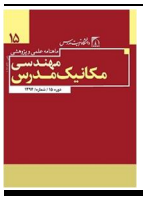
مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 8، ص‌ص 10-18

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



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

محمد ریاحی[1*]، محمد صدیقی[1]، حسن رحمانیان[2]

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

ضربه‌زن مغناطیسی

قلمزنی

نمونه اولیه

چکیده

در این پژوهش مکانیزم طراحی‌شده 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 طراحی‌شده 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 جابجایی هسته محاسبه می‌شود، برای ایجاد قابلیت جابجایی 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، ازاین‌رو زاویه مناسب برای نوک هسته بدست آمده است. ازآنجاکه جرم هسته قابل‌تغییر است تأثیر این پارامتر و سوراخ کردن هسته برای کاهش وزن آن مدنظر قرار گرفته است. درنهایت 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

شکل‌دهی تدریجی[1] برای ساخت نمونه اولیه کاربرد فراوان دارد، در این نمونه شکل‌دهی هیچ‌گونه قالبی نیاز نیست، ورق از اطراف توسط گیره مهارشده و 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

1- Incremental Sheet Metal Forming (ISMF)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

آزمایش نمود و پس از مقایسه و عیب‌یابی آن‌ها، دستگاه ضربه‌زن قابل‌اعتماد برای مصارف صنعتی ساخت. بلیچر [3] از ابزار ضربه‌زن مغناطیسی پیوسته جهت عملیات ساچمه‌زنی استفاده نمود. میر [4] نیز از دو ربات جهت شکل‌دهی ورق استفاده نمود که یکی وظیفه شکل‌دهی روی ورق را دارد و دیگری به‌عنوان قالب عمل کرده از اعوجاج ناخواسته ورق جلوگیری می‌کند. به کمک این روش شکل‌دهی ورق‌های چندلایه را نیز می‌توان شکل داد [5]. برای جلوگیری از نازک شدگی ورق می‌توان شکل‌دهی تدریجی را در چند مرحله انجام داد [6].

برای تولید حرکت خطی روش‌های گوناگونی وجود دارد، گاهی حرکت دورانی را به حرکت خطی تبدیل می‌کنند، گاهی نیز از پیستون‌های بادی و یا هیدرولیکی بدین منظور استفاده می‌شود، اما در این موارد علاوه بر حجم بزرگ دستگاه ضربه‌زن، کنترل ضربه دشوار است و تجهیزات جانبی زیادی نیاز است، ازجمله مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی یا کمپرسور باد یا پک هیدرولیک و غیره. یکی از روش‌های مناسب برای تولید حرکت خطی با فضای کم استفاده از سولنوئید است. سولنوئیدها، گونه‌ای از عملگرهای مغناطیسی هستند که در صورت تحریک هسته را به سمت مرکز سوق می‌دهند. ازاین‌رو می‌توان از سولنوئید برای تولید حرکت خطی استفاده کرد. به کمک سولنوئید می‌توان ضربه را کنترل کرد. با تغییر جریان تحریک قدرت ضربه کنترل می‌شود. نیروی وارد بر هسته یکی از پارامترهای مهم کنترلی محسوب می‌شود [7]. از جمله کاربردهای سولنوئید در شیرهای برقی است. شیرهای برقی برای کنترل جریان سیال [8] و یا در پمپ‌های حرارتی [9] و دستگاه‌های تهویه مطبوع [10] استفاده می‌شوند. استنبر [11] در نرم‌افزار کامسل[1] یک شیر الکتریکی برای موتورهای احتراق داخلی را مدل‌سازی نمود و درجه اطمینان سیستم را توضیح داد. بیلر [12] نیز به کمک همین نرم‌افزار تأثیر جریان گردابی بر سرعت خاموش و روشن شدن یک نمونه سولنوئید را بررسی نمود.

فرآیند قلمزنی یک فرآیند سنتی و زمان‌بر محسوب می‌شود. این فرآیند شباهت زیادی به روش شکل‌دهی تدریجی ضربه‌ای دارد. اما در روش‌های تدریجی که تاکنون استفاده می‌شده است کنترل ضربه امکان‌پذیر نبوده است و ابزار ضربه‌زن با فرکانس ثابت فرآیند شکل‌دهی را انجام می‌داده است. برای مکانیزه نمودن این روش سنتی باید بتوان ضربه را کنترل نمود. در این تحقیق، مکانیزم ضربه‌زن مغناطیسی طراحی شده است که قابلیت کنترل ضربه را فراهم می‌سازد و به کمک آن می‌توان مراحل اولیه قلمزنی را انجام داد. با استفاده از شبیه‌سازی انجام‌شده برخی از پارامترهای هندسی هسته و پوسته سولنوئید ضربه‌زن بررسی‌شده‌اند این پارامترها عبارت‌اند از: 1) زاویه نوک هسته 2) تغییر جرم هسته 3) پوسته‌ی دربرگیرنده سولنوئید. تأثیر این پارامترها بر انرژی ضربه مدنظر قرار گرفته است. شبیه‌سازی به وسیله آزمایش تجربی صحت‌سنجی شده است. درنهایت چند نمونه قلمزنی شده به‌کمک مکانیزم طراحی‌شده ارائه گردیده است.

2- تجهیزات آزمایشگاهی

در فرآیند قلمزنی طراحی‌شده، ابتدا ورق کاملاً مقید می‌شود و ابزار ضربه‌زن با حرکت تدریجی خود به ورق شکل می‌دهد، در اینجا ابزار شکل‌دهنده حرکت ضربه‌ای دارد و فرمان هر ضربه از طرف کامپیوتر صادر می‌شود. اساس کار مکانیزم ضربه‌زنی اعمال ولتاژ به سولنوئید و کشش هسته به سمت مرکز سیم‌پیچ است، این مکانیزم به‌سادگی قابلیت تولید حرکت خطی را دارا است. ازآنجاکه حرکت هسته خطی بوده و سرعت آن زیاد است، به این مکانیزم می‌توان " تفنگ مغناطیسی" اطلاق کرد. در برخی از روش‌های شکل‌دهی تدریجی از ترنسدیوسر اولتراسونیک به‌عنوان ابزار شکل‌دهنده استفاده می‌شود [13]. چنانچه در شکل 1 (ب و د) نشان داده شده است مکانیزم طراحی‌شده از چند بخش اساسی تشکیل‌شده است، الف) بخش تولید فرمان توسط کاربر، ب) ارسال فرمان راه‌اندازی 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 نرم‌افزار طراحی‌شده تولید می‌شود این فرمان مشخص می‌کند چه زمانی ضربه زده شود، فرکانس ضربه‌زنی چقدر باشد، و چگونه تغییر کند و قدرت ضربه چقدر باشد و ضربه‌زنی تا کجا ادامه داشته باشد. داده‌ها پس از ارسال توسط برد الکترونیکی دریافت شده، انرژی موردنیاز ضربه را از منبع تغذیه تأمین می‌کند. با تحریک سیم‌پیچ ضربه با قدرت به سطح ورق نواخته می‌شود. ازآنجاکه ورق‌گیر مانع از حرکت اضافی ورق می‌شود، با اصابت ضربه به ورق اثر ابزار بر روی ورق شکل می‌گیرد.

برای ضربه‌زنی کنترل‌شده با استفاده از سولنوئید، تمهیدات خاصی نیاز است، مثلاً باید بتوان هسته را پس از ضربه‌زنی 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 نمی‌تواند 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 می‌کند. سهولت اتصال مکانیزم طراحی‌شده به ماشین کنترل عددی حائز اهمیت است، به گونه‌ای که اگر مجموعه طراحی‌شده بزرگ و سنگین باشد و یا حجم زیادی را اشغال نماید، اتصال آن بر روی ماشین‌های کنترل عددی کوچک دشوار خواهد بود. همچنین نحوه طراحی باید به گونه‌ای 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 ضربه‌زنی متقارن نباشد، لرزش ابزار ضربه‌زن و اعوجاج ناخواسته افزایش خواهد یافت. ازآنجاکه با تغییر کورس هسته انرژی ضربه تغییر می‌کند، به کمک کنترل کورس حرکتی هسته می‌توان انرژی ضربه را کنترل کرد.

با در نظر گرفتن این پارامترها طراحی صورت گرفته در شکل 1 (الف) مشاهده می‌شود، 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 ضربه‌زن طراحی‌شده می‌توان به‌سادگی پارامترهای ضربه را کنترل نمود، طول اولیه فنر بازگرداننده هسته به‌سادگی قابل‌تغییر است و کورس حرکتی هسته را به‌آسانی می‌توان تنظیم نمود. در این طراحی سعی شده است تقارن محوری حفظ شود تا از تابیدگی مکانیزم در اثر ضربه جلوگیری شود. ارتفاع مکانیزم ضربه‌زن کمتر از 15 سانتیمتر است که امکان استفاده آن در ماشین‌های کنترل عددی کوچک را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین وزن کل مجموعه کم بوده و حجم زیادی را اشغال نمی‌کند. نکته مهم دیگر آن است که برای کار مکانیزم ضربه‌زن اتصال تنها دو سیم نازک به سیم‌پیچ کافی است و نیازی به اتصالات بادی و هیدرولیکی نیست، ازاین‌رو مکانیزم ضربه‌زن به راحتی می‌تواند روی میز حرکت کند، و کار آن آلودگی در بر نخواهد داشت. ازاین‌رو امکان صنعتی نمودن دستگاه وجود دارد.

در روش تدریجی برای شکل‌دهی ورق، آن را ثابت نگه می‌دارند، چنانچه ورق از اطراف مقید شود حین شکل‌دهی میانه ورق که از گیره‌های اطراف

1- Comsol

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

فاصله دارد، فرورفتگی ناخواسته خواهد داشت. همچنین اثر ضربه‌ها بر ورق به درستی آشکار نمی‌شود. برای رفع این مشکل چنانچه در شکل 1 (ج) مشاهده می‌شود از فوم پلی‌استایرن پشت ورق استفاده شده است. یک ورق آلومینیوم باضخامت 0/2 میلیمتر و ابعاد آن 19/5 در 16/5 سانتیمتر بر روی فوم چسب شده است. این چسب ضخامت بسیار کمی دارد و تأثیر آن بر شکل‌پذیری ورق ناچیز است. این فوم که در ماکت‌سازی استفاده می‌شود، در اثر فشار تغییر شکل پلاستیک می‌یابد و ضریب فشار آن با توجه به استاندارد D395 حدود 38% است، با استفاده از این فوم تغییر شکل به محل ضربه منحصر می‌شود و اثر ضربه بر ورق بهتر نقش می‌بندد. با توجه به این‌که فوم کاملاً زیر ورق است و اطراف ورق را در بر نمی‌گیرد، از همه ورق جهت شکل‌دهی می‌توان استفاده کرد.

جدول 1 مشخصات مربوط به سولنوئید

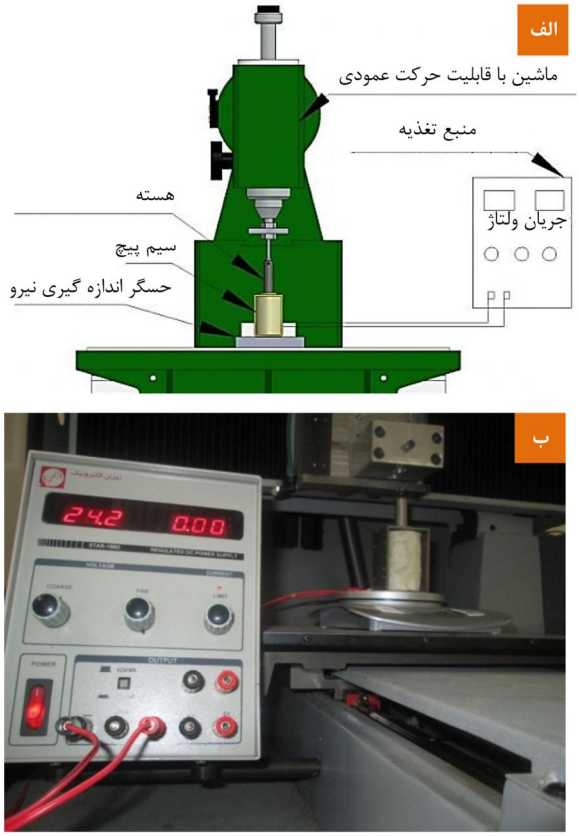
ولتاژ نامی	24 ولت
مقاومت سیم‌پیچ	48 اهم
قطر سیم سیم‌پیچ	0/45 میلیمتر
طول سیم‌پیچ	70 میلیمتر
دور بر واحد طول	55714 دور بر متر
وزن هسته	96 گرم
قطر هسته	16 میلیمتر
طول هسته	73 میلیمتر
ضریب خودالقایی سولنوئید	477 میلی هانری

شکل 1 تجهیزات آزمایشگاهی جهت قلمزنی ورق

البته عمق شکل‌دهی در این روش محدود به ضخامت فوم خواهد بود. این روش مقید کردن ورق برای کارهای هنری مناسب است. درنهایت فوم به روی یک ورق آهنی ضخیم به ضخامت 5 میلیمتر چسب می‌شود. ابعاد ورق ضخیم، کمی بزرگ‌تر از فوم در نظر گرفته شده است تا بتوان به کمک روبند آن را به‌سادگی بر روی میز ماشین کنترل عددی محکم نمود. جزئیات در شکل 1 (ج) نشان داده شده است.

با داشتن مشخصات سولنوئید می‌توان از آن به‌صورت بهینه استفاده نمود. در سولنوئید با کورس کم معمولاً نیرو در انتهای کورس مهم است[7]. برای افزایش انرژی ضربه می‌توان از سولنوئید با کورس زیاد استفاده کرد تا بتوان از انرژی ذخیره‌شده در فضای بین سیم‌پیچ و هسته بهتر استفاده نمود. ازآنجاکه کورس حرکتی متغیر انتخاب شده است می‌توان انرژی ضربه را نیز به کمک سخت افزار تغییر داد. مشخصات مربوط به سولنوئید انتخاب‌شده در جدول 1 آمده است. چنانچه جریان گذرا باشد می‌توان 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 آزمایش‌های انجام شده جهت افزایش قدرت و سرعت ضربه از تحریک 40 ولت گذرا استفاده شده است. در مواردی که از جریان پیوسته استفاده می‌شود، مانند درب‌های قفل شونده، چنانچه از جریان بیش از مقدار نامی استفاده شود، سولنوئید داغ شده و می‌سوزد [14].

چنانچه در شکل 2 مشاهده می‌شود برای آزمایش و محاسبه نیرو در حالت استاتیکی آزمایشی ترتیب داده شده است که در آن نیرو در فواصل مختلف هسته نسبت به سیم‌پیچ به‌دست‌آمده است. تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک دستگاه اندازه‌گیری نیرو و یک ماشین با قابلیت حرکت کنترل‌شده در جهت عمود است.



شکل 2 صحت سنجی نتایج برای بررسی نیرو در سولنوئید

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

چنانچه در شکل 2 مشاهده می‌شود سیم‌پیچ بر روی لودسل قرار گرفته است. در هر گام هسته به کمک دستگاه (4 میلیمتر) در جهت عمود پایین می‌آید، با تغییر ولتاژ منبع تغذیه تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای ولتاژهای مختلف قابل محاسبه است. ازآنجاکه در این آزمایش مکان هسته، حین اندازه‌گیری نیرو ثابت است، آزمایش استاتیکی تلقی می‌شود. از نتایج این آزمایش برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده شده است که در بخش شبیه‌سازی استفاده می‌گردد.

3- شبیه‌سازی

مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی و متقارن محوری انجام شده است، این شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسل انجام شده است. در شکل 3 اجزای مختلف مدل نشان داده شده است. ازآنجاکه برای انتشار میدان مغناطیسی نیاز به شبکه‌بندی الزامی است، در این مثال بین اجزای مختلف سولنوئید هوا در نظر گرفته شده است. چنانچه در شکل 3 مشاهده می‌شود، محور مختصات در پایین در انتهای مسیر حرکت هسته در نظر گرفته شده است، یعنی زمانی که هسته به انتهای مسیر خود می‌رسد، کورس صفر می‌شود. در این شبیه‌سازی کورس حرکتی هسته 50 میلیمتر در نظر گرفته شده است.

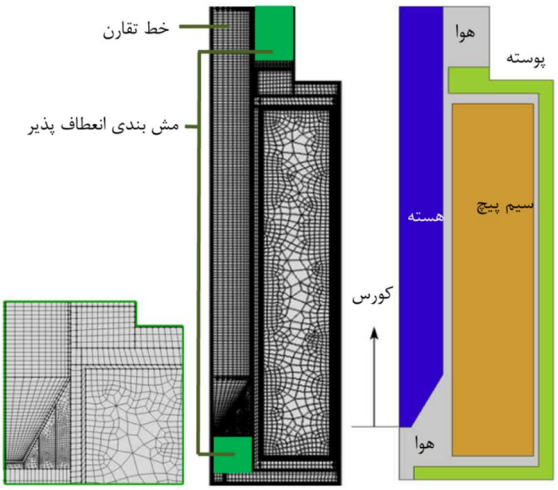
چنانچه مشاهده می‌شود، برای شبکه‌بندی از مش‌های مربعی استفاده شده است. در محیط دوبعدی مش‌های مربعی دقت بالاتری نسبت به مش‌های مثلثی دارند. در اکثر نقاط از مش مقید[1] استفاده شده است بجز در سیم‌پیچ که مش‌بندی مهم نیست و در هوای انتهای نوک هسته که در شکل 3 بزرگنمایی شده است. در این مکان مش‌بندی مقید نامتوازن خواهد بود و از مش آزاد استفاده شده است. البته برای بهبود مش‌بندی، قسمت‌بندی‌های متعددی صورت گرفته است.

در این مدل همه مرزهای اطراف سیم‌پیچ جز خط تقارن دارای شرط مرزی "عایق مغناطیسی[2]" می‌باشند، که برای حل مسئله به‌صورت پیش‌فرض 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 ایجادشده توسط سیم‌پیچ در اطراف آن قابل‌محاسبه 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 می‌نماید. از این ماژول برای ساده‌سازی 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 می‌شود. این معادله دیفرانسیل در هر گام زمانی یک‌بار محاسبه می‌شود. به کمک ماژول سوم، که "مش متحرک[3]" یا "مش انعطاف‌پذیر" است، جابجایی محاسبه‌شده توسط ماژول قبل به مدل اعمال می‌شود. این ماژول تغییر شکل مش را ممکن می‌سازد و به هسته امکان حرکت می‌دهد. در شکل 3 دو ناحیه‌ای که از این نوع مش بندی استفاده می‌کنند مشخص شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اطراف هسته یک ردیف مش مربعی کوچک هوا وجود دارد که کاملاً با هسته جابجا می‌شود. این مش‌ها نیروی هسته را یکنواخت‌تر می‌سازند [11].

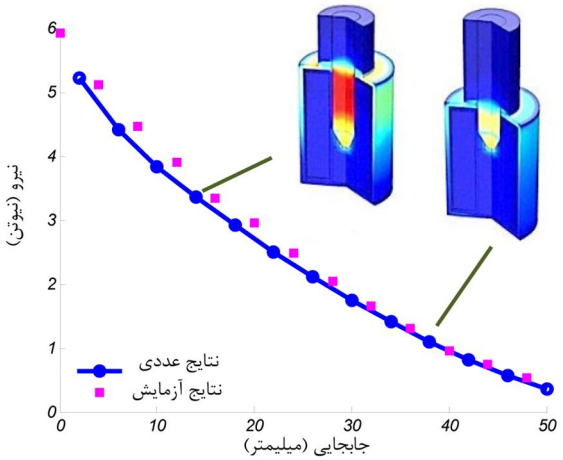
نمودارهای ترسیم‌شده در بخش نتایج جابجایی، نیرو و جریان نسبت به زمان، و نمودار میله‌ای مربوط به حداکثر انرژی جنبشی هسته می‌باشند. حداکثر انرژی جنبشی ضربه به اختصار "انرژی ضربه" نامیده شده است، نمودار جابجایی نسبت به زمان، حرکت هسته را در طول کورس نشان می‌دهد، و زمان موردنیاز برای تولید یک حرکت ضربه‌ای را مشخص می‌نماید. این زمان "زمان ضربه " نام دارد. هرچه این زمان کمتر باشد، فرکانس ضربه‌زنی افزایش خواهد یافت. نمودار نیرو نسبت به زمان نیز تغییرات تدریجی نیروی وارد بر هسته را در طول کورس برای حالات مختلف نشان می‌دهد. به کمک این نمودار می‌توان دریافت که درنهایت چه نیرویی به هسته وارد می‌شود. نیروی وارد بر هسته به اختصار "نیروی هسته" نامیده می‌شود. 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 می‌دهد. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی از آزمایش طراحی‌شده در شکل 2 استفاده شده است. همان‌گونه که بیان شد در این آزمایش نیرو در طول کورس‌های مختلف هسته به‌دست‌آمده است و این روند تا انتهای مسیر حرکتی هسته ادامه یافته است. در این حالت جریان در سیم‌پیچ به مقدار نامی خود در ولتاژ مورد بررسی رسیده است. چنانچه در شکل 4 مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از آزمایش مطابقت خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی دارند.

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



شکل 3 سولنوئید مدل‌سازی شده به همراه مش‌بندی‌های انجام شده



شکل 4 مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج عددی برای صحت‌سنجی مدل‌سازی

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

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

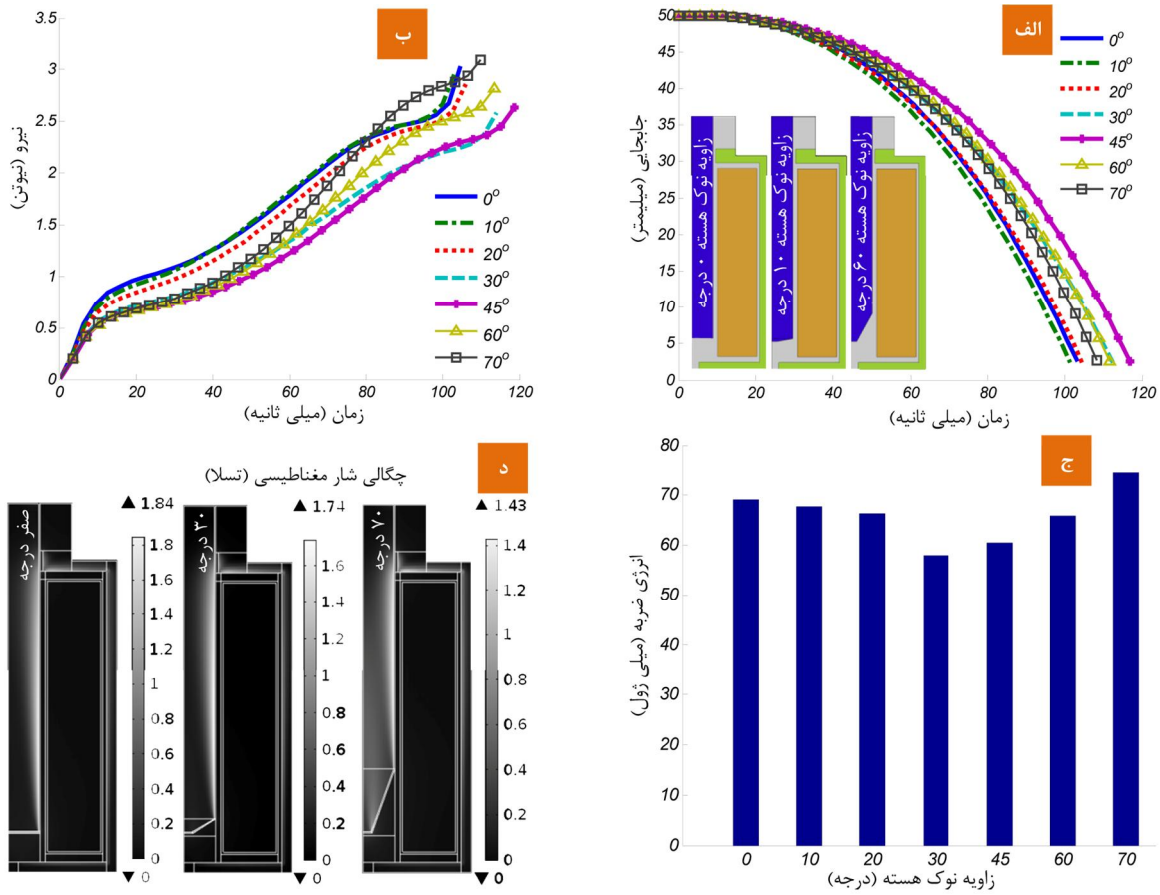
در این رابطه C_r عدد کورانت است که کمتر از یک در نظر گرفته می‌شود، Δl طول کوچک‌ترین مش‌ها در نقاط مختلف است، v سرعت متوسط در نقاط مش و Δt حداکثر گام زمانی است، ازآنجاکه اندازه کوچک‌ترین مش‌ها حدود 0/2 میلیمتر است، چنانچه سرعت بیشینه 4 متر بر ثانیه فرض شود با فرض $C_r = 1$ گام زمانی $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ به دست می‌آید که با امتحان این مقدار و مشاهده نمودار همگرایی جواب مناسب به‌دست‌آمده است، البته در ابتدا کمی زمان نیاز است که همگرایی با گام زمانی کمتر حاصل شود که نرم‌افزار به‌صورت پیش‌فرض 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 دربرگیرنده 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. 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، ازآنجاکه 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

با توجه به این موارد می‌توان 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 می‌یابد.

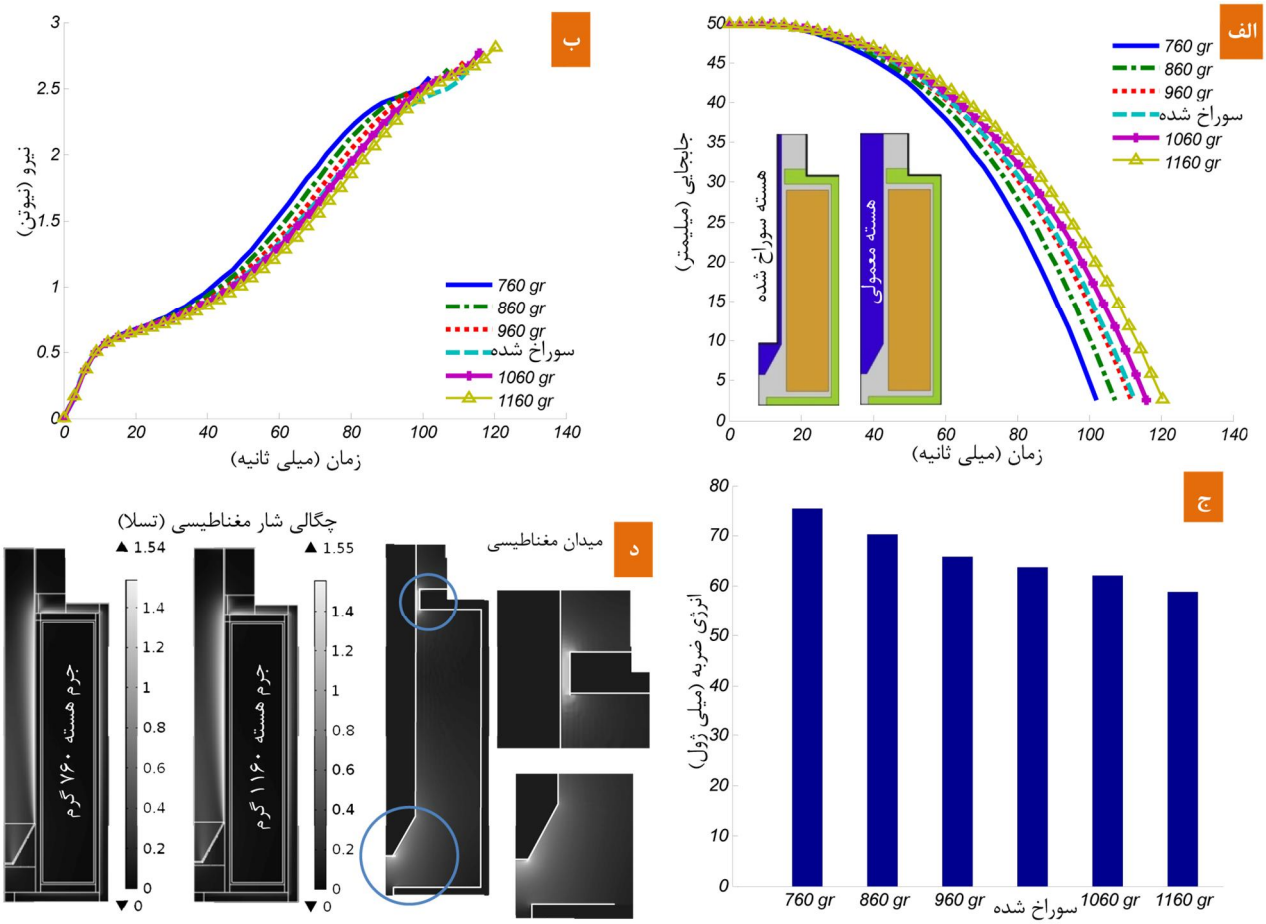
4-2- بررسی تغییر جرم هسته

جرم هسته را می‌توان با افزودن جرم اضافی به بالای آن بیشتر نمود، برای کم کردن جرم نیز می‌توان آن را سوراخ کرد، در شکل 6 (الف) دو نمونه هسته در حالت معمولی و سوراخ شده مشاهده می‌شود. در حالت واقعی وزن هسته 960 گرم است. این بررسی برای وزن‌های 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 میلیمتر است و انتقال شار تنها از طریق جداره صورت می‌گیرد.

همان‌گونه که در شکل 6 (الف) نشان داده شده است هرچه وزن هسته کمتر باشد عکس‌العمل آن سریع‌تر بوده و ضربه زودتر زده می‌شود، هر صد گرم افزایش وزن هسته زمان ضربه را حدود 5 میلی‌ثانیه افزایش می‌دهد، 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 می‌شود که نیروی هسته در همه وزن‌ها در ابتدا و انتهای مسیر باهم برابر است، اما در میانه مسیر، نیروی هسته‌ی سبک‌تر بیشتر است. این امر سبب افزایش سرعت هسته و در نتیجه انرژی جنبشی ضربه می‌شود، چنانچه در شکل 6 (ج) مشاهده می‌شود، انرژی جنبشی ضربه با افزایش وزن به‌صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد، 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 آن‌چنان زیاد نیست که نیاز به جداره ضخیم‌تر وجود داشته باشد. در شکل 6 (د) نیز میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی برای نمونه‌ای از نتایج مشاهده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود میدان مغناطیسی در هسته و پوسته - که از جنس آهن می‌باشند وجود ندارد و تمرکز میدان مغناطیسی در قسمت‌هایی است که دو فلز به هم نزدیک می‌شوند. 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 سنگین‌تر بیشتر است. علت این امر نیز حرکت آرام‌تر هسته و زمان بیشتر برای انتشار شار خواهد بود.

4-3- بررسی پوسته‌های دربرگیرنده سیم‌پیچ

در شکل 7 نمودارهای کورس، نیرو و جریان برحسب زمان و انرژی ضربه برای پوسته‌های مختلف دربرگیرنده سیم‌پیچ نمایش داده شده است. ضخامت پوسته اطراف سیم‌پیچ یکی از پارامترهای موردبررسی است. مدل‌سازی برای سه ضخامت 0/5 ، 1/5 و 2/5 میلیمتر انجام شده است، همچنین مدل‌سازی 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 می‌شود.

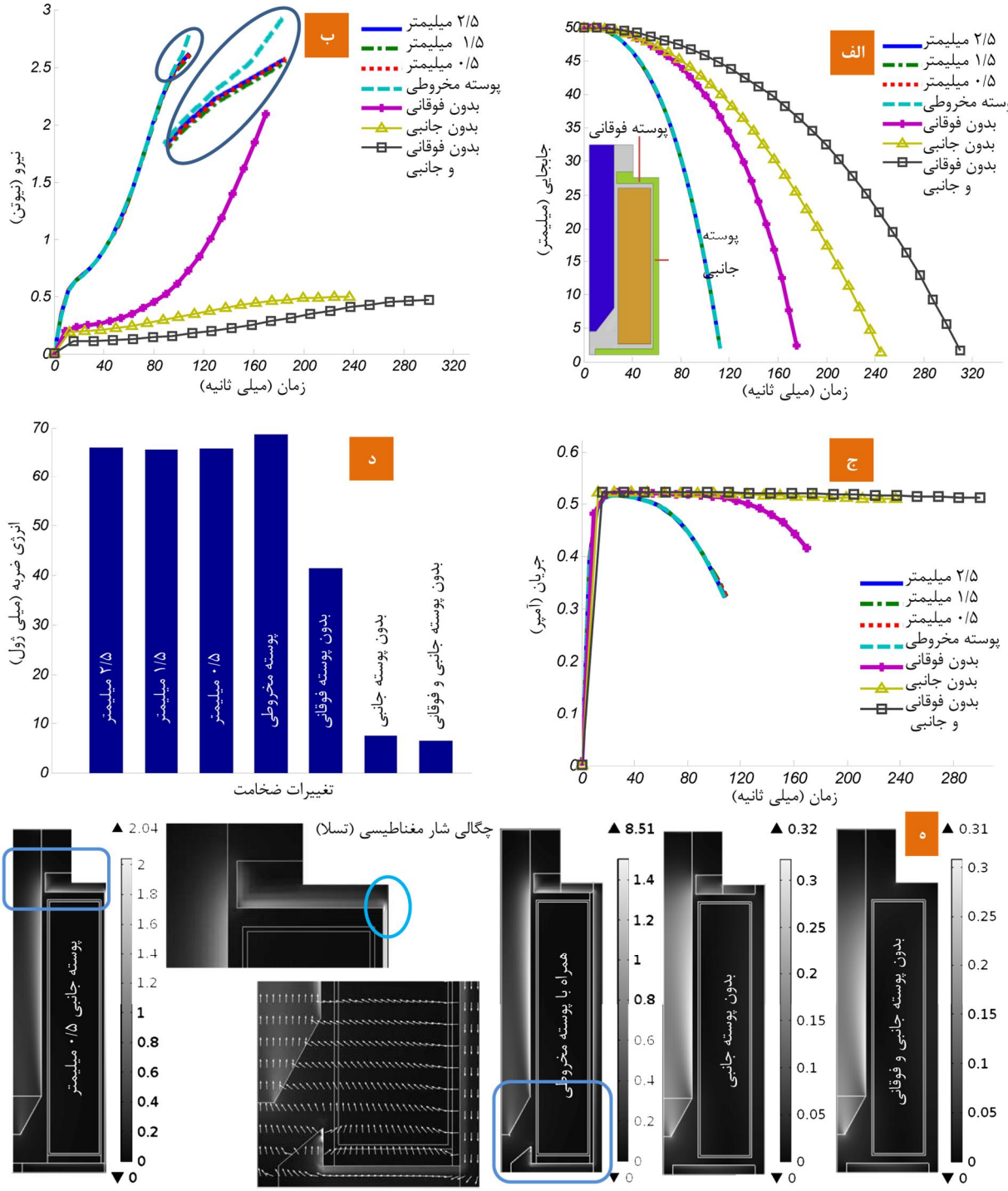


شکل 6 نمودار الف)کورس و ب) نیرو بر حسب زمان و ج) انرژی ضربه برای وزنهای مختلف هسته و د) میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی برای نمونه‌ای از نتایج

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

پوسته اطراف سیم‌پیچ وظیفه انتقال شار مغناطیسی را بر عهده دارد. ازآنجاکه 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 اضافه‌شده 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 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.



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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

اضافه نمودن قسمت مخروطی فاصله هوایی را نیز کم می‌کند و انرژی موجود در فاصله هوایی کاسته شده به انرژی جنبشی هسته تبدیل می‌شود. اگر پوسته فوقانی و جانبی نباشد، نیرو با نرخ آرام‌تری افزایش می‌یابد. 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 می‌شود و چگالی شار به‌صورت یکنواخت‌تری نسبت به حالت عادی در هسته منتشر شده است.

شکل 8 قلمزنی لفظ جلاله "بسم الله الرحمن الرحیم" و دو اثر هنری دیگر به کمک مکانیزم ضربه‌زن مغناطیسی

زمانی که پوسته اطراف نباشد، کاهش نیرو چشم‌گیر است و بیشینه نیروی هسته به 20 درصد حالت عادی می‌رسد. 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 می‌شود که جریان برای حالاتی که جداره اطراف و فوقانی وجود ندارند به مقدار نامی می‌رسد و در آن جریان ثابت باقی می‌ماند که علت آن سرعت پایین هسته است، اما برای ضخامت‌های مختلف و برای پوسته مخروطی این جریان پس از رسیدن به مقدار نامی افت می‌کند و از 0/5 به حدود 0/3 آمپر می‌رسد. علت این امر نیز حرکت سریع هسته مغناطیس شده بین سیم‌پیچ است که طبق "قانون لنز" جریان مخالف در سیم‌پیچ القا می‌کند. زمانی که پوسته فوقانی وجود ندارد افت جریان کمتری مشاهده می‌شود چون سرعت هسته کمتر است. در شکل 7 (د) بیشینه انرژی جنبشی هسته مشاهده می‌شود. برای ضخامت‌های مختلف پوسته تقریباً انرژی ضربه ثابت است. برای پوسته مخروطی 5 درصد این انرژی افزایش می‌یابد. زمانی که پوسته فوقانی وجود ندارد انرژی ضربه 38 درصد کاهش می‌یابد و زمانی که پوسته جانبی وجود ندارد و یا پوسته فوقانی و جانبی وجود ندارند، انرژی ضربه 88 درصد افت می‌کند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود پوسته سیم‌پیچ 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 مهم‌تر از پوسته فوقانی است.

4-4- نمونه‌های قلمزنی شده

برای تولید نمونه‌های قلمزنی، تجهیزات آزمایشگاهی مانند شکل 1 آماده‌شده است. کامپیوتر فرمان مسیر موردنظر را به ماشین کنترل عددی می‌فرستد و فرمان ضربه‌زنی را به بورد الکترونیکی ارسال می‌کند. چنانچه در شکل 8 مشاهده می‌شود، به کمک مکانیزم طراحی‌شده، لفظ جلاله "بسم‌الله الرحمن الرحیم" قلمزنی شده است. برای نشان دادن قابلیت فرآیند فاصله نقاط ضربه‌زنی "بسم" زیاد است و نقاط ضربه زده‌شده کاملاً مشخص می‌باشند. دو طرح قلمزنی دیگر نیز در این شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به خاطر فوم پشت ورق، شکل‌دهی به‌صورت موضعی در مکان ضربه صورت می‌گیرد و کل سطح ورق به سمت پایین نمی‌رود، بنابراین می‌توان با این روش، شکل‌دهی را باظرافت بیشتری مقدور ساخت.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از عملگر مغناطیسی به‌عنوان ضربه‌زن مغناطیسی در فرآیند قلمزنی ورق استفاده شده است. این مکانیزم به ماشین کنترل عددی متصل می‌شود و حین جابجایی آن بر روی مسیر دلخواه، فرمان ضربه ارسال می‌شود و شکل موردنظر بر روی ورق ایجاد می‌شود. در این فرآیند سرعت و زمان ضربه‌زنی قابل‌کنترل است. در عملگر مغناطیسی با اتصال سیم‌پیچ به منبع تغذیه، هسته به سمت مرکز سیم‌پیچ کشیده می‌شود. با کنترل ولتاژ می‌توان نیرو و انرژی ضربه را کنترل کرد. نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان این‌گونه خلاصه نمود:

- نرم‌افزار و سخت‌افزار ضربه‌زنی طراحی‌شده است که با گرفتن فرمان از کامپیوتر می‌تواند فرآیند ضربه‌زنی را به‌صورت کنترل‌شده انجام دهد. درنهایت چند الگوی هنری با موفقیت ضربه‌زنی شده است.
- حرکت هسته درون سیم‌پیچ به کمک نرم‌افزار کامسل مدل‌سازی شده و با نتایج تجربی صحت‌سنجی شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]

- 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. Adjassoho, 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.

[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. Mahdavinejad, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.26.6]