

## تحلیل عددی و بهینه‌سازی چگالی شار مغناطیسی در ناحیه براده‌برداری فرآیند پرداخت کاری با سیال هوشمند

امیر اسماعیل زارع، علی باقری اردکانی، سید مهدی رضاعی\*، عبدالرضا رحیمی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

### کلمات کلیدی:

فرآیند پرداخت کاری

سیال هوشمند

قطعات اپتیک

تحلیل اجزاء محدود

**چکیده:** قطعات اپتیک با توجه به ویژگی‌های طراحی آن‌ها نیازمند دقت پروفایلی و صافی سطح بالا هستند. در فرآیند تولید این قطعات، به دلیل تردی و سختی بالا، آسیب‌های سطحی و زیرسطحی ایجاد می‌شود که برای حذف آن‌ها باید از فرآیند پرداخت کاری استفاده نمود. یکی از این فرآیندها، پرداخت کاری با استفاده از سیال هوشمند است. در این فرآیند با استفاده از میدان مغناطیسی ایجاد شده در ناحیه ماشین کاری، خواص رئولوژیکی سیال هوشمند تغییر می‌نماید که میزان این تغییرات وابسته به چگالی شار میدان مغناطیسی اعمالی است. در این مطالعه تحلیل اجزاء محدود به منظور بهینه‌سازی چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده انجام شده است. با این هدف، بخش ایجاد میدان مغناطیسی به‌عنوان بخش اصلی سیستم پرداخت کاری مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این امر پارامترهای مهم در ایجاد چگالی شار میدان مغناطیسی شناسایی و با استفاده از تحلیل اجزاء محدود مغناطیس اثر هر کدام از پارامترها بررسی شده است. برای طراحی تعداد تحلیل‌ها از روش تاگوچی استفاده شده و نتایج به دست آمده به کمک الگوریتم شبکه عصبی بهینه‌شده است. در نهایت سیستم پرداخت کاری با توجه به مقادیر بهینه ساخته شده و میزان چگالی شار مغناطیسی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که زاویه قطب‌ها، ضخامت پل‌ها و دیواره چرخ سیال بیش‌ترین تأثیر را بر چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده دارد.

### ۱- مقدمه

#### ۱-۱ معرفی فرآیند و مکانیزم پرداخت کاری با سیال هوشمند

در تولید قطعات اپتیک با توجه به عملکرد مورد انتظار از این قطعات در سیستم‌های اپتیک صرفاً از شیشه‌های اپتیک استفاده می‌شود. قطعات مورد استفاده در سیستم‌های اپتیک می‌تواند قطعاتی از قبیل لنز، منشور، آینه اپتیک، پنجره‌های اپتیک و غیره باشند. نقطه مشترک در خواص مکانیکی تمامی مواد انتخاب شده برای ساخت قطعات اپتیک، ترد و سخت بودن آن‌ها است که تولید آن‌ها را با چالش روبرو می‌سازد. همچنین باید توجه داشت که به دلیل عملکرد این قطعات در سیستم‌های اپتیک لازم است آن‌ها دارای دقت هندسی و پروفایل بالا و زبری سطحی بسیار پایین ( $R_a$  کمتر از ۱ نانومتر) باشند. به همین دلیل برای رسیدن به این اهداف باید فرآیند تولید این قطعات دارای شرایط بسیار خاص باشند.

برای تولید این قطعات استفاده از فرآیند سنگ‌زنی یکی از مراحل اصلی بوده که در تمامی این قطعات وجود دارد. در فرآیند سنگ‌زنی با توجه به مکانیزم براده‌برداری که از نوع ایجاد ترک در سطح شیشه و سپس رشد آن و شکست است، آسیب‌های سطحی و زیرسطحی به وجود می‌آید. در قطعات اپتیک با توجه به عملکرد آن‌ها وجود این میکرو ترک‌ها در سطح و زیر سطح قطعه کار مشکل‌ساز خواهند بود. در برخی از قطعات بزرگ اپتیک مانند آینه تلسکوپ‌ها وجود حتی یک میکرو ترک باعث شکستن آینه تحت

وزن خود آینه می‌گردد؛ بنابراین این آسیب‌ها باید در مراحل بعدی تولید قطعات اپتیک حذف گردد [۴-۱].

روش پرداخت کاری با استفاده از سیال هوشمند یکی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در پرداخت کاری قطعات اپتیک دقیق است که در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این فرآیند از یک سیال هوشمند استفاده می‌شود که شامل ذرات آهن کربونیل با قابلیت مغناطیسی شوندگی، ذرات ساینده غیر مغناطیسی، آب یا یک سیال حامل غیرآبی به همراه پایدارسازها یا فعال‌سازهای سطحی می‌باشد [۵ و ۶]. ذرات ساینده غیر مغناطیسی می‌تواند شامل ذراتی مانند اکسید سریم، اکسید آلومینیوم، سیلیکون کارباید و ذرات الماس باشد. سفتی سیال هوشمند در حضور میدان مغناطیسی افزایش یافته و این سیال خمیری شکل به‌عنوان ابزار پرداخت کاری موضعی، عمل برداشت براده را از سطح قطعه کار انجام می‌دهد. قطعه کار مورد نظر در ناحیه پرداخت کاری با توجه هندسه آن حرکت کرده و فرم مورد نظر در سطح قطعه کار ایجاد می‌شود. در شکل ۱ به صورت شماتیک ساختار نوار سیال هوشمند در لحظه ورود به میدان مغناطیسی و برخورد آن با سطح قطعه کار نشان داده شده است.

سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند بر پایه یک چرخ دوار طراحی شده است که وظیفه حمل سیال ساینده و انتقال آن به ناحیه پرداخت کاری را بر عهده دارد. در این فرآیند سیال هوشمند روی چرخ دوار تزریق می‌شود و یک نوار انعطاف‌پذیر می‌سازد. تحت تأثیر شار مغناطیسی سیال هوشمند تبدیل

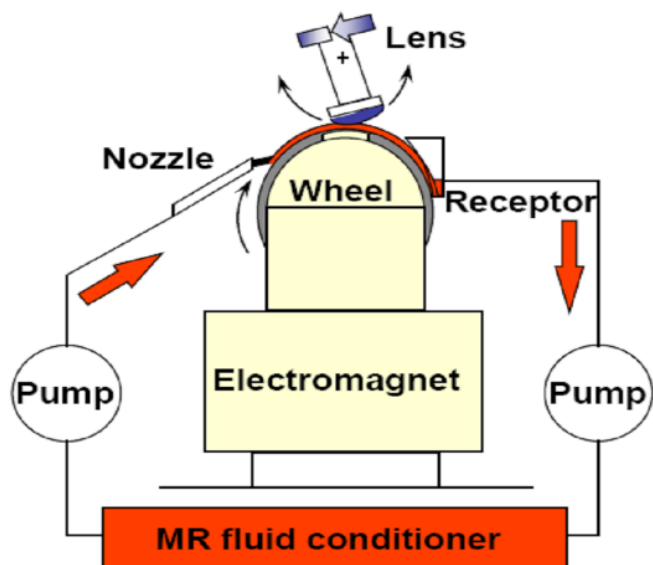


Fig. 2. Components of magnetorheological finishing system [10]

شکل ۲: اجزای سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند [۱۰]

اشباع خود نرسیده باشند.

در این مقاله باهدف ایجاد چگالی شار مغناطیس بالاتر در ناحیه پرداخت کاری، عوامل هندسی در طراحی سیستم انتقال میدان مغناطیسی، شناسایی شده است. این عوامل عبارتند از ضخامت پل های مغناطیس، زاویه پل ها، فاصله هوایی پل ها تا دیواره و ضخامت رویه و دیواره چرخ است. برای بررسی تأثیر این عوامل هرکدام از آن ها در پنج سطح متغیر در نظر گرفته شده است.

برای رسیدن به بالاترین چگالی شار مغناطیسی با توجه به پارامترهای هندسی مؤثر از روش تحلیل اجزاء محدود مغناطیس به وسیله نرم افزار ماکسول برای تجزیه و تحلیل سیستم مغناطیس استفاده شده است. از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای کاهش تعداد تحلیل های کامپیوتری استفاده گردید که تعداد کل تحلیل ها برابر با ۲۵ تحلیل بوده است. خروجی نرم افزار میزان شار مغناطیسی اعمالی به ذرات آهن کربونیل موجود در ناحیه پرداخت کاری است و با استفاده از تحلیل آنالیز واریانس میزان تأثیر هر پارامتر بر روی شار مشخص شده است. سپس با استفاده الگوریتم ژنتیک به تعیین بهینه این پارامترها باهدف رسیدن به بیشینه چگالی شار مغناطیسی در ناحیه پرداخت کاری پرداخته شده است.

#### ۱-۲- مروری بر پژوهش های پیشین

سیال هوشمند به عنوان دسته ای از سیال ها با تنش تسلیم متغیر طبقه بندی می شود که برای اولین بار توسط جاکوب رابینو<sup>۱</sup> در سال ۱۹۴۸ معرفی شد و در کاربردهای مکانیکی مثل پیستون ها و دمپرها ارتعاشی مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. تا مدت ها کاربرد این سیال محدود به کارهای تحقیقاتی در زمینه جذب ارتعاشات و جک های خاص بوده است. برای اولین

به یک نوار یا باند سایشی می شود. استحکام این نوار رابطه مستقیم با شدت شار مغناطیسی، تمرکز ذرات CI، نوع پایدارساز و سیال حامل دارد. سیال روی چرخ رفتار ویسکوپلاستیک از خود بروز می دهد. گردابان مغناطیسی منجر به جذب ذرات مغناطیسی به سطح چرخ دوار شده و ذرات ساینده غیر مغناطیس تحت تأثیر نیروی شناوری روی ذرات آهن قرار گرفته و به سطح قطعه فشرده می شوند. دوران چرخ دوار، باعث کشیده شدن سیال به ناحیه همگرایی بین چرخ و قطعه می شود و در اثر تقابل بین سیال و سطح قطعه کار عملیات براده برداری انجام می شود [۷-۹].

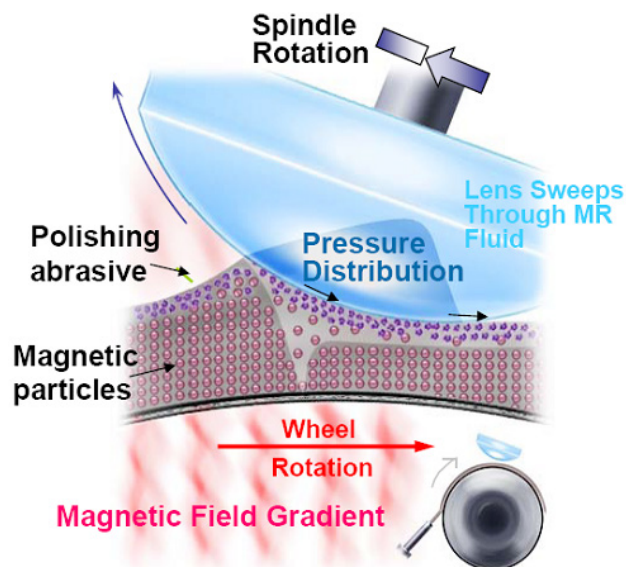


Fig. 1. Schematic of magnetorheological finishing process [10]

شکل ۱: شماتیک فرآیند پرداخت کاری با سیال هوشمند [۱۰]

در شکل ۲ سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند به صورت شماتیک نشان شده است. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، یک سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند از بخش های چرخ سیال، نازل سیال، جاروبک مغناطیسی سیال، پمپ، مخزن و همزن سیال هوشمند و سیستم ایجاد میدان مغناطیس تشکیل شده است [۱۰].

در این تحقیق به طراحی، تحلیل و ساخت قسمت ایجاد مغناطیس پرداخته شده است. همان گونه که اشاره شد، چگالی شار مغناطیسی تأثیر مستقیم بر میزان ویسکوزیته سیال هوشمند دارد و رسیدن به شار مغناطیسی بالاتر می تواند سفتی سیال را افزایش داده و در نتیجه نرخ برداشت براده بالاتری را ایجاد نماید. در سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند ناحیه ایجاد مغناطیس دورتر از ناحیه برداشت براده است (شکل ۲) و باید مغناطیس ایجاد شده در سیم پیچ توسط یوک ها به پل ها و از طریق آن ها به ناحیه ماشین کاری برسد. همچنین یکی از محدودیت های اصلی انتقال شار مغناطیس اشباع شدن و نیز وجود اتلاف در اجزای انتقال دهنده است؛ بنابراین برای رسیدن به شار بالاتر باید میزان جریان عبوری از سیم پیچ افزایش یابد ولی این افزایش جریان تا زمانی کارآمد خواهد بود که اجزای سیستم به حد

بر ذره ساینده درروش پرداخت کاری سایشی مغناطیسی پرداختند. آن‌ها به بررسی چگالی شار مغناطیسی در فاصله بین آهنربای دائمی با شکل‌های مختلف و قطعه کار با جنس‌های متفاوت شامل مواد فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس پرداختند. همچنین آن‌ها در این مطالعه تأثیر جنس فیکسچر آهنربای دائمی و فیکسچر قطعات را موردبررسی و تحلیل قرار دادند. برای شبیه‌سازی دو و سه‌بعدی چگالی شار مغناطیس از نرم‌افزار ماکسول استفاده نمودند. میزان چگالی شار مغناطیس ایجادشده با توجه به جنس قطعه کار بین  $0/6$  تا  $0/4$  تسلا متغیر بوده است. آن‌ها مشاهده نمودند که در آهن‌ربا با قطر ثابت با افزایش ارتفاع چگالی شار و میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. همچنین در آهن‌ربا با ارتفاع ثابت، افزایش قطر باعث کاهش چگالی شار مغناطیس و افزایش تغییرات آن در سطح می‌شود و نیز جنس آهن‌ربا تأثیر چندانی بر چگالی شار مغناطیس ندارد [۲۰].

در مقاله‌ای دیگر وحدتی و رسولی به بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر روی سطوح آزاد پرداختند. در این مطالعه علاوه بر بررسی پارامترهایی همچون میزان گپ، سرعت دورانی، نرخ پیشروی و مقدار پودر، میزان شدت میدان مغناطیس توسط نرم‌افزار ماکسول بررسی و تحلیل شده است [۲۱].

با توجه به این‌که سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند توسط شرکت کیو ای دی تجاری‌سازی شده است، اطلاعات تکنیکی در مورد عملکرد قسمت‌های مختلف و طراحی آن، در دسترس وجود ندارد. با توجه به نیاز کشور در زمینه طراحی و ساخت این سیستم برای اولین بار گروه تحقیقاتی در دانشگاه امیرکبیر به بررسی، طراحی و ساخت این سیستم پرداخته است. در این تحقیق سعی شده است با بررسی سیستم انتقال میدان مغناطیس به ناحیه ماشین کاری به‌عنوان اصلی‌ترین قسمت دستگاه پرداخت کاری، میزان چگالی شار مغناطیسی بهینه تأمین گردد. سایر بخش‌های این دستگاه نیز در دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است.

## ۲- طراحی و مدل‌سازی سیستم پرداخت کاری

### ۲-۱- پارامترهای تأثیرگذار بر چگالی شار مغناطیسی

برای بررسی میزان چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده در فرآیند پرداخت کاری با سیال هوشمند، جلوگیری از اشباع مغناطیس اجزای قرارگرفته در مدار مغناطیس بسیار مهم است. بدین‌صورت که اگر یکی از اجزای موجود در مدار دچار اشباع شود، افزایش جریان یا دور سیم‌پیچ برای بالا بردن قدرت میدان مغناطیس تأثیرگذار نخواهد بود و میزان چگالی شار مغناطیس در ناحیه براده‌برداری تغییر چندانی نخواهد داشت. در نتیجه برای رسیدن به ویسکوزیته موردنیاز ( $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) مشکل به وجود آمده و این امر باعث می‌شود کنترل براده‌برداری و نرخ برداشت براده بیشینه امکان‌پذیر نباشد.

اجزای موجود در مدار مغناطیس برای هدایت میدان مغناطیس از سیم‌پیچ به ناحیه پرداخت کاری عبارت‌اند از: ۱- هسته سیم‌پیچ، ۲- یوک‌های انتقال،

بار ویلیام کوردانسکی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۷ از این سیال برای پرداخت کاری قطعات شیشه‌ای استفاده نمود. ساختار دستگاه پرداخت کاری با سیال هوشمند اولیه با مکانیزم‌های بکار رفته در دستگاه‌های امروزی، بسیار متفاوت بوده است [۱۲].

در دستگاه‌های پرداخت کاری با سیال هوشمند اولیه، از یک قطعه اپتیکی چسبیده به محور دوار دستگاه و یک میز دوار افقی، استفاده گردیده است. در نمونه اولیه میز دوار دارای یک شیار بوده و سیال هوشمند در داخل این شیار با قطعه کار کروی در تماس بوده است. در این مدل امکان ایجاد سطوح غیر کروی به دلیل تماس غیر نقطه‌ای وجود نداشته است. اولین نمونه سیستم پرداخت کاری با چرخ سیال عمودی در سال ۱۹۹۵ با تأسیس شرکت کیو ای دی<sup>۲</sup> با همکاری کوردانسکی ساخته و تجاری‌سازی شد [۱۳ و ۱۴].

جاکوبز<sup>۳</sup> برای پرداخت کاری قطعات کروی، از ترکیب ذرات مغناطیسی (آهن کربونیل)، ذرات ساینده و سیال حامل استفاده کرد و موفق به از بین بردن آسیب‌های زیرسطحی شد. در تحقیق آن‌ها موفق شدند که به سطحی با زبری سطح  $R_a$   $1 \text{ nm}$  و زبری قله تا دره  $(p-v)$  کمتر از  $0/1 \mu\text{m}$  برسند [۱۵]. دیگروت<sup>۴</sup> و همکاران برای بررسی نرخ برداشت براده در فرآیند پرداخت کاری با سیال هوشمند بر روی سه نوع شیشه اپتیکی با خواص مختلف و نیز چندین نوع سرامیک به‌کاررفته در ساخت قطعات اپتیکی مطالعاتی انجام داده است. وی برای انجام آزمایش‌های تجربی از یک سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند با قابلیت صرفاً پرداخت کاری نقطه‌ای استفاده نمود. آن‌ها برای ایجاد میدان مغناطیس در ناحیه پرداخت کاری از بیشینه نیروی محرکه مغناطیس  $9000$  آمپر/دور برای ایجاد چگالی شار مغناطیسی  $0/3$  تسلا استفاده نمودند [۱۶].

پشم‌فروش و همکارانش به بررسی تجربی و عددی فرآیند نانو پرداخت کاری با ذرات ساینده مغناطیسی (MAF) بر روی شیشه اپتیکی BK7 و Zerodur پرداختند. آن‌ها برای ایجاد میدان مغناطیس از آهن‌ربای دائمی استفاده نمودند. جهت تعیین چگالی شار مغناطیس به‌صورت تابعی از فاصله از مرکز آهن‌ربا از نرم‌افزار ماکسول استفاده نمودند. در این مطالعه از چگالی شار مغناطیس جهت تعیین نیروی اعمالی توسط ذرات ساینده بر سطح شیشه استفاده نمودند [۱۷ و ۱۸].

وانگ و همکارانش به بررسی تجربی فرآیند پرداخت کاری با سیال هوشمند شیشه اپتیکی K9 پرداختند. در این مطالعه آن‌ها برای اعمال میدان مغناطیسی بر سیال هوشمند در ناحیه براده‌برداری از آهن‌ربای دائم استفاده نمودند. در این مطالعه سطح موردبررسی تخت بوده و جهت کنترل ویسکوزیته از تغییر فاصله هوایی بین دیسک و آهن‌ربای دائم استفاده نمودند. چگالی شار مغناطیس حاصل از آهن‌ربای دائمی بین  $0/3$  تا  $0/4$  تسلا بوده است [۱۹].

وحدتی و رسولی به اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی وارد

- 1 Willam Kodonsky
- 2 QED
- 3 Jacobs
- 4 DeGroot

۳- پل‌های مغناطیس.

جدول ۱: محدوده تغییرات پارامترهای هندسی

Table 1. Ranges of geometric parameters

پارامتر متغیر	علائم اختصاری	واحد	مقادیر اختصاص یافته
ضخامت پل	$t_p$	mm	۱۶, ۱۵, ۱۴, ۱۳, ۱۲
ضخامت رویه چرخ	$t_s$	mm	۸, ۷, ۶, ۵, ۴
ضخامت دیواره	$t_w$	mm	۱۰, ۹, ۸, ۷, ۶
زاویه پل‌ها	$\theta$	deg	۹۰, ۸۵, ۸۰, ۷۵, ۷۰
فاصله هوایی	$g$	mm	۱, ۰/۸, ۰/۶, ۰/۴, ۰/۲

جدول ۲: طراحی آزمایش تاگوچی

Table 2. Taguchi experiments design

ردیف	$t_p$ (mm)	$t_s$ (mm)	$t_w$ (mm)	$g$ (mm)	$\theta$ (mm)
۱	۱۲	۴	۶	۰/۲	۹۰
۲	۱۳	۵	۶	۰/۴	۸۵
۳	۱۴	۶	۶	۰/۶	۸۰
۴	۱۵	۷	۶	۰/۸	۷۵
۵	۱۶	۸	۶	۱	۷۰
۶	۱۴	۴	۷	۰/۴	۷۵
۷	۱۵	۵	۷	۰/۶	۷۰
۸	۱۶	۶	۷	۰/۸	۹۰
۹	۱۲	۷	۷	۱	۸۵
۱۰	۱۴	۸	۷	۰/۲	۸۰
۱۱	۱۶	۴	۸	۰/۶	۸۵
۱۲	۱۲	۵	۸	۰/۸	۸۰
۱۳	۱۳	۶	۸	۱	۷۵
۱۴	۱۴	۷	۸	۰/۲	۷۰
۱۵	۱۵	۸	۸	۰/۴	۹۰
۱۶	۱۳	۴	۹	۰/۸	۷۰
۱۷	۱۴	۵	۹	۱	۹۰
۱۸	۱۵	۶	۹	۰/۲	۸۵
۱۹	۱۶	۷	۹	۰/۴	۸۰
۲۰	۱۲	۸	۹	۰/۶	۷۵
۲۱	۱۵	۴	۱۰	۱	۸۰
۲۲	۱۶	۵	۱۰	۰/۲	۷۵
۲۳	۱۲	۶	۱۰	۰/۴	۷۰
۲۴	۱۳	۷	۱۰	۰/۶	۹۰
۲۵	۱۴	۸	۱۰	۰/۸	۸۵

برای جلوگیری از به اشباع رسیدن اجزای میدان می‌توان سطح مقطع آن‌ها را بزرگ‌تر در نظر گرفت ولی این امر باعث افزایش وزن سیستم و نیز قیمت آن می‌شود؛ بنابراین باید با کم‌ترین ماده مصرفی بتوان به بیش‌ترین چگالی شار مغناطیس در ناحیه پرداخت‌کاری رسید. برای این امر ابتدا هسته، یوک‌ها و پل‌ها از نظر اشباع بررسی گردیده‌اند که در بخش مدل‌سازی اجزاء محدود به صورت کامل شرح داده شده است. برای کامل شدن مدار مغناطیس باید شار مغناطیس از یک پل به پل بعدی انتقال یابند. با توجه به هندسه سیستم که یک چرخ دوار به عنوان چرخ سیال در بین دو پل قرار می‌گیرند و عمل هدایت سیال را به ناحیه تماس سیال هوشمند و قطعه کار اپتیکی بر عهده‌دارند، تحلیل مغناطیس و پیشینه کردن میدان مغناطیس نیازمند تحلیل عوامل تأثیرگذار بر چگالی شار مغناطیس در بالای چرخ (محل برداشت براده) است. با توجه به اینکه چرخ سیال از مواد فرومغناطیس نبوده و امکان هدایت میدان مغناطیسی را ندارد، پارامترهای طراحی چرخ و نیز محل پل بر روی شار میدان مغناطیس بسیار اهمیت خواهد داشت.

کلیه پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر چگالی شار مغناطیسی در ناحیه پرداخت‌کاری عبارت‌اند از: ۱- ضخامت پل ( $t_p$ )، ۲- ضخامت رویه چرخ ( $t_s$ )، ۳- ضخامت دیواره ( $t_w$ )، ۴- زاویه پل‌ها ( $\theta$ )، ۵- فاصله هوایی ( $g$ ). این پارامترهای هندسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

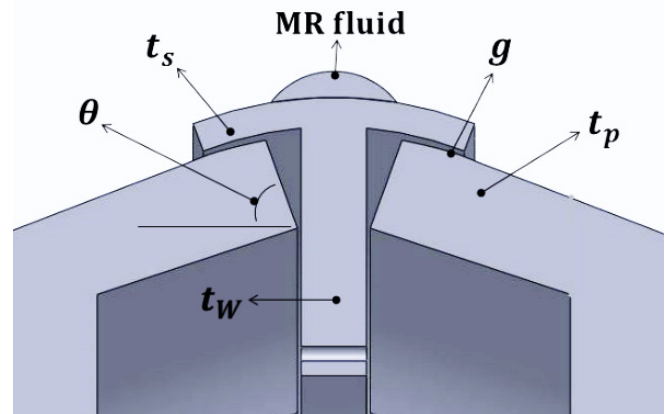


Fig. 3. Effective geometric parameters on magnetic flux density in material removal region

شکل ۳: پارامترهای هندسی مؤثر بر چگالی شار مغناطیس در ناحیه براده‌برداری

برای بررسی تأثیر این پارامترها بر چگالی شار مغناطیس در ناحیه برداشت براده هرکدام از پارامترها در پنج سطح متغیر در نظر گرفته شده‌اند. تعداد فول فاکتوریل آزمایش‌ها برابر ۳۱۲۵ می‌باشد. با توجه به این امر برای کاهش تعداد تحلیل‌های نرم‌افزاری از روش تاگوچی استفاده شده است. با استفاده از این تکنیک تعداد آزمایش‌ها به ۲۵ آزمایش تقلیل یافت. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب محدوده تغییرات پارامترهای هندسی متغیر و آزمایش‌های تعیین شده توسط روش تاگوچی ارائه شده است.



جدول ۳: خواص تراوایی نسبی مواد

Table 3. Relative permeability properties of materials

تراوایی نسبی	محل کاربرد	جنس قطعه
۱	چرخ سیال	فولاد زنگ نزن
۳۰	نوار ساینده	آهن کربونیل
۰/۹۹۹	سیمپیچ	مس

مغناطیس ( $H$ ) و چگالی شار مغناطیسی ( $B$ ) به صورت خطی نبوده نمی توان برای آن یک تراوایی نسبی ثابت تعریف نمود. با توجه به این مسئله خواص فولاد کم کربن ۱۰۰۸ با استفاده از نمودار  $B-H$  آن به نرم افزار معرفی می شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودار با استفاده از آزمایش اندازه گیری قدرت اشباع مغناطیسی<sup>۱</sup> برای فولاد کم کربن ۱۰۰۸ به دست آمده است.

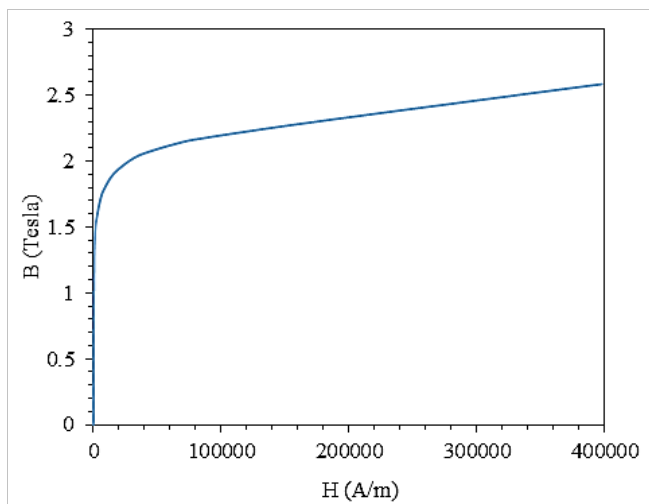


Fig. 4. B-H curve of low carbon steel (1008)

شکل ۴: نمودار  $B-H$  برای فولاد کم کربن ۱۰۰۸

در ابتدا برای اطمینان از به اشباع نرسیدن هسته سیمپیچ، با استفاده روش تحلیل اجزاء محدود هسته از نظر توزیع چگالی شار مغناطیسی بررسی و تحلیل شده است. همان گونه که از نمودار  $B-H$  برای فولاد کم کربن ۱۰۰۸ نشان داده شده در شکل ۵ مشخص است، میزان اشباع چگالی شار مغناطیسی در این ماده در ۲ تسلا اتفاق می افتد. بدین معنی که اگر در قسمتی از هسته چگالی شار مغناطیسی به ۲ تسلا برسد بعد از آن افزایش نیروی محرکه سیمپیچ تأثیری برافزایش چگالی شار در ناحیه براده برداری نخواهد داشت. در شکل ۵ نتایج تحلیل اجزاء محدود هسته سیمپیچ نشان داده شده است. همچنین در نمودار شکل ۶ میزان چگالی شار مغناطیسی ( $B$ ) برحسب فاصله بر روی محور طولی هسته سیمپیچ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد کلیه نقاط دارای چگالی شار مغناطیسی کمتر از ۲ تسلا دارند. پس می توان با اطمینان ادعا نمود که هسته سیمپیچ دچار اشباع نشده

## ۲-۲- مدل سازی اجزاء محدود شار میدان مغناطیس

برای رسیدن به شار میدان مغناطیس مورد نظر در روی چرخ بایستی محاسبات میدان مغناطیس صورت گیرد که با توجه به پیچیده بودن روابط و دخالت عوامل مختلف در محاسبات میدان مغناطیس، از شبیه سازی اجزاء محدود میدان مغناطیس به کمک نرم افزار ماکسول استفاده شده است. نرم افزار ماکسول یک نرم افزار متعارف برای آنالیز میدان های مغناطیسی اجسام الکترومغناطیسی نظیر موتورها و سیمپیچها می باشد. این نرم افزار مبتنی بر روش اجزاء محدود استوار است. به منظور تحلیل مغناطیس در این نرم افزار ابتدا باید مدل سه بعدی مجموعه طراحی شود و بعد از اختصاص خواص مغناطیسی مربوط به هر جنس به قطعه مورد نظر تحلیل انجام شود. در این نرم افزار برای تحلیل مغناطیس از یک نوع مش بندی و اندازه استاندارد استفاده می شود و صرفاً اندازه مش در یک بازه مشخص قابل تغییر است. به همین دلیل بررسی آنالیز حساسیت نوع و اندازه مش ضروری نخواهد بود.

در سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند از یک دیسک با هندسه کروی برای هدایت سیال ساینده به ناحیه براده برداری استفاده می شود. این قطعه بایستی از آلومینیوم یا فولاد ضد مغناطیس (فولاد با درصد نیکل و کروم بالا) ساخته شود تا در میدان مغناطیس ایجاد شده خللی وارد نکند و همچنین ذرات آهن کربونیل به دلیل مغناطیس پسماند به چرخ نچسبد و بتوان بعد از انجام براده برداری آن ها را از سطح چرخ جدا کرد.

به منظور هدایت و اعمال میدان مغناطیس بر روی سیال هوشمند در محل برداشت براده بر روی چرخ از دو پل استفاده می شود. این هدایت میدان باید طوری صورت گیرد که مقدار چگالی شار مغناطیسی در ناحیه براده برداری بر روی چرخ به مقدار مطلوب در حدود ۰/۲ تا ۰/۳ تسلا بتواند برسد که این مقدار توانایی جذب ذرات آهن کربونیل به سطح چرخ و بالا بردن ویسکوزیته سیال هوشمند به مقدار لازم برای فرآیند پرداخت کاری را دارد.

جنس هسته، یوکها و پلها باید به گونه ای انتخاب شود که سطح اشباع بالا و سطح زیر نمودار هیستریزس پایینی داشته باشند. آهن کم کربن (مغناطیس نرم) جهت ساخت یوک مغناطیسی گزینه مناسبی است که دارای چنین ویژگی هایی می باشد. آهن کم کربن دارای درصد پایینی از ناخالصی می باشد. ناخالصی هایی چون کربن، نیتروژن و گوگرد اثرات نامطلوبی روی خواص مغناطیسی فلز خواهد داشت. همچنین سیال ساینده موجود بر روی رویه فوقانی چرخ به شکل یک نوار از جنس آهن کربونیل با خواص مغناطیسی آن مدل شده و تغییرات چگالی شار بر روی ریبون ساینده در ناحیه پرداخت کاری مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل سازی کمک می کند تا بدون نگرانی از تغییرات نامحسوس غیر قابل کنترل، عوامل هندسی مؤثر بر بازده مغناطیسی بررسی شود. در جدول ۳ خواص تراوایی نسبی برای مواد بکار رفته در ساخت سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند ارائه شده است. در مواد فرومغناطیس با توجه به این که رابطه بین میدان

1 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

روی پل ندارد و صرفاً تغییرات این پارامترها بر روی چگالی شار مغناطیسی در ناحیه پرداخت کاری تأثیرگذار است، از تغییرات آن در پل صرف نظر شده است. با مشاهده نمودار شکل ۸ به روشنی می توان متوجه شد که در این قسمت هیچ گونه اشباع مغناطیسی به وجود نیامده است. هسته و پوک ها بعد از ساخت و مونتاژ سیم پیچ در شکل ۹ نشان داده شده است.

### ۳- بررسی نتایج مدل سازی

#### ۳-۱- تحلیل آماری نتایج

نتایج تحلیل اجزاء محدود ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده با توجه به پارامترهای هندسی متغیر و طراحی آزمایش تاگوچی انجام شده در جدول ۴ ارائه گردیده است. در این جدول میزان بیشینه چگالی شار مغناطیسی برای حالت های مختلف برحسب میلی تسلا بیان شده است. برای مشخص شدن تأثیر هر کدام از پارامترهای هندسی بر میزان بیشینه

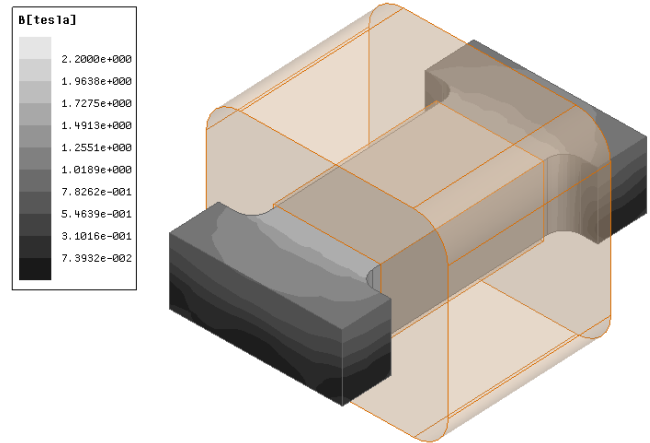


Fig. 5. Finite element analysis result of magnetic core by Maxwell software

شکل ۵: نتایج تحلیل اجزاء محدود هسته مغناطیسی توسط نرم افزار ماکسول

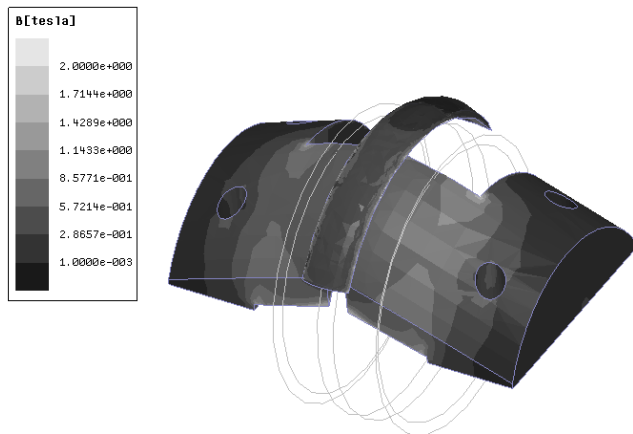


Fig. 7. Finite element analysis result of magnetic poles by Maxwell software

شکل ۷: نتایج تحلیل اجزاء محدود پل های مغناطیسی توسط نرم افزار ماکسول

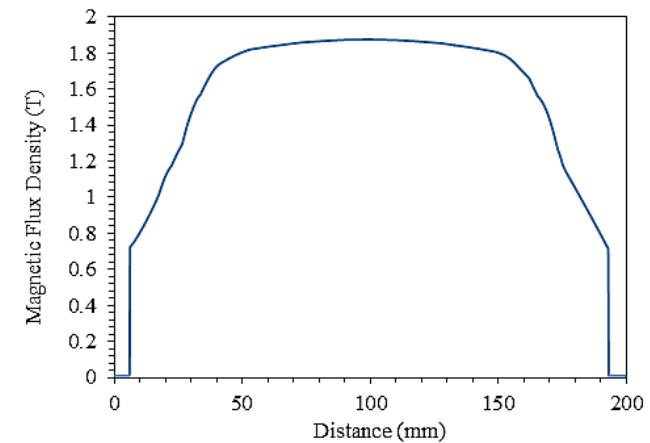


Fig. 6. Curve of Magnetic flux density on the longitudinal axis of the magnetic core

شکل ۶: نمودار میزان چگالی شار مغناطیسی بر روی محور طولی هسته مغناطیسی

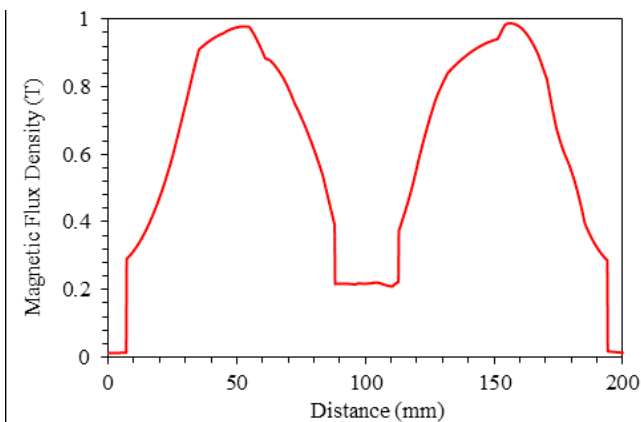


Fig. 8. Curve of Magnetic flux density on the longitudinal axis of the magnetic poles

شکل ۸: نمودار میزان چگالی شار مغناطیسی بر روی محور طولی پل های مغناطیسی

است. میزان نیروی محرکه مغناطیسی اعمالی بر هسته برابر با ۶۰۰۰ آمپر/ دور بوده است. همچنین ابعاد هسته سیم پیچ برابر با  $30 \times 100 \times 180$  میلی متر است. همچنین برای سهولت در مونتاژ و سیم پیچی هسته به صورت I شکل طراحی و ساخته شده است.

در شکل ۷ نتایج تحلیل اجزاء محدود پل های مغناطیسی نشان داده شده است. به منظور سهولت در جمع آوری سیال بعد از گذر از ناحیه برداشت براده، شکل پل ها به گونه ای طراحی شده است که تمرکز میدان مغناطیسی اعمالی بر روی سیال فقط در ناحیه پاشش سیال بر روی چرخ و ناحیه برداشت براده باشد. این امر بدین خاطر است که بعد از عبور سیال از ناحیه برداشت براده، سیال هوشمند به حالت قبلی خود یعنی یک سیال نیوتنی برگشته و جمع آوری آن از روی دیسک آسان تر گردد. نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی در پل های مغناطیسی در نمودار شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به این امر که تغییرات هندسی اعمالی تأثیری بر چگالی شار مغناطیسی بر

جدول ۴: نتایج تحلیل اجزاء محدود بیشینه چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده برحسب پارامترهای هندسی

Table 4. The finite element analysis results of maximum magnetic flux density on material removal region by changing geometric parameters

ردیف	$t_p$ (mm)	$t_s$ (mm)	$t_w$ (mm)	$g$ (mm)	$\theta$ (mm)	$B$ (mT)
۱	۱۲	۴	۶	۰/۲	۹۰	۱۷۶
۲	۱۳	۵	۶	۰/۴	۸۵	۱۲۴
۳	۱۴	۶	۶	۰/۶	۸۰	۹۷
۴	۱۵	۷	۶	۰/۸	۷۵	۸۲
۵	۱۶	۸	۶	۱	۷۰	۷۰
۶	۱۴	۴	۷	۰/۴	۷۵	۱۲۸
۷	۱۵	۵	۷	۰/۶	۷۰	۱۰۳
۸	۱۶	۶	۷	۰/۸	۹۰	۱۰۲
۹	۱۲	۷	۷	۱	۸۵	۸۲
۱۰	۱۴	۸	۷	۰/۲	۸۰	۷۶
۱۱	۱۶	۴	۸	۰/۶	۸۵	۱۴۰
۱۲	۱۲	۵	۸	۰/۸	۸۰	۱۱۰
۱۳	۱۳	۶	۸	۱	۷۵	۸۸
۱۴	۱۴	۷	۸	۰/۲	۷۰	۸۰
۱۵	۱۵	۸	۸	۰/۴	۹۰	۷۸
۱۶	۱۳	۴	۹	۰/۸	۷۰	۱۱۸
۱۷	۱۴	۵	۹	۱	۹۰	۱۰۷
۱۸	۱۵	۶	۹	۰/۲	۸۵	۹۶
۱۹	۱۶	۷	۹	۰/۴	۸۰	۸۳
۲۰	۱۲	۸	۹	۰/۶	۷۵	۷۶
۲۱	۱۵	۴	۱۰	۱	۸۰	۱۲۳
۲۲	۱۶	۵	۱۰	۰/۲	۷۵	۱۰۲
۲۳	۱۲	۶	۱۰	۰/۴	۷۰	۹۲
۲۴	۱۳	۷	۱۰	۰/۶	۹۰	۹۰
۲۵	۱۴	۸	۱۰	۰/۸	۸۵	۷۷

پرداخت کاری میزان چگالی شار مغناطیسی برای تمامی حالتها افزایش یافته و با عبور از ناحیه براده برداری میزان آن به یکباره کاهش می یابد که این کاهش به دلیل طراحی خاص پلها می باشد تا میزان ویسکوزیته سیال هوشمند بعد عبور از ناحیه پرداخت کاری کاهش یابد. اگر میزان چگالی شار بعد از عبور از این ناحیه کاهش نیابد، جمع آوری سیال از روی چرخ با مشکل روبرو می شود؛ بنابراین در این نمودارها به وضوح مشخص است که طراحی پلها صحیح است.

در شکل ۱۱ نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به تأثیر هر یک از پارامترهای



Fig. 9. Core and yokes with assembled winding

شکل ۹: هسته و یوکها به همراه سیم پیچ مونتاژ شده

چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده از روش آنالیز واریانس و از نرم افزارهای دیزاین - اکسپرت و مینیتب استفاده شده است. بهترین مدل پیشنهاد شده مربوط به یک معادله درجه ۲ همراه با اثر تداخل های پارامترهای موجود بوده است که بهترین انطباق را با نتایج خواهد داشت. رابطه بین پارامترهای متغیر و ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$B = 866 - 49.3t_s - 29t_w - 185.2g - 63.18t_p + 0.62\theta + 1.28t_s t_w + 12.6gt_p + 2.1t_s^2 + 1.5t_p^2 \quad (1)$$

مهم ترین فاکتور در آنالیز واریانس، مقدار احتمال ( $P$ ) می باشد که احتمال باطل بودن رخداد یک داده است. لذا بدیهی است که هر چه این مقدار به سمت صفر نزدیک تر شود، قطعیت پارامتر بیشتر است؛ بنابراین هر چه مقدار  $P$  برای یک پارامتر کمتر باشد احتمال تأثیر پارامتر مربوطه بر مدل بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪ که معمولاً مورد استفاده قرار می گیرد، می توان متغیرهای مؤثر را تعیین کرد. در این وضعیت اگر مقدار  $P$  از ۰/۰۵ کمتر باشد، از دیدگاه آماری با اطمینان ۹۵٪ می توان گفت که پارامتر ورودی با اهمیت است. در جدول ۵ نتایج آنالیز واریانس مربوط به مدل ارائه شده نشان داده شده است.

همان گونه که در جدول ۵ مشاهده می گردد، میزان ضریب تعیین این مدل برابر با ۹۸/۹٪ است. همچنین احتمال پیش بینی مدل در خارج از بازه انتخاب شده برای پارامترها بزرگ تر از ۹۵٪ است؛ یعنی در صورتی که بازه پارامترها خارج از گستره انتخاب شده برای آزمایشها، انتخاب گردد، مدل با ضریب اطمینان ۹۵٪ توانایی پیش بینی صحیح را خواهد داشت.

توزیع چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده برای ۵ حالت مختلف از نتایج ارائه شده در جدول ۴ در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از ناحیه براده برداری ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود با نزدیک شدن به محدود

جدول ۵: شاخص‌های ارزیابی طراحی آزمایش برای چگالی شار مغناطیسی

Table 5. Design experiments evaluation indices for magnetic flux density

ردیف	شاخص	مقدار شاخص
۱	انحراف معیار	۳/۲۹
۲	متوسط	۱۰۰
۳	ضریب تغییر	۳/۲۹
۴	پیش‌بینی جمع خطای باقی‌مانده	۷۰۳/۲۱
۵	ضریب تعیین	۰/۹۸۹
۶	ضریب تعیین تنظیم‌شده	۰/۹۸۲
۷	ضریب تعیین خارج از بازه	۰/۹۵۱

هندسی بر روی متوسط میانگین بیشینه چگالی شار مغناطیسی ارائه شده است. با بررسی این نمودار مشخص می‌شود که کاهش ضخامت رویه چرخ بیشترین تأثیر را بر روی چگالی شار مغناطیسی دارد و با افزایش ضخامت رویه میزان چگالی شار در ناحیه براده‌برداری کاهش می‌یابد. همچنین میزان ضخامت دیواره چرخ و پل یک رفتار غیرخطی را در مقابل چگالی شار مغناطیسی خواهد داشت. در ابتدا با افزایش ضخامت پل و دیواره چرخ میزان چگالی شار کاهش یافته و بعد از رسیدن به مقداری خاص تغییر نموده و افزایش آن‌ها باعث افزایش در چگالی شار خواهد شد. همچنین با کاهش میزان فاصله هوایی میزان چگالی شار افزایش می‌یابد. زاویه پل‌ها دارای یک رفتار متفاوت با سایر پارامترها داشته و با افزایش میزان زاویه پل، میزان بیشینه چگالی شار افزایش می‌یابد.

### ۳-۲- بهینه‌سازی پارامترهای هندسی با روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجو در حل مسائل ریاضی است که برای یافتن وضعیت بهینه به کار می‌رود. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند.

درواقع الگوریتم‌های ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کنند. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب گزینه خوبی برای تکنیک‌های پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون هستند. در هوش مصنوعی الگوریتم ژنتیک، یک تکنیک برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به‌عنوان یک الگوی حل مسئله بهره می‌برد. مسئله‌ای که باید حل شود دارای ورودی‌هایی می‌باشد که طی یک فرایند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی، به راه‌حل‌ها تبدیل می‌شود. سپس راه‌حل‌ها به‌عنوان کاندیدا توسط تابع ارزیابی تطابق<sup>۱</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و چنانچه شرایط کافی برای خروج از مسئله فراهم شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. الگوریتم ژنتیک به‌طور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به‌صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند. این الگوریتم‌ها از بخش‌های زیر تشکیل می‌شوند: تابع برازش، نمایش، انتخاب و تغییر.

در این مطالعه برای یافتن بیشینه مقدار چگالی شار مغناطیسی در ناحیه برداشت براده در فرآیند پرداخت‌کاری با سیال هوشمند با توجه به پارامترهای ورودی و اثر هر کدام از آن‌ها، از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف از این کار یافتن مقدار بهینه برای هر کدام از پارامترهای متغیر به‌منظور طراحی و ساخت سیستم پرداخت‌کاری با سیال هوشمند بوده است. برای این امر از نرم‌افزار متلب استفاده شده است که نتایج پارامترهای بهینه با توجه به پارامترهای طراحی در جدول ۶ ارائه شده است. با استفاده از نتایج بهینه به‌دست‌آمده از روش الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی اجزاء محدود دوباره انجام گردید تا میزان بیشینه چگالی شار میدان مغناطیس در ناحیه برداشت براده در فرآیند پرداخت‌کاری با سیال هوشمند محاسبه

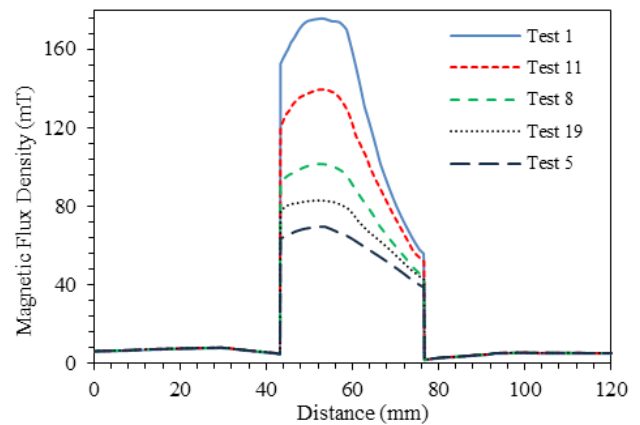


Fig. 10. Curves of Magnetic flux density for 5 different test design modes

شکل ۱۰: نمودار میزان چگالی شار مغناطیسی برای ۵ حالت مختلف طراحی آزمایش

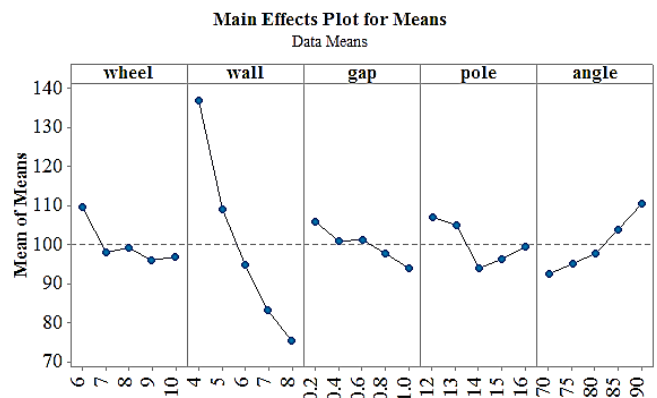


Fig. 11. The effect of geometric parameters on mean magnetic flux density

شکل ۱۱: اثر پارامترهای هندسی بر متوسط میزان چگالی شار مغناطیسی

1 Fitness function



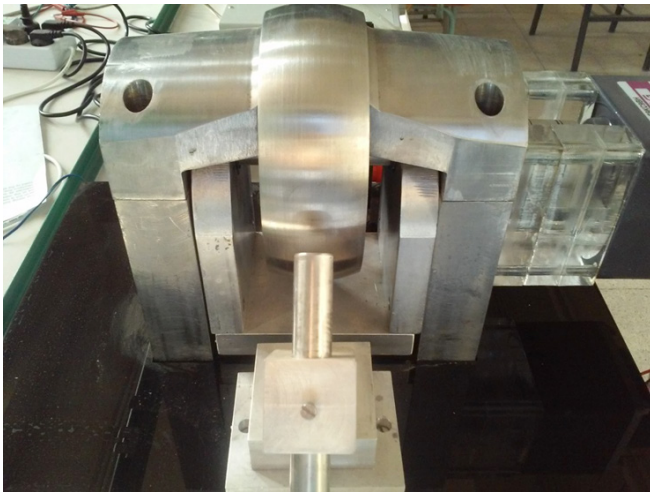


Fig. 13. The magnetic field generation section of magnetorheological finishing system

شکل ۱۳: بخش ایجاد میدان مغناطیسی سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند ساخته شده

چرخ سیال سیستم پرداخت کاری با سیال هوشمند ساخته شده با مقادیر بهینه حاصل از نتایج این مطالعه نشان داده شده است.

برای بررسی نتایج مدل سازی و نتایج تجربی برای میزان شار مغناطیسی از گوس متر مدل MG-3002 محصول شرکت Lutron استفاده شده است. در این گوس متر از سنسور اثر هال برای اندازه گیری میزان شار استفاده شده است. این گوس متر با دقت ۱ میکرو تسلا و در بازه ۳-۰ تسلا می توان شار میدان مغناطیسی را اندازه گیری نماید. میزان شار میدان مغناطیسی در رویه ی چرخ سیال به صورت تابعی از فاصله در راستای محور چرخ سیال اندازه گیری شده است. برای این امر جریان ۱۰ آمپر با ولتاژ ۱۰ ولت به سیم پیچ هسته اعمال شده است. همچنین باید اشاره نمود که سیم پیچ هسته از سیم با قطر ۲ میلی متر ساخته شده و تعداد دور آن برابر با ۶۰۰ دور بوده است؛ بنابراین نیروی محرکه اعمالی به هسته برابر ۶۰۰۰ دور-آمپر بوده است که همین مقادیر برای مدل سازی نیز در نظر گرفته شده است.

برای اندازه گیری میدان، گوس متر در یک نقطه ثابت شده و با استفاده از میز ماشین فرز مجموعه ایجاد میدان مغناطیسی جابجا شده تا میزان شار مغناطیسی در راستای محور چرخ سیال اندازه گیری شود. در حین اندازه گیری سعی شده است تا پراب گوس متر مماس بر سطح رویه باشد. میزان جابجایی میز ماشین فرز در ابتدا تا رسیدن به ۱۰ میلی متری مرکز رویه چرخ دارای گام های ۶ میلی متری بوده و بعد از ۱۰ میلی متر برای نمایش دقیق تر تغییرات گام جابجایی ۳ میلی متر شده است. نتایج اندازه گیری در مقابل نتایج تحلیل اجزاء محدود به کمک نرم افزار ماکسول در نمودار شکل ۱۴ به صورت نقاط توپر نشان داده شده است. با توجه به این که تعداد خروجی نرم افزار به ازای هر ۰/۱۲ میلی متر است، نتایج مدل سازی به صورت خط ممتد نشان داده شده است.

همان گونه که در نمودار شکل ۱۴ مشاهده می گردد، روند نتایج مدل سازی و تجربی مشابه هم بوده و اخلاف نتایج در تعیین بیشینه مقدار

جدول ۶: نتایج مقادیر بهینه حاصل از بهینه سازی الگوریتم ژنتیک

Table 6. The optimum results of genetic algorithm optimization

ردیف	پارامتر	مقدار بهینه
۱	$t_w$	۶
۲	$t_s$	۵/۲
۳	$g$	۰/۱۱۳
۴	$t_p$	۱۲/۱۴
۵	$\theta$	۱۰۹/۷۵

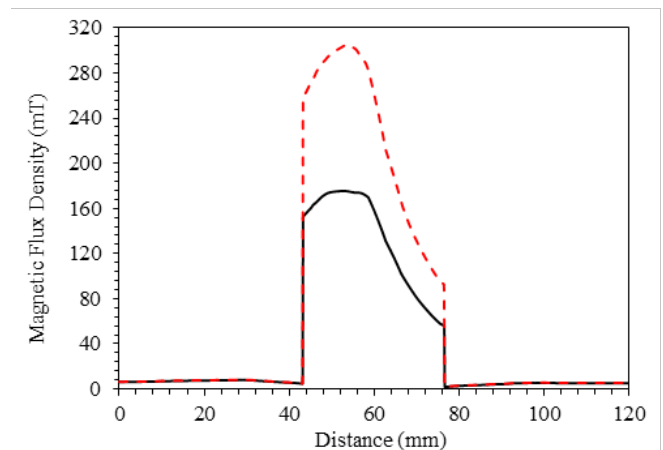


Fig. 12. The magnetic flux density distribution in optimized condition

شکل ۱۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی در شرایط بهینه

گردد. نتایج این تحلیل در نمودار شکل ۱۲ ارائه شده است.

در این نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی در ناحیه براده برداری برای دو حالت مختلف نشان داده شده است. نمودار نشان داده شده با خط چین مربوط به حالت بهینه پارامترها بوده و نمودار نشان داده شده با خط ممتد مربوط به مقدار ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی به دست آمده از طراحی آزمایش می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، میزان چگالی شار در ناحیه براده برداری از ۰/۱۷ تسلا به ۰/۳ تسلا با استفاده از مقادیر بهینه رسیده است.

#### ۴- صحنه گذاری بر نتایج مدل سازی اجزا محدود

پس از انجام بهینه سازی و تعیین مقادیر بهینه برای ابعاد قطعات به منظور رسیدن به بیشینه چگالی شار مغناطیسی در سطح چرخ، قطعات مختلف ساخته شده است. ابعاد بهینه در جدول ۶ ارائه شده اند. با توجه به این مقادیر ضخامت دیواره، ضخامت رویه و فاصله هوایی به ترتیب برابر با ۶، ۵ و ۰/۲ میلی متر و ضخامت پل و زاویه آن به ترتیب برابر با ۱۲ میلی متر و ۱۱۰ درجه ساخته شده است. همان گونه که در مدل سازی نیز ارائه شد، جنس هسته، پل و یوک از فولاد کم کربن ۱۰۰۸ و چرخ سیال از فولاد ضد زنگ و مغناطیسی ۳۱۶ ساخته شده است. در شکل ۱۳ بخش ایجاد میدان مغناطیسی و

هوشمند بر اساس پارامترهای بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داد که می‌توان با انتخاب پارامترهای بهینه بیشینه چگالی شار از ۰/۱۷ تسلا به ۰/۳ تسلا افزایش داد.

۶ با مقایسه نتایج تجربی و عددی مشخص گردید با استفاده از نرم‌افزار ماکسول میزان ماکزیمم شار میدان مغناطیس با خطای کمتر از ۷ درصد پیش‌بینی گردیده و خطای به وجود آمده می‌تواند ناشی از خطای موتناژ یا گوس‌متر مورد استفاده باشد.

## منابع

- [1] A. Esmailzare, A. Rahimi, S. Rezaei, Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur® glass-ceramic, *Applied Surface Science*, 313 (2014) 67-75.
- [2] J.C. Lambropoulos, T. Fang, P.D. Funkenbusch, S.D. Jacobs, M.J. Cumbo, D. Golini, Surface microroughness of optical glasses under deterministic microgrinding, *Applied Optics*, 35(22) (1996) 4448-4462.
- [3] Z. Yao, W. Gu, K. Li, Relationship between surface roughness and subsurface crack depth during grinding of optical glass BK7, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(4) (2012) 969-976.
- [4] A. Esmailzare, H. Gholipour, H. Adibi, S.M. Rezaei, Surface and Subsurface Damage Measurements in Zerodur Glass-Ceramic Grinding Process and their Correlation with Surface Roughness, *Modares Mechanical Engineering*, 15(20) (2016) 332-337.
- [5] M.R. Jolly, J.W. Bender, J.D. Carlson, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, in: *Smart Structures and Materials 1998: Passive Damping and Isolation*, *International Society for Optics and Photonics*, 1998, pp. 262-276.
- [6] B.J. Park, F.F. Fang, H.J. Choi, Magnetorheology: materials and application, *Soft Matter*, 6(21) (2010) 5246-5253.
- [7] M. Ocalan, G.H. McKinley, Rheology and microstructural evolution in pressure-driven flow of a magnetorheological fluid with strong particle-wall interactions, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(9) (2012) 969-978.
- [8] S. Salzman, *Optimal magnetorheological fluid for finishing of chemical-vapor-deposited zinc sulfide*, University of Rochester, 2016.
- [9] T.S. Bedi, A.K. Singh, Magnetorheological methods for nanofinishing—a review, *Particulate Science and Technology*, 34(4) (2016) 412-422.
- [10] C. Miao, *Frictional forces in material removal for glasses and ceramics using magnetorheological*

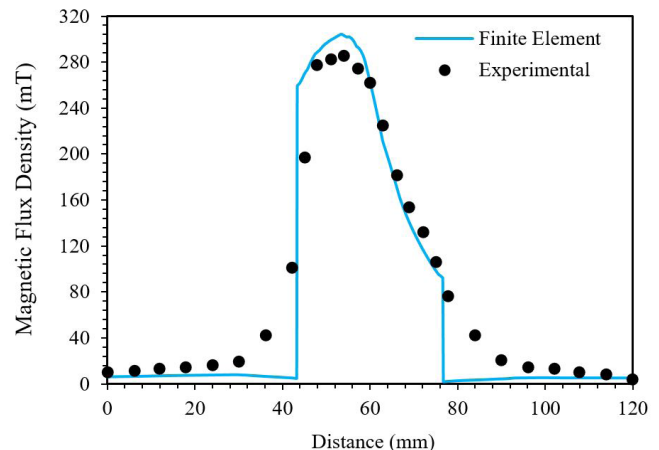


Fig. 14. Valuation of experimental and numerical result

## شکل ۱۴: مقایسه نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود و تجربی

شار میدان مغناطیس برابر با ۷ درصد بوده است. این اختلاف می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: ۱- افزایش فاصله هوایی در حین موتناژ قطعات ۲- گوس‌متر استفاده‌شده دارای یک پراب با قطر ۱۰ میلی‌متر است و به‌صورت یک نقطه نمی‌باشد و بنابراین محل بیشینه چگالی شار را نمی‌تواند مشخص کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات انجام‌شده در این مقاله نتایج زیر برای بررسی میزان چگالی شار مغناطیسی در ناحیه براده‌برداری فرآیند پرداخت‌کاری با سیال هوشمند، حاصل گردید:

۱. یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی و ساخت سیستم‌های مغناطیسی بحث اشباع اجزای انتقال میدان است. نتایج تحلیل اجزاء محدود مغناطیس نشان داده که طراحی صورت گرفته صحیح بوده و هیچ‌گونه اشباع مغناطیسی در سیستم انتقال مغناطیس به وجود نیامده است.
۲. مشاهده گردید پارامترهای هندسی در طراحی سیستم مغناطیسی، تأثیر بسیار زیادی بر ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی اعمالی بر سیال هوشمند دارد. ضخامت دیواره چرخ سیال بیش‌ترین تأثیر و ضخامت رویه چرخ و فاصله هوایی کم‌ترین تأثیر را بر روی بیشینه چگالی شار مغناطیسی را دارد.
۳. میزان زاویه پل‌ها دارای تأثیر بسیار بالایی بوده به‌صورتی که با افزایش میزان این زاویه از ۹۰ درجه میزان چگالی شار مغناطیسی به‌شدت افزایش می‌یابد.
۴. تحلیل آماری نشان داد که کلیه پارامترهای انتخاب‌شده بر چگالی شار مغناطیسی تأثیرگذار بوده و با مدل ارائه‌شده توسط تحلیل آنالیز واریانس با دقت بالایی (خطای کمتر از ۰/۰۱) می‌توان میزان چگالی شار مغناطیسی را بر اساس پارامترهای ورودی پیش‌بینی نماید.
۵. نتایج تحلیل چگالی شار مغناطیسی در ناحیه براده‌برداری با سیال

- nanodiamonds and glass in magnetorheological finishing (MRF)*, University of Rochester. Institute of Optics, 2007.
- [17] F. Pashmforoush, A. Rahimi, Nano-finishing of BK7 optical glass using magnetic abrasive finishing process, *Applied optics*, 54(9) (2015) 2199-2207.
- [18] F. Pashmforoush, A. Rahimi, Numerical-experimental study on the mechanisms of material removal during magnetic abrasive finishing of brittle materials using extended finite element method, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(9) (2016) 1498-1510.
- [19] Y. Wang, S. Yin, H. Huang, Polishing characteristics and mechanism in magnetorheological planarization using a permanent magnetic yoke with translational movement, *Precision Engineering*, 43 (2016) 93-104.
- [20] M. Vahdati, S.A. Rasouli, Measurement and simulation of the magnetic flux density exerted on the abrasive particles in Magnetic abrasive finishing (MAF), *Measurement*, 2 (2016) 3.
- [21] S.A. Rasouli, M. Vahdati, Study of significant factors on magnetic abrasive finishing on freeform surface, *Modares Mechanical Engineering*, 16(4) (2016) 248-258.
- finishing*, University of Rochester, (2010).
- [11] J. Rabinow, The magnetic fluid clutch, *Electrical Engineering*, 67(12) (1948) 1167-1167.
- [12] W. Kordonsky, Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 122(1-3) (1993) 395-398.
- [13] D. Golini, S.D. Jacobs, W.I. Kordonski, P. Dumas, *Precision optics fabrication using magnetorheological finishing*, in: Advanced Materials for Optics and Precision Structures: A Critical Review, International Society for Optics and Photonics, 1997, pp. 102890H.
- [14] D.C. Harris, *History of magnetorheological finishing*, in: Window and Dome Technologies and Materials XII, International Society for Optics and Photonics, 2011, pp. 80160N.
- [15] S.D. Jacobs, D. Golini, Y. Hsu, B.E. Puchebner, D. Strafford, I.V. Prokhorov, E.M. Fess, D. Pietrowski, W.I. Kordonski, *Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing*, in: International Conference on Optical Fabrication and Testing, International Society for Optics and Photonics, 1995, pp. 372-383.
- [16] J.E. DeGroot, *Surface interactions between*

Please cite this article using:

A. Esmailzare, A. Bagheri Ardakani, M. Rezaei, A. Rahimi, Numerical Analysis and Optimization of Magnetic Flux Density in the Polishing Process with Magnetorheological Fluid, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 577-588.  
DOI: 10.22060/mej.2017.12146.5269

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



