی ترتیب داده شده است که در آن نیرو در فواصل مختلف هسته نسبت به سیم پیچ به دست آمده است. تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک دستگاه اندازه گیری نیرو و یک ماشین با قابلیت حرکت کنترل شده در جهت عمود است.

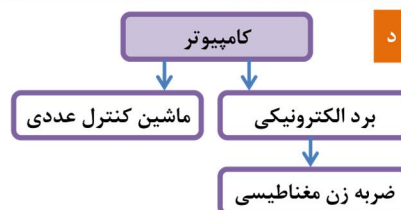
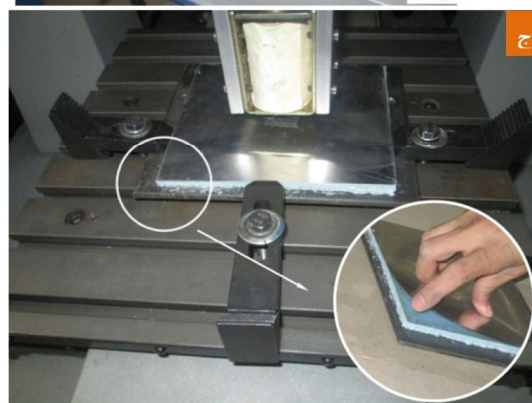
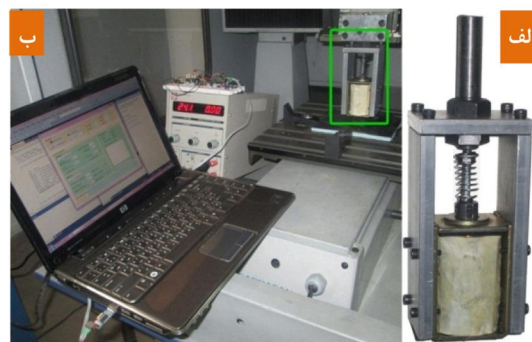


شکل 2 صحت سنجی نتایج برای بررسی نیرو در سولنوئید

فاصله دارد، فرورفتگی ناخواسته خواهد داشت. همچنین اثر ضربه ها بر ورق به درستی آشکار نمی شود. برای رفع این مشکل چنانچه در شکل 1 (ج) مشاهده می شود از فوم پلی استایرن پشت ورق استفاده شده است. یک ورق آلومینیوم با ضخامت 0/2 میلی متر و ابعاد آن 19/5 در 16/5 سانتی متر بر روی فوم چسب شده است. این چسب ضخامت بسیار کمی دارد و تأثیر آن بر شکل پذیری ورق ناچیز است. این فوم که در ماکت سازی استفاده می شود، در اثر فشار تغییر شکل پلاستیک می یابد و ضربه فشار آن با توجه به استاندارد D395 حدود 38% است، با استفاده از این فوم تغییر شکل به محل ضربه منحصر می شود و اثر ضربه بر ورق بهتر نقش می بندد. با توجه به این که فوم کاملاً زیر ورق است و اطراف ورق را در بر نمی گیرد، از همه ورق جهت شکل دهی می توان استفاده کرد.

جدول 1 مشخصات مربوط به سولنوئید

ولتاژ نامی	24 ولت
مقاومت سیم پیچ	48 اهم
قطر سیم سیم پیچ	0/45 میلی متر
طول سیم پیچ	70 میلی متر
دور بر واحد طول	55714 دور بر متر
وزن هسته	96 گرم
قطر هسته	16 میلی متر
طول هسته	73 میلی متر
ضربه خود القایی سولنوئید	477 میلی هانری

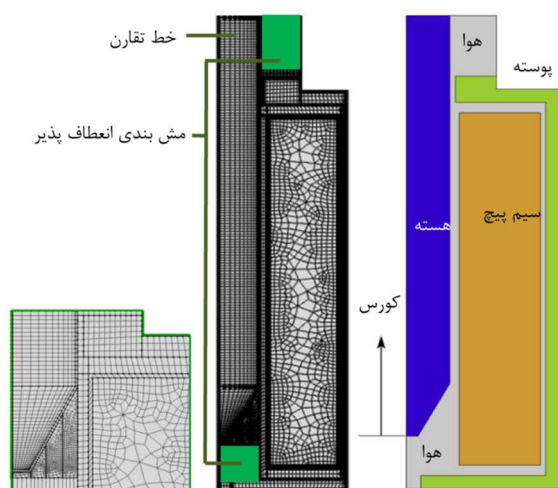


شکل 1 تجهیزات آزمایشگاهی جهت قلمزنی ورق

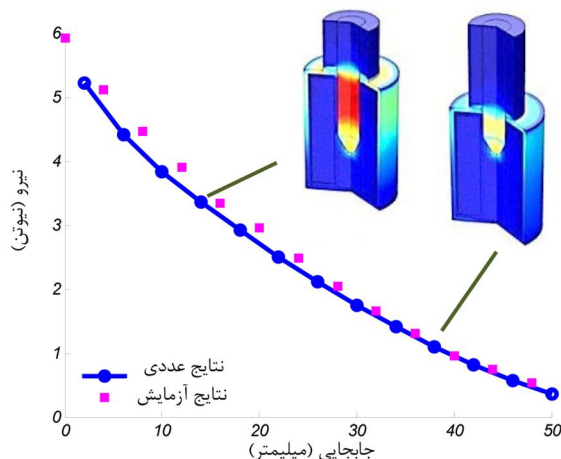
نمودار جابجایی نسبت به زمان، حرکت هسته را در طول کورس نشان می دهد، و زمان مورد نیاز برای تولید یک حرکت ضربه ای را مشخص می نماید. این زمان "زمان ضربه" نام دارد. هرچه این زمان کمتر باشد، فرکانس ضربه زنی افزایش خواهد یافت. نمودار نیرو نسبت به زمان نیز تغییرات تدریجی نیروی وارد بر هسته را در طول کورس برای حالات مختلف نشان می دهد. به کمک این نمودار می توان دریافت که در نهایت چه نیرویی به هسته وارد می شود. نیروی وارد بر هسته به اختصار "نیروی هسته" نامیده می شود. با کمک گرفتن از نمودار جریان نسبت به زمان برخی از تغییرات نمودار نیرو- زمان قابل توجیه خواهد بود.

شکل 4 نمودار مقایسه نتایج تجربی و عددی را نشان می دهد. برای صحت سنجی مدل سازی از آزمایش طراحی شده در شکل 2 استفاده شده است. همان گونه که بیان شد در این آزمایش نیرو در طول کورس های مختلف هسته به دست آمده است و این روند تا انتهای مسیر حرکتی هسته ادامه یافته است. در این حالت جریان در سیم پیچ به مقدار نامی خود در ولتاژ مورد بررسی رسیده است. چنانچه در شکل 4 مشاهده می شود، نتایج حاصل از آزمایش مطابقت خوبی با نتایج حاصل از مدل سازی دارند.

در حالتی که مسئله وابسته به زمان است نیاز به تعریف گام زمانی الزامی است. انتخاب گام زمانی مناسب از نوسانات جواب ها جلوگیری می کند. برای تعریف این پارامتر از عدد کورانت استفاده شده است که در رابطه (1) نشان داده شده است.



شکل 3 سولنوئید مدل سازی شده به همراه مش بندی های انجام شده



شکل 4 مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج عددی برای صحت سنجی مدل سازی

چنانچه در شکل 2 مشاهده می شود سیم پیچ بر روی لودسل قرار گرفته است. در هر گام هسته به کمک دستگاه (4 میلیمتر) در جهت عمود پایین می آید، با تغییر ولتاژ منبع تغذیه تغییرات نیرو بر حسب جابجایی برای ولتاژهای مختلف قابل محاسبه است. از آنجاکه در این آزمایش مکان هسته، حین اندازه گیری نیرو ثابت است، آزمایش استاتیکی تلقی می شود. از نتایج این آزمایش برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی استفاده شده است که در بخش شبیه سازی استفاده می گردد.

3- شبیه سازی

مدل سازی به صورت دوبعدی و متقارن محوری انجام شده است. این شبیه سازی در نرم افزار کامپل انجام شده است. در شکل 3 اجزای مختلف مدل نشان داده شده است. از آنجاکه برای انتشار میدان مغناطیسی نیاز به شبکه بندی الزامی است، در این مثال بین اجزای مختلف سولنوئید هوا در نظر گرفته شده است. چنانچه در شکل 3 مشاهده می شود، محور مختصات در پایین در انتهای مسیر حرکت هسته در نظر گرفته شده است، یعنی زمانی که هسته به انتهای مسیر خود می رسد، کورس صفر می شود. در این شبیه سازی کورس حرکتی هسته 50 میلیمتر در نظر گرفته شده است.

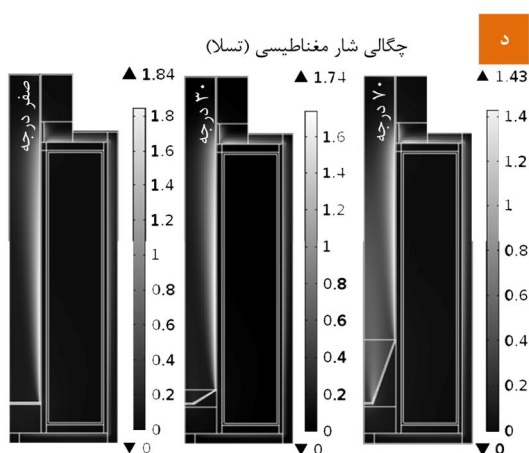
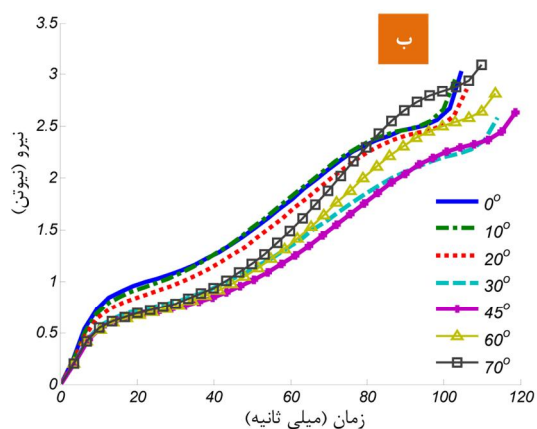
چنانچه مشاهده می شود، برای شبکه بندی از مش های مربعی استفاده شده است. در محیط دوبعدی مش های مربعی دقت بالاتری نسبت به مش های مثلثی دارند. در اکثر نقاط از مش مقید¹ استفاده شده است بجز در سیم پیچ که مش بندی مهم نیست و در هوای انتهای نوک هسته که در شکل 3 بزرگنمایی شده است. در این مکان مش بندی مقید نامتوازن خواهد بود و از مش آزاد استفاده شده است. البته برای بهبود مش بندی، قسمت بندی های متعددی صورت گرفته است.

در این مدل همه مرزهای اطراف سیم پیچ جز خط تقارن دارای شرط مرزی "عایق مغناطیسی"² می باشند، که برای حل مسئله به صورت پیش فرض بر مدل اعمال شده است. در مناطق هوا و پوسته و هسته نیز، قانون آمپر حاکم است. در این مدل از سه ماژول استفاده شده است. ماژول اول ماژول مغناطیس است که به کمک آن میدان مغناطیس ایجاد شده توسط سیم پیچ در اطراف آن قابل محاسبه است. همچنین این ماژول قابلیت محاسبه نیروی وارد بر جسم فرومغناطیس تحت تأثیر میدان مغناطیسی را دارا است. ماژول دوم معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم خطی را حل می نماید. از این ماژول برای ساده سازی مدل و بجای ماژول مکانیک استفاده شده است. با داشتن نیروی هسته و استفاده از رابطه دوم نیوتن، جابجایی و سرعت و شتاب هسته محاسبه می شود. این معادله دیفرانسیل در هر گام زمانی یکبار محاسبه می شود. به کمک ماژول سوم، که "مش متحرک"³ یا "مش انعطاف پذیر" است، جابجایی محاسبه شده توسط ماژول قبل به مدل اعمال می شود. این ماژول تغییر شکل مش را ممکن می سازد و به هسته امکان حرکت می دهد. در شکل 3 دو ناحیه ای که از این نوع مش بندی استفاده می کنند مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می شود در اطراف هسته یک ردیف مش مربعی کوچک هوا وجود دارد که کاملاً با هسته جابجا می شود. این مش ها نیروی هسته را یکنواخت تر می سازند [11].

نمودارهای ترسیم شده در بخش نتایج جابجایی، نیرو و جریان نسبت به زمان، و نمودار میله ای مربوط به حداکثر انرژی جنبشی هسته می باشند. حداکثر انرژی جنبشی ضربه به اختصار "انرژی ضربه" نامیده شده است،

1- Mapped meshing
2- Magnetic insulation
3- Moving mesh

معمولاً در شیرهای برقی چون نیرو در انتهای کورس مهم است از سر تخت استفاده می‌شود، چون در این حالت در انتهای مسیر فاصله هوایی به صفر می‌رسد و همه انرژی فاصله هوایی تبدیل به نیروی کشنده هسته می‌شود [15]. نتایج مربوط به جابجایی برحسب زمان و نیروی هسته و انرژی ضربه برای هندسه‌های مختلف در شکل 5 نشان داده شده است. با تغییر زاویه نوک هسته دو رفتار مختلف دیده می‌شود از زاویه صفر (سر تخت) تا زاویه 30 درجه یک روند وجود دارد و از 30 درجه به بعد روند برعکس می‌شود، در شکل 5 (الف) زوایای انتهای هسته صفر، 10 و 20 درجه تقریباً زمان ضربه یکسانی دارند، اما زمان ضربه برای زاویه 30 درجه افزایش زیادی دارد و برای 45 درجه نیز این روند وجود دارد، اما برای 60 درجه و 70 درجه دوباره این زمان کاهش می‌یابد. به همین ترتیب در نمودار شکل 5 (ب) که تغییرات نیرو برحسب زمان است، برای زوایای 0 و 10 و 20 درجه تغییر زیادی در نیرو وجود ندارد، اما برای زاویه 30 درجه یک کاهش در نیرو مشاهده می‌شود. و برای زوایای 45 و 60 و 70 درجه، با افزایش زاویه نیرو بیشتر خواهد شد. در شکل 5 (ج) انرژی ضربه مشاهده می‌شود، از آنجاکه نیروی هسته برای زوایای 0 و 10 و 20 در طول مسیر تقریباً یکنواخت است انرژی ضربه نیز برای آن‌ها با نرخ کمی کاهش می‌یابد، اما در زاویه 30 درجه انرژی هسته شبیه به نیروی هسته کاهش دارد و از آن به بعد برای زوایای 45 و 60 و 70 درجه انرژی ضربه با نرخ تندتری افزایش می‌یابد. در شکل 5 (د)، نمونه‌هایی از چگالی شار برای هندسه‌های تخت، 30 درجه و 70 درجه مشاهده می‌شود، برای زاویه 30 درجه، سطح چگالی شار نسبت به حالت تخت پایین‌تر است و برای زاویه 60 درجه پراکندگی شار در هسته بهتر صورت گرفته است، یعنی با افزایش زاویه امکان دریافت شار توسط هسته افزایش می‌یابد.



شکل 5 نمودار (الف) کورس و (ب) نیرو بر حسب زمان و (ج) انرژی ضربه و (د) چگالی شار مغناطیسی برای نمونه ای از نتایج، در زوایای مختلف نوک هسته

$$C_r = v \times \frac{\Delta t}{\Delta l} \leq 1 \quad (1)$$

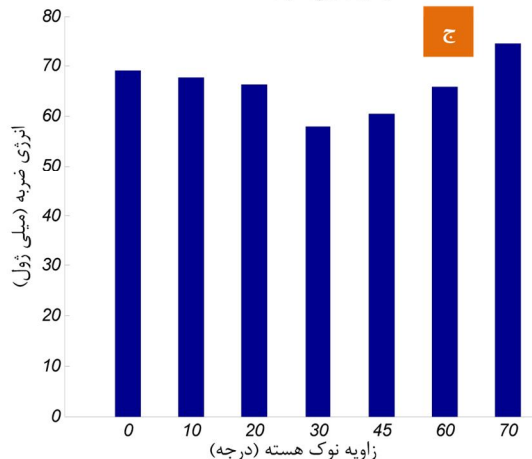
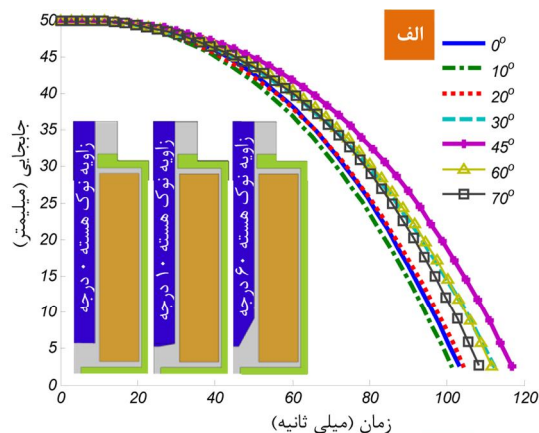
در این رابطه C_r عدد کورانت است که کمتر از یک در نظر گرفته می‌شود، Δl طول کوچک‌ترین مش‌ها در نقاط مختلف است، v سرعت متوسط در نقاط مش و Δt حداکثر گام زمانی است، از آنجاکه اندازه کوچک‌ترین مش‌ها حدود 0/2 میلیمتر است، چنانچه سرعت بیشینه 4 متر بر ثانیه فرض شود با فرض $C_r = 1$ گام زمانی $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ به دست می‌آید که با امتحان این مقدار و مشاهده نمودار همگرایی جواب مناسب به دست آمده است، البته در ابتدا کمی زمان نیاز است که همگرایی با گام زمانی کمتر حاصل شود که نرم‌افزار به صورت پیش فرض آن را انجام می‌دهد. در انتها نیز چون مش بندی متحرک کوچک می‌شود، کمی نمودار همگرایی بازه زمانی را کاهش می‌دهد، اما در طول مسیر از نظر همگرایی تقریباً مشکلی وجود ندارد.

4- بررسی نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. موضوعات مورد بحث عبارت‌اند از: هندسه نوک هسته، تأثیر تغییر جرم هسته و پوسته در برگزیده سولنوئید.

4-1- بررسی هندسه نوک هسته

در این بخش هندسه نوک هسته بررسی شده است، سرهای تخت و زاویه‌دار با زوایای مختلف مدل‌سازی شده‌اند، در شکل 5 (الف) سه نمونه انتخاب شده است، با تغییر زاویه نوک هسته نحوه توزیع شار بین هسته و پوسته تغییر می‌کند، در زاویه‌های کمتر انتقال شار بین هسته و پوسته خوب صورت می‌گیرد، اما در زاویه‌های بیشتر دریافت شار از سیم‌پیچ بهتر صورت می‌پذیرد.



تقریباً خطی کاهش می یابد، علت این امر کم بودن اینرسی حرکتی هسته سبک است. همچنین انرژی جنبشی هسته سوراخ شده کمی کمتر از هسته با وزن مشابه است، چون انتقال شار مغناطیسی در این حالت دشوارتر است، اما چگالی شار مغناطیسی آن چنان زیاد نیست که نیاز به جداره ضخیم تر وجود داشته باشد. در شکل 6 (د) نیز میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی برای نمونه ای از نتایج مشاهده می شود. همان گونه که انتظار می رود میدان مغناطیسی در هسته و پوسته - که از جنس آهن می باشند وجود ندارد و تمرکز میدان مغناطیسی در قسمت هایی است که دو فلز به هم نزدیک می شوند. این دو قسمت بزرگنمایی شده است. چگالی شار میدان مغناطیسی نیز برای دو هسته با جرم کمینه و بیشینه تقریباً شبیه به هم است و تنها کمی سطح میدان در هسته سنگین تر بیشتر است. علت این امر نیز حرکت آرام تر هسته و زمان بیشتر برای انتشار شار خواهد بود.

4-3- بررسی پوسته های دربرگیرنده سیم پیچ

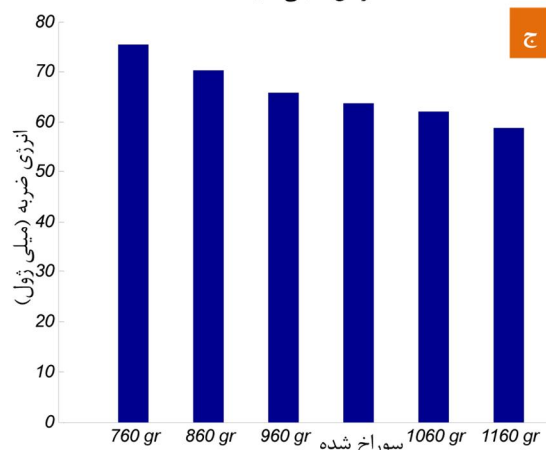
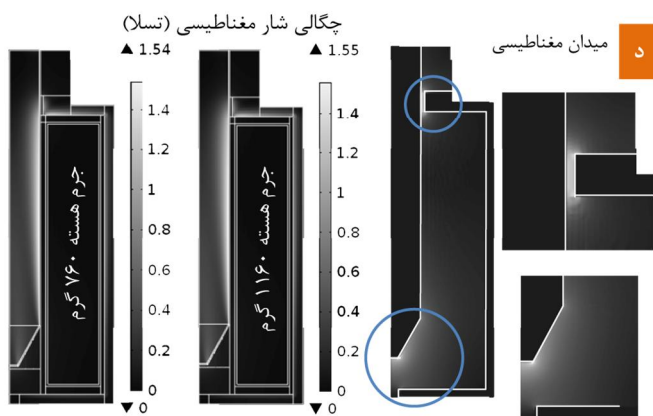
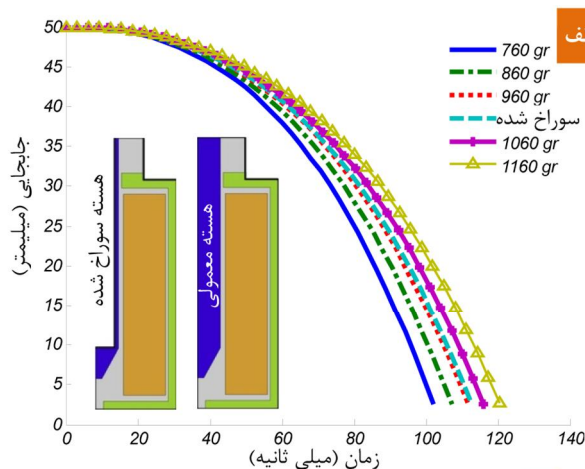
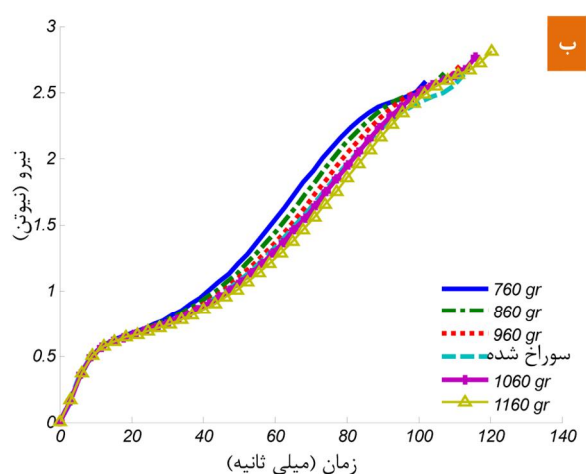
در شکل 7 نمودارهای کورس، نیرو و جریان برحسب زمان و انرژی ضربه برای پوسته های مختلف دربرگیرنده سیم پیچ نمایش داده شده است. ضخامت پوسته اطراف سیم پیچ یکی از پارامترهای مورد بررسی است. مدل سازی سه ضخامت 0/5، 1/5 و 2/5 میلی متر انجام شده است، همچنین مدل سازی برای حالتی که پوسته فوقانی و یا پوسته جانبی وجود نداشته باشد نیز انجام شده است. برای افزایش قدرت ضربه، در انتهای کورس حرکتی هسته یک برجستگی مخروطی ایجاد شده است. برای سهولت به این مدل "پوسته مخروطی" گفته می شود.

با توجه به این موارد می توان نتیجه گرفت زوایای هسته 0 و 10 و 20 درجه، تقریباً شبیه به هم هستند اما بدترین زاویه برای نوک هسته زاویه 30 درجه است و از این به بعد با افزایش زاویه، انرژی ضربه نیز افزایش می یابد.

4-2- بررسی تغییر جرم هسته

جرم هسته را می توان با افزودن جرم اضافی به بالای آن بیشتر نمود، برای کم کردن جرم نیز می توان آن را سوراخ کرد، در شکل 6 (الف) دو نمونه هسته در حالت معمولی و سوراخ شده مشاهده می شود. در حالت واقعی وزن هسته 960 گرم است. این بررسی برای وزن های 760 تا 1160 گرم با افزایش 100 گرم در هر مرحله انجام شده است. جرم هسته سوراخ شده 960 گرم در نظر گرفته شده است تا بتوان نتایج آن را با هسته عادی مقایسه نمود. در این حالت ضخامت جداره یک میلی متر است و انتقال شار تنها از طریق جداره صورت می گیرد.

همان گونه که در شکل 6 (الف) نشان داده شده است هرچه وزن هسته کمتر باشد عکس العمل آن سریع تر بوده و ضربه زودتر زده می شود، هر صد گرم افزایش وزن هسته زمان ضربه را حدود 5 میلی ثانیه افزایش می دهد، همچنین در حالتی که هسته سوراخ شده است، زمان ضربه نسبت به هسته با وزن مشابه آن تغییر خاصی نداشته است، در شکل 6 (ب) نیز مشاهده می شود که نیروی هسته در همه وزن ها در ابتدا و انتهای مسیر باهم برابر است، اما در میانه مسیر، نیروی هسته ی سبک تر بیشتر است. این امر سبب افزایش سرعت هسته و در نتیجه انرژی جنبشی ضربه می شود، چنانچه در شکل 6 (ج) مشاهده می شود، انرژی جنبشی ضربه با افزایش وزن به صورت

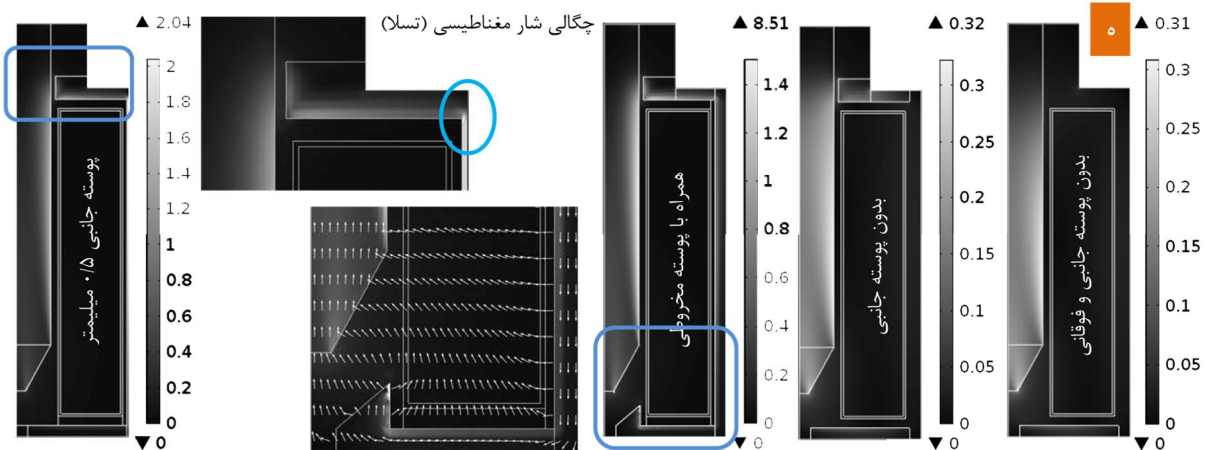
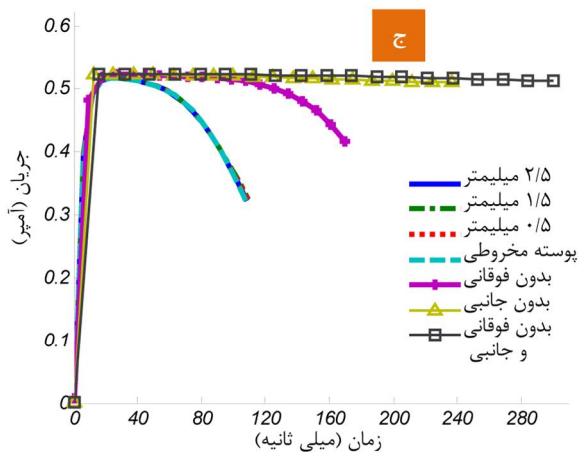
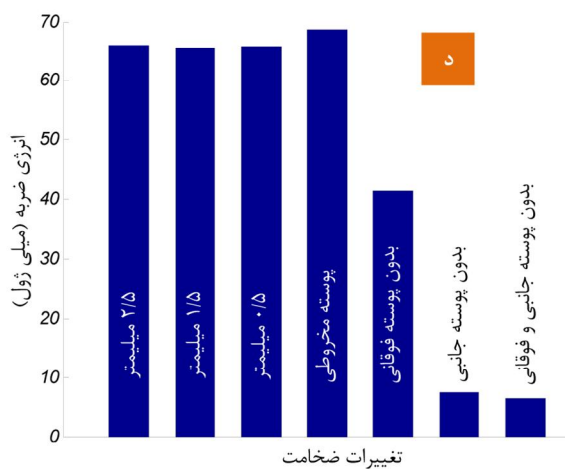
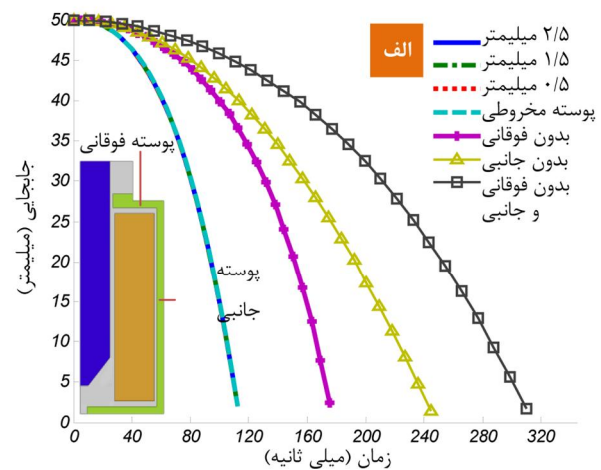
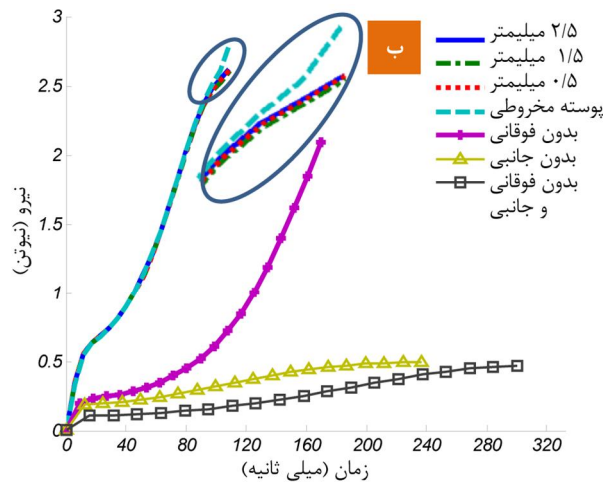


شکل 6 نمودار (الف) کورس و (ب) نیرو بر حسب زمان و (ج) انرژی ضربه برای وزنهای مختلف هسته و (د) میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی برای نمونه ای از نتایج

عدم هدایت شار مغناطیسی به وسیله پوسته است. طبق شکل 7 (ب) نیروی هسته برای ضخامت‌های مختلف یکسان است. با توجه به شکل 7 (ه) با کاهش ضخامت جداره تنها چگالی شار در پوسته افزایش می‌یابد و ضخامت نیم میلی‌متر هم می‌تواند شار تولیدی سیم‌پیچ را منتقل کند و نیاز به ضخامت بیشتر نیست. برای پوسته مخروطی، در انتهای مسیر حرکت، یعنی جایی که هسته به پوسته نزدیک می‌شود، نیرو افزایش بیشتری دارد که در شکل 7 (ب) بزرگنمایی شده است و در شکل 7 (ه) شماتیک آن زمانی که هسته به انتهای مسیر نزدیک می‌شود نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود چگالی شار در قسمت مخروطی زیاد است.

پوسته اطراف سیم‌پیچ وظیفه انتقال شار مغناطیسی را بر عهده دارد. از آنجاکه شار مغناطیسی درون مواد فرومغناطیس با سهولت بیشتری نسبت به هوا انتقال پیدا می‌کند، وجود این پوسته شار مغناطیسی را هدایت می‌کند و انرژی ضربه را افزایش می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل 7 (الف) مشاهده می‌شود، برای پوسته‌های با ضخامت مختلف و پوسته مخروطی زمان ضربه تقریباً یکسان است اما چنانچه پوسته بالا برداشته شود زمان ضربه 56 درصد اضافه شده و چنانچه تنها پوسته اطراف حذف شود این زمان 118 درصد افزایش می‌یابد و چنانچه هر دو پوسته بالا و اطراف حذف شوند این زمان 176 درصد افزایش می‌یابد. علت این امر



شکل 7 نمودار (الف) کورس، (ب) نیرو و (ج) جریان بر حسب زمان و (د) انرژی ضربه و (ه) نمونه‌ای از چگالی شار برای پوسته‌های مختلف

زمانی که پوسته اطراف نباشد، کاهش نیرو چشم گیر است و بیشینه نیروی هسته به 20 درصد حالت عادی می رسد. مطابق شکل 7 (ه) این حالت شبیه به حالت قبلی است اما سطح چگالی شار به خاطر وجود پوسته فوقانی بیشتر است. در شکل 7 (ج) مشاهده می شود که جریان برای حالاتی که جداره اطراف و فوقانی وجود ندارند به مقدار نامی می رسد و در آن جریان ثابت باقی می ماند که علت آن سرعت پایین هسته است، اما برای ضخامت های مختلف و برای پوسته مخروطی این جریان پس از رسیدن به مقدار نامی افت می کند و از 0/5 به حدود 0/3 آمپر می رسد. علت این امر نیز حرکت سریع هسته مغناطیسی شده بین سیم پیچ است که طبق "قانون لنز" جریان مخالف در سیم پیچ القا می کند. زمانی که پوسته فوقانی وجود ندارد افت جریان کمتری مشاهده می شود چون سرعت هسته کمتر است. در شکل 7 (د) بیشینه انرژی جنبشی هسته مشاهده می شود. برای ضخامت های مختلف پوسته تقریباً انرژی ضربه ثابت است. برای پوسته مخروطی 5 درصد این انرژی افزایش می یابد. زمانی که پوسته فوقانی وجود ندارد انرژی ضربه 38 درصد کاهش می یابد و زمانی که پوسته جانبی وجود ندارد و یا پوسته فوقانی و جانبی وجود ندارند، انرژی ضربه 88 درصد افت می کند.

بنابراین می توان نتیجه گرفت که وجود پوسته سیم پیچ مهم است اما ضخامت آن چندان مهم نیست و استفاده از پوسته مخروطی سبب بهبود نیروی هسته در انتهای مسیر حرکت است. همچنین وجود پوسته اطراف مهم تر از پوسته فوقانی است.

4-4- نمونه های قلمزنی شده

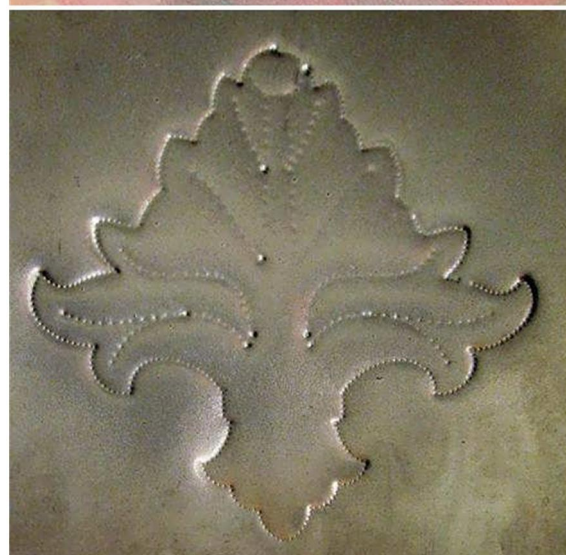
برای تولید نمونه های قلمزنی، تجهیزات آزمایشگاهی مانند شکل 1 آماده شده است. کامپیوتر فرمان مسیر موردنظر را به ماشین کنترل عددی می فرستد و فرمان ضربه زنی را به برد الکترونیکی ارسال می کند. چنانچه در شکل 8 مشاهده می شود، به کمک مکانیزم طراحی شده، لفظ جلاله "بسم الله الرحمن الرحيم" قلمزنی شده است. برای نشان دادن قابلیت فرآیند فاصله نقاط ضربه زنی "بسم" زیاد است و نقاط ضربه زده شده کاملاً مشخص می باشند. دو طرح قلمزنی دیگر نیز در این شکل نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود به خاطر فوم پشت ورق، شکل دهی به صورت موضعی در مکان ضربه صورت می گیرد و کل سطح ورق به سمت پایین نمی رود، بنابراین می توان با این روش، شکل دهی را باظرافت بیشتری مقصور ساخت.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق از عملگر مغناطیسی به عنوان ضربه زن مغناطیسی در فرآیند قلمزنی ورق استفاده شده است. این مکانیزم به ماشین کنترل عددی متصل می شود و حین جابجایی آن بر روی مسیر دلخواه، فرمان ضربه ارسال می شود و شکل موردنظر بر روی ورق ایجاد می شود. در این فرآیند سرعت و زمان ضربه زنی قابل کنترل است. در عملگر مغناطیسی با اتصال سیم پیچ به منبع تغذیه، هسته به سمت مرکز سیم پیچ کشیده می شود. با کنترل ولتاژ می توان نیرو و انرژی ضربه را کنترل کرد. نتایج به دست آمده را می توان این گونه خلاصه نمود:

- نرم افزار و سخت افزار ضربه زنی طراحی شده است که با گرفتن فرمان از کامپیوتر می تواند فرآیند ضربه زنی را به صورت کنترل شده انجام دهد. در نهایت چند الگوی هنری با موفقیت ضربه زنی شده است.
- حرکت هسته درون سیم پیچ به کمک نرم افزار کامل مدل سازی شده و با نتایج تجربی صحت سنجی شده است.

اضافه نمودن قسمت مخروطی فاصله هوایی را نیز کم می کند و انرژی موجود در فاصله هوایی کاسته شده به انرژی جنبشی هسته تبدیل می شود. اگر پوسته فوقانی و جانبی نباشد، نیرو با نرخ آرام تری افزایش می یابد. مطابق شکل 7 (ه) بیشینه چگالی شار در پایین سولنوئید قرار دارد. در این حالت هسته زمان زیادی دارد تا بتواند چگالی شار را پخش کند، بنابراین در نمودار نیرو، تغییر نرخ کمتر مشاهده می شود و چگالی شار به صورت یکنواخت تری نسبت به حالت عادی در هسته منتشر شده است.



شکل 8 قلمزنی لفظ جلاله "بسم الله الرحمن الرحيم" و دو اثر هنری دیگر به کمک مکانیزم ضربه زن مغناطیسی

- [5] [5] A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, 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, 2015 (In Persian).
- [6] [6] M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262-270, 2015 (In Persian).
- [7] [7] K. Mutschler, S. Dwivedi, S. Kartmann, S. Bammesberger, P. Koltay, R. Zengerle, L. Tanguy, Multi physics network simulation of a solenoid dispensing valve, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 209-221, 2014.
- [8] [8] E. Lisowski, W. Czyżycki, J. Rajda, Three dimensional CFD analysis and experimental test of flow force acting on the spool of solenoid operated directional control valve, *Energy Conversion and Management*, Vol. 70, No. 0, pp. 220-229, 2013.
- [9] [9] C. W. Roh, M. S. Kim, Enhancement of heat pump performance by pulsation of refrigerant flow using a solenoid-driven control valve, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 6, pp. 1547-1557, 2012.
- [10] [10] A. C. Lua, K. C. Shi, L. P. Chua, Proportional assist ventilation system based on proportional solenoid valve control, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 23, No. 6, pp. 381-389, 2001.
- [11] [11] G. Stebner, C. Hartwig, Transient Analysis of an EMVD Using COMSOL Multiphysics, in *COMSOL Conference*, Milan, 2012.
- [12] [12] H. Biller, Dynamic Simulation of Electromagnets, in *COMSOL Conference*, Hannover, 2008.
- [13] [13] M. Vahdati, R. Mahdavinjad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop "ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming" process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68-76, 2014 (In Persian).
- [14] [14] S. R. Ball, *Solenoids, Relays, and Other Analog Outputs*, in: S. R. Ball, *Analog Interfacing to Embedded Microprocessor Systems (Second Edition)*, Eds., pp. 145-169, Burlington: Newnes, 2004.
- [15] [15] Q. Liu, H. Bo, B. Qin, Experimental study and numerical analysis on electromagnetic force of direct action solenoid valve, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 12, pp. 4031-4036, 2010.

- چنانچه زاویه نوک هسته 0 و 10 و 20 درجه باشد نیرو و انرژی ضربه تقریباً ثابت است. زاویه 30 درجه کمترین انرژی ضربه را دارد و از زاویه 30 درجه به بعد با افزایش زاویه نوک هسته، انرژی ضربه نیز افزایش می‌یابد.
- با افزایش جرم هسته، سرعت هسته و انرژی ضربه کاهش می‌یابد، همچنین سوراخ نمودن هسته و کاهش ضخامت جداره آن تا یک میلیمتر تأثیر کمی بر انرژی ضربه دارد.
- وجود پوسته دربرگیرنده سیم‌پیچ مهم است اما ضخامت آن چندان مهم نیست و بدون نگرانی می‌توان ضخامت پوسته را تا نیم میلیمتر نازک نمود. استفاده از پوسته مخروطی در انتهای مسیر حرکت هسته، سبب بهبود نیروی هسته در انتهای مسیر حرکت است. همچنین پوسته اطراف تأثیر بیشتری نسبت به پوسته جانبی بر انرژی ضربه دارد.

6- مراجع

- [1] M. Sedighi, M. Riahi, A. Asgari, Investigation of tool parameters effects on the formability of Al-1100 in incremental sheet metal hammering process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 185-189, 2015 (In Persian).
- [2] [2] T. Schafer, R. D. Schraft, Incremental sheet metal forming by industrial robots, *Rapid Prototyping*, Vol. 11, No. 5, pp. 278 - 286, 2005.
- [3] [3] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, E. Kozeschnik, B. Adjassoh, H. Kaminski, Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 375-378, 2012.
- [4] [4] H. Meier, C. Magnus, V. Smukala, Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 327-330, 2011.