



Design And Development of Ball-End Magnetorheological Finishing Tool for Nano Polishing of BK7 Glass

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Derakhshan-Samani M¹,
Rahimi A^{1*}

How to cite this article

Derakhshan-Samani M, Rahimi A. Design And Development of Ball-End Magnetorheological Finishing Tool for Nano Polishing of BK7 Glass. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(06):357-366.

ABSTRACT

Surface quality and roughness are major effective parameters on the function of optic components. This study developed a new design of the Ball-End Magnetorheological finishing tool with the ability to mount on a three-axis CNC milling. In the new design, a new concept of the cooling system was used for cooling the internal and external surfaces of the electromagnetic coil, and optimizations on magnetic flux distribution were performed. With the aid of magnetostatic simulation in Ansys Maxwell software, the tool's capability for producing magnetic flux density was tested. The capability of a new tool for polishing non-ferromagnetic BK7 glass was tested by selecting optimized process parameters like working gap and magnetizing current. An experimental magnetic flux density test with the gauss meter showed that the newly designed BEMRF tool can generate enough magnetic flux density for polishing BK7 glass. The finishing test showed the tool's ability to create enough indentation force on the workpiece's surface and reduce surface roughness.

Keywords Magnetorheology, BEMRF, Nano Finishing, Ball-End MRF, Magnetic Flux Density, BK7

¹ Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: No. 350, Hafez Ave, Valiasr Square, Tehran, Iran

rahimi@aut.ac.ir

Article History

Received: February 20, 2023

Accepted: March 09, 2023

ePublished: June 16, 2023

CITATION LINKS

1- Magnetorheological ball end finishing process. 2- Experimental investigations on the effect of relative particle sizes of abrasive and... 3- Process parameter effects on material removal in... 4- Nanofinishing of BK7 glass using a magnetorheological solid rotating core tool. 5- Magnetorheological nanofinishing of BK7 glass for lens manufacturing. 6- Magnetorheological finishing. 7- Nanofinishing of a typical 3D ferromagnetic workpiece using... 8- Nanofinishing of freeform surfaces of prosthetic knee joint implant. 9- Nanoindentation hardness of particles used in magnetorheological finishing... 10- Experiments and observations regarding the mechanisms of glass removal in magnetorheological finishing. 11- Design and development of nanofinishing process for. 12- Selection of optimum polishing fluid composition for... 13- Experimental investigation into ball end magnetorheological finishing of silicon. 14- Rheological characterization of MR polishing fluid used for... 15- Spot nanofinishing using ball nose magnetorheological solid rotating core tool. 16- Deterministic magnetorheological finishing 17- A novel ball end magnetorheological finishing process. 18- Nanofinishing of copper using ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process. 19- A study on the effect of polishing fluid volume in ball end magnetorheological finishing process. 20- Magnetorheological nanofinishing of BK7 glass for lens manufacturing. 21- Modeling of surface roughness in ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process.

طراحی و ساخت ابزار نانوپرداخت مگنتورئولوژیکی سر کروی جهت پرداخت BK7

محسن درخشان سامانی^۱، عبدالرضا رحیمی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

کیفیت سطح و صافی سطح نهایی قطعات اپتیک مثل انواع لنزها در عملکرد آن‌ها بسیار اثرگذار است. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی مگنتورئولوژیکی، طرحی جدید از ابزار مگنتورئولوژیکی سر کروی با قابلیت نصب بر ماشین فرز CNC سه محوره ارائه شده است. در طرح جدید از سیستم خنک‌کاری سیم‌پیچ مغناطیسی دوگانه در سطوح داخلی و خارجی سیم‌پیچ الکترومغناطیسی استفاده شده و توزیع چگالی شار مغناطیسی بهینه‌سازی شده است. قابلیت ایجاد چگالی شار مغناطیسی ابزار توسط شبیه‌سازی در نرم‌افزار ماکسول محک زده شده است. با انتخاب بهینه پارامترهای فرآیندی شدت جریان الکتریکی و فاصله کاری، قابلیت انجام پرداخت ابزار جدید برای پرداخت قطعات غیرفرومغناطیسی از جنس شیشه BK7 بررسی شده است. در تست تجربی اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی توسط گوس‌متر مشاهده شد که ابزار جدید قابلیت ایجاد چگالی شار مغناطیسی کافی برای پرداخت شیشه را دارد. همچنین قابلیت اعمال نیروی عمود بر سطح این ابزار با تست پرداخت ابزار بررسی شد که نتایج نشان دادند این ابزار قابلیت اعمال نیروی فروری کافی بر سطح قطعه کار و پرداخت قطعه در جهت کاهش زبری سطح را دارد.

کلیدواژه‌ها: نانوپرداخت، مگنتورئولوژیکی، ابزار مغناطیسی سر کروی، BEMRF، چگالی شار مغناطیسی، BK7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

*نویسنده مسئول: rahimi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

در فرآیندهای ساخت قطعات دقیق اپتیک، پرداخت نهایی سطوح نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت، استحکام و قابلیت اطمینان این قطعات دارد^[1]. با توسعه انواع جنس‌های جدید برای قطعات صنعتی، تقاضا برای قطعاتی با کیفیت سطح در مقیاس نانومتر در جهت تأمین الزامات خاص آن‌ها بیشتر شده است^[2].

لنزهای از جنس BK7 یکی از شناخته شده ترین انواع شیشه مورد مصرف در صنایع اپتیک هستند که قابلیت‌های ویژه مکانیکی و اپتیک آن در دهه‌های گذشته روز به روز بیشتر شناخته شده است^[3]. امروزه در صنایع اپتیک تقاضای بسیاری برای پرداخت این نوع از شیشه برای استفاده در انواع لنزهای اپتیک وجود دارد^[4,5].

برای اولین بار کوردونسکی و جاکوب روش نانوپرداخت مگنتورئولوژیکی یا MRF (Magnetorheological Finishing) را برای پرداخت لنزهای اپتیک معرفی کردند^[6]. این روش بر اساس نانوپرداخت مگنتورئولوژیکی بر پایه سیال دارای خواص مغناطیسی است که خواص رئولوژیکی (rheological) آن از جمله

ویسکوزیته سیال در حضور میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. این سیال که سیال مگنتورئولوژیک یا MR نامیده می‌شود حاوی پودر کربونیل آهن یا CIP (Carbonyl Iron Powder)، دانه‌های ساینده، سیال حامل و مواد افزودنی تثبیت‌کننده یکنواختی سیال می‌باشد که می‌تواند قطعات اپتیک را بدون ایجاد صدمات سطحی یا زیر سطحی پرداخت کند^[7] و یا در مواردی این عیوب سطحی و زیر سطحی که ناشی از فرآیندهای پرداخت قبلی بوده اند را در فرآیند نانوپرداخت حذف کند^[8].

شوری و همکارانش انواع مواد ساینده و اثر سختی آن‌ها را بر روی کیفیت سطح پرداخت شده شیشه در روش MRF بررسی کردند^[9]. آن‌ها مواد مختلفی در سیال پرداخت کننده را در حالتی که سیال حامل از آب (aqueous) تشکیل شده بود برای پرداخت شیشه استفاده کردند و نشان دادند که پرداخت شیشه در حضور آب موجب تشکیل لایه هیدراته روی شیشه و نرم شدن سطح شیشه می‌شود. علاوه بر این، مواد ساینده از جنس سریم اکسید در حضور آب به علت واکنش دندان شیمیایی دانه‌های سریم اکسید و شیشه بهتر می‌تواند رخ دهد^[10]. میائو و همکارانش پرداخت شیشه بروسیلیکات و اثرات پارامترهای فرآیندی مثل درصد مواد ساینده سیال، عمق نفوذ دانه ساینده در سطح، شدت میدان مغناطیسی و سرعت دورانی چرخ MRF در نرخ باربرداری را بررسی کردند^[3].

سینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ روشی برگرفته از MRF برای نانوپرداخت سطوح سه‌بعدی به نام پرداخت مگنتورئولوژیک با ابزار سر کروی یا BEMRF (Ball-End Magnetorheological finishing) را معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند این روش ابداعی قابلیت پرداخت مواد فرومغناطیسی مثل فولاد را تا کیفیت سطح ۷۰ نانومتر در مدت زمان ۱۰۰ دقیقه پرداخت را دارد. در این روش که برخلاف MRF قطعه کار ثابت است و ابزار استوانه‌ای شکل به همراه سیم‌پیچ مغناطیسی پیرامونی خود حول محور ابزار دوران می‌کنند، سیال مگنتورئولوژیک نوک ابزار که حامل پودر کربونیل آهن به همراه مواد ساینده در سیال حامل متشکل از روغن یا آب است عملیات پرداخت را در حضور میدان مغناطیسی انجام می‌دهد. در این ابزار سیال پرداخت‌کننده از میان راهگاه میانی ابزار در ابتدای هر مرحله پرداخت توسط پمپ به ناحیه پرداخت تزریق می‌شود^[11,12].

سینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ طرح جدیدی از ابزار BEMRF ارائه کردند که در طرح جدید سیم‌پیچ مغناطیسی ثابت و هسته مغناطیسی آن به عنوان ابزار پرداخت حول محور خودش دوران می‌کرد. با این کار ارتعاش کمتر و خنک کاری سیم‌پیچ راحت تر شد. آن‌ها نشان دادند که با روش BEMRF برای قطعات فرومغناطیس می‌توان به نتایج بهتری از پرداخت قطعات غیرفرومغناطیسی رسید^[1]. ساراواتما و همکارانش در سال ۲۰۱۵ از ابزار جدید BEMRF برای پرداخت ویفرهای سیلیکونی توسط

مغناطیسی در سطح قطعات فرومغناطیس است^[18]. بنابراین قبل از ساخت ابزار نیاز است تا با تغییرات ساختاری در ابزار، چگالی شار مغناطیسی تقویت شده و این محدودیت رفع شود. در نتیجه مطالعه چگونگی توزیع چگالی شار مغناطیسی در ناحیه پرداخت برای دستیابی به نیروهای عمود بر سطح کافی بر روی سطح قطعه کار بسیار مهم می‌باشد.

مشکل دیگر این است که در طرح پیشین ابزار BEMRF از ابزاری استفاده شده است که دارای راهگاه میانی برای تغذیه سیال در سیکل‌های پرداخت است. در این ابزار سیال MR بعد از همگن شدن در همزن، با عبور از لوله و اتصالات مختلف از میان راهگاه مرکزی هسته مغناطیسی ابزار به ناحیه پرداخت تزریق می‌شود. تزریق سیال MR در این ابزار دائمی نیست و بعد از هر بار تزریق سیال MR به اندازه کافی به محل پرداخت، با برقرار شدن میدان مغناطیسی، جریان سیال متوقف می‌شود. بعد از مدت زمان مشخص پرداخت (بسته به جنس قطعه کار و سیال) جریان الکتریکی قطع شده و با تزریق سیال MR جدید سیال MR قبل جایگزین می‌شود و در صورت لزوم مرحله دیگری از پرداخت انجام می‌گیرد. وجود راهگاهی با نفوذپذیری مغناطیسی بسیار کمتر از هسته مغناطیسی ابزار، افت ناگهانی چگالی شار مغناطیسی در مرکز ابزار را به همراه خواهد داشت و در نتیجه توزیع نایک‌نواختی از چگالی شار مغناطیسی را موجب خواهد شد^[15]. راهگاه عبور سیال علاوه بر این که موجب توزیع نامناسب شار مغناطیسی در نوک ابزار می‌شود، به دلیل وجود ذرات CIP و دانه‌های ساینده مستعد خوردگی شدید در اثر عبور سیال است. علاوه بر این سیال MR که قبل از عبور از راهگاه ابزار در همزن مخلوط شده و توزیعی یکنواخت از دانه‌های CIP و ساینده پیدا کرده است با عبور از راهگاهی که مغناطیسی شده است یا میدان مغناطیسی باقیمانده از مرحله‌های پرداخت قبلی در آن موجود است، این توزیع نیست و فقط بین مراحل پرداخت تزریق می‌شود نیازی به استفاده از راهگاه برای ابزار نمی‌باشد. همچنین در صورت حذف سوراخ میانی و وارد کردن سیال MR از خارج از ابزار به ناحیه پرداخت می‌توان ابزار BEMRF را به فرز CNC متصل نمود.

چگونگی توزیع میدان مغناطیسی در فاصله کاری یکی از مهم‌ترین موارد مؤثر در پرداخت به روش BEMRF می‌باشد. در مکانیزم پرداخت MRF میدان مغناطیسی کاهشی در ناحیه پرداخت از منبع میدان مغناطیسی تا سطح قطعه کار است که ذرات CIP را به ابزار مغناطیسی جذب می‌کند و دانه‌های ساینده را در اثر شود نیروی شناوری (levitation) به سمت قطعه کار فشار می‌سازد. علاوه بر این زنجیره‌هایی که از دانه‌های کربونیل آهن در جهت خطوط میدان مغناطیسی تشکیل می‌شوند باید این قدرت را داشته باشند که بتوانند دانه‌های ساینده را در بین خود نگه دارند؛ بنابراین مطالعه و شبیه‌سازی گرادین کاهشی میدان مغناطیسی و بزرگی

ساینده سریم اکسید و سیال حامل آب استفاده کردند. آزمایشات تجربی آن‌ها بر روی پارامترهایی مثل سرعت دورانی ابزار، فاصله بین ابزار و قطعه کار و شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ نشان داد که مؤثرترین پارامتر در این بین فاصله بین ابزار تا قطعه کار می‌باشد و سرعت دورانی کمترین میزان تاثیر را در پرداخت سطح خواهد داشت^[14,13]. خورانا و همکارانش سعی کردند با حذف راهگاه میانی ابزار میدان مغناطیسی نوک ابزار BEMRF را یکنواخت تر کرده و از آن برای پرداخت فولاد استفاده کنند^[15].

۲- شرح مسئله

مهم‌ترین ویژگی روش‌های نانوپرداخت مغناطیسی توسط سیال مگنتورئولوژیک تحت کنترل بودن خواص مکانیکی سیال پرداخت‌کننده توسط پارامترهای به کار رفته در آن است به‌طوری که بتوان در هر لحظه از فرآیند، پارامترهای پرداخت و در نتیجه نیروهای عمود بر سطح را به صورت لحظه‌ای و در هر نقطه از سطح پرداخت کنترل کرد^[16]. همین ویژگی این روش پرداخت است که آن را از روش‌های دیگر نانوپرداخت متمایز کرده و پیش‌بینی نتایج پرداخت را قبل از پرداخت امکان پذیر می‌کند. علاوه بر این کنترل دقیق بر سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و مختصات پرداخت قطعه کار نیاز به سیستم کنترلی دقیق و با قابلیت بازخورد (feed back) مناسب دارد. در طرح پیشین ابزار BEMRF سرعت دورانی ابزار توسط سروو موتور و به کمک پولی و تسمه تامین شده و مختصات حرکتی نوک ابزار در سه محور مختصات از طریق سروو موتورهای بدون بازخورد دقیق انجام می‌شده است^[17]. با وجود این که در صنایع ساخت و پرداخت لنزهای اپتیک، قبل از پرداخت نهایی از فرآیندهای بر پایه ماشین‌های کنترل عددی برای ساخت لنز استفاده می‌شود، یکی از محدودیت‌های روش‌های پرداخت مگنتورئولوژیک این است که قطعه برای پرداخت باید به دستگاه دیگری جابجا شود که از دقت و سرعت پرداخت کاسته می‌شود. این امر در پرداخت MRF که قطعه کار روی محور دستگاه بسته شده و ابزار روی میز پرداخت قرار دارد بسیار پیچیده خواهد شد. در طرح قبلی BEMRF، به دلیل وجود راهگاه میانی درون ابزار BEMRF، اتصال محور ابزار به اسپیندل ماشین CNC امکان‌پذیر نیست. با ایجاد تغییرات ساختاری در این ابزار می‌توان با کمک توانایی‌های کنترلی ماشین CNC علاوه بر تنظیم دقیق پیشروی و سرعت دورانی ابزار در جهت پرداخت لنزهای اپتیک با هندسه‌های پیچیده‌تر از این فرآیند استفاده نمود.

در مطالعات پیشین در زمینه پرداخت مگنتورئولوژیک قطعات توسط روش BEMRF مشاهده شد که در این روش برای پرداخت قطعات فرومغناطیسی (مثل فولاد) چگالی شار مغناطیسی بیشتری نسبت به قطعات غیرفرومغناطیسی (مثل مس و سیلیکون) تولید می‌شود. این پدیده به دلیل تمرکز بیشتر خطوط میدان در سطح قطعات فرومغناطیس و تقویت چگالی شار

جهت X و Y، قطعه کار جابجا شده و ابزار فقط قابلیت جابجایی در جهت محور Z را دارد.

در این مقاله برای مطالعه چگونگی توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط میدان مغناطیسی در فاصله کاری ابزار BEMRF از شبیه سازی مگنتواستاتیک (magnetostatic) در نرم افزار انسیس مکسول (ANSYS Maxwell) استفاده شده است. به دلیل این که هندسه و ابعاد ابزار در میزان چگالی شار مغناطیسی مؤثر است، در محیط شبیه سازی ابعاد ابزار با توجه به پارامترهای فرآیندی ابزار مثل شدت جریان الکتریکی و فاصله کاری از نوک ابزار تا سطح قطعه کار و میزان پراکندگی خطوط میدان مغناطیسی و بزرگی چگالی شار مغناطیسی بررسی و انتخاب خواهند شد. این اندازه های ابعادی در نهایت بر اساس فضای موجود در دستگاه فرز CNC سه محور مدل Deckel FP4 MA انتخاب و در طراحی ابزار اعمال خواهند شد.

نحوه اتصال ابزار به ماشین فرز CNC به صورتی در نظر گرفته شده که محور ابزار با دوران اسپیندل دستگاه CNC دوران داشته باشد و در عین حال سیم پیچ ابزار توسط نگه دارنده ای از جنس پلاستیک فشرده به قسمت ثابت فرز CNC متصل شود. همچنین فاصله ۲ میلیمتری بین سیم پیچ و هسته مغناطیسی ابزار در جهت شعاعی در نظر گرفته شده که مانع انتقال ارتعاش از هسته ابزار به سیم پیچ یا بالعکس می شود.

طرح ابزار BEMRF موجود در شکل ۱-الف و طرح ابزار BEMRF تغییر یافته جدید جهت شبیه سازی در شکل ۱-ب نشان داده شده است. هسته دوار ابزار توسط کولت (collet) به اسپیندل فرز نصب شده و قسمت سیم پیچ ابزار به قسمت ثابت کلگی ماشین متصل می شود. وزن ابزار و سیم پیچ توسط کولت و اسپیندل ماشین تحمل می شود. با این نحوه اتصال ابزار می تواند با جابجایی کلگی ماشین حرکت کند و در جهت محورهای X و Y پیشروی داشته باشد. در جهت Z فاصله کاری تنظیم شده و در طول مسیر حرکت ابزار ثابت خواهد ماند. سرعت دورانی توسط سرعت دورانی اسپیندل ماشین تعیین خواهد شد.

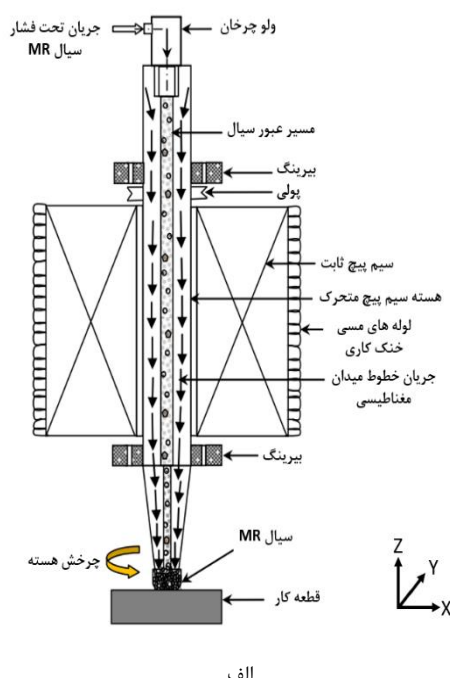
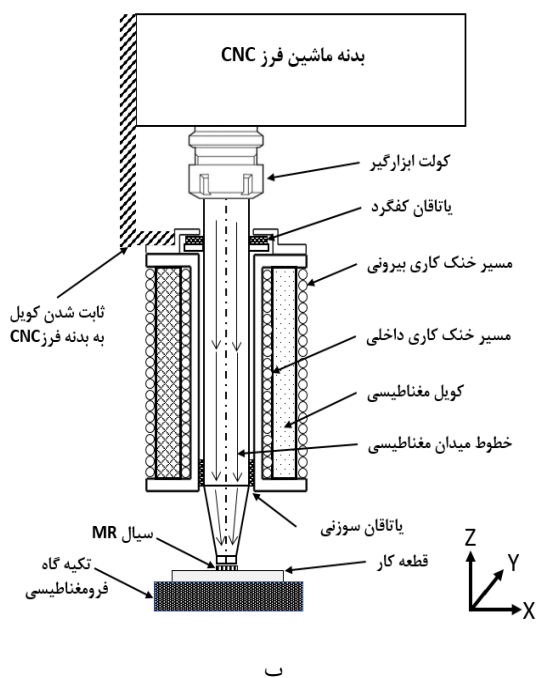
بر اساس مطالعات الم در زمینه حجم مورد نیاز سیال در فرایند BEMRF، برای اینکه سیال مورد استفاده بتواند نیروی کافی به سطح قطعه کار وارد کند نیاز است تا حداقل به اندازه ۱/۲ برابر حجم فضای فاصله کاری به ناحیه پرداخت تزریق شود^[19]. به دلیل اینکه ممکن است میدان مغناطیسی باقیمانده در هسته مغناطیسی ابزار بر سیال MR اثر بگذارد، در هر مرحله از پرداخت قبل از نزدیک شدن ابزار به سطح قطعه کار مقدار ۱/۲ برابر حجم فضای فاصله کاری از سیال خمیری شکل MR، به صورت دستی توسط قاشق پلاستیکی روی سطح قطعه کار و در نقطه پرداخت قرار داده می شود. بعد از نزدیک شدن ابزار به سطح قطعه کار و اتصال جریان الکتریکی، نانو برس پرداخت تشکیل شده و آماده پرداخت می شود.

چگالی شار مغناطیسی ابزار در حین طراحی ابزار جدید ضروری است. از نظر توزیع چگالی شار مغناطیسی در جهت شعاعی ابزار به دلیل وجود سوراخ مرکزی در نوک ابزار با نفوذپذیری مغناطیسی کمتر از هسته مغناطیسی ابزار، ممکن است توزیع مناسبی از چگالی شار مغناطیسی ایجاد نشود.

ضعف ابزار BEMRF در سیستم خنک کاری به دلیل اینکه فقط سطح خارجی سیم پیچ خنک کاری می شود، باعث می شود که در دوره های زمانی مختلف برای خنک کاری سیم پیچ مغناطیسی استراحت داده شود و قابلیت این ابزار را برای استفاده طولانی مدت کاهش می دهد و این در صورتی است که فرآیندهای پرداخت غالباً زمان بر هستند و هرگونه توقف ناخواسته باعث طولانی تر شدن زمان پرداخت خواهد شد^[1]. گرمای ایجاد شده توسط سیم پیچ مغناطیسی در حین پرداخت می تواند باعث گرم شدن بیش از حد سیم پیچ شده و اثر گرمایی بر روی هسته سیم پیچ بگذارد. اثرات حرارتی روی هسته علاوه بر انبساط طولی ناخواسته روی هسته که به عنوان ابزار پرداخت عمل می کند می تواند باعث گرم شدن سیال عبوری از میان هسته ابزار و تغییر خواص رئولوژیک آن شود. مشکل خنک کاری ابزار در BEMRF موجب شد تا طرح دیگری که در آن سیم پیچ در محفظه ای با گردش روغن غوطه ور می شود توسط کومار و همکارانش ارائه شد^[4] که موجب حجیم شدن سیم پیچ به دلیل احاطه شدن سیم پیچ توسط محفظه روغن می شد.

۳- روش حل

در این مقاله در طرح جدید مطابق شکل ۱-ب ابزار BEMRF به شکلی طراحی شده است که قابلیت نصب بر روی ماشین فرز CNC سه محوره را داشته باشد. با مقایسه ابزار جدید در شکل ۱-ب با طرح ابزار قدیم در شکل ۱-الف مشاهده می شود که در طرح جدید ابزار BEMRF برای خنک کاری بهتر سیم پیچ مغناطیسی از دو مسیر خنک کاری داخلی و خارجی استفاده شده است که علاوه بر خنک کاری سطح خارجی سیم پیچ، سطح داخلی آن هم خنک کاری شود. برای این منظور باید فضایی بین سیم پیچ و هسته فرومغناطیسی ابزار اضافه شود که می تواند در میزان چگالی شار مغناطیسی ابزار اثرگذار باشد. همچنین به دلیل اینکه سیال MR از خارج از ابزار وارد ناحیه پرداخت می شود، سیم پیچ کمترین اثر حرارتی را بر سیال MR خواهد داشت. انتقال نیرو در طرح جدید به جای پولی و تسمه مستقیماً توسط اسپیندل ماشین فرز CNC انجام می گیرد. با حذف شدن راهگاه میانی ابزار و ولو چرخان از طرح قدیم اتصال ابزار به اسپیندل توسط کولت در طرح جدید امکان پذیر خواهد شد. سیم پیچ در هر دو طرح ثابت است با این تفاوت که در طرح جدید سیم پیچ به کلگی ماشین CNC بسته می شود و می تواند همراه با ابزار در جهت X، Y و Z محورهای مختصات جابجا شود در صورتی که در طرح قدیم با حرکت میز در



شکل ۱) ساختمان ابزار مگنتورئولوژیکی سر کروی، الف) طرح موجود ابزار^[۱]، ب) طرح جدید ابزار بدون راهگاه میانی و همراه با تکیه گاه فرومغناطیسی

۳-۱- شبیه سازی

دستیابی به مقدار چگالی شار مغناطیسی مورد نظر در ناحیه پرداخت نیاز به محاسبات پیچیده مغناطیسی دارد که با توجه به پیچیده بودن این محاسبات و اثرگذاری عوامل متعددی در آن از شبیه سازی الکترواستاتیکی به کمک نرم افزار ماکسول استفاده شده است. این نرم افزار یک نرم افزار متعارف برای آنالیز میدان های مغناطیسی است. در این نرم افزار اجزا محدود از مش بندی خودکار قطعات استفاده می شود و نیازی به تعیین مش بندی نیست. همچنین این نرم افزار قابلیت بهینه سازی ابعادی مدل شبیه سازی در دامنه های ابعادی تعیین شده را دارد.

در شبیه سازی ابزار BEMRF طراحی شده در این مقاله، اثر حذف سوراخ میانی در نوک ابزار و اثر وجود تکیه گاه فرومغناطیسی در زیر قطعه کار از جنس شیشه غیر فرومغناطیسی بر چگالی شار مغناطیسی و خطوط میدان مغناطیسی بررسی شده است. با انتخاب مناسب ترین حالت قرارگیری قطعه کار در ماشین فرز CNC سه محوره و نوع تزریق سیال به ناحیه پرداخت، اندازه های ابعادی ابزار با توجه به فضای موجود در ماشین فرز بهینه شده به صورتی که چگالی شار مغناطیسی را جهت اعمال نیروی فروری (indentation) کافی به ذرات ساینده برای فرآیند پرداخت تامین کند. بر اساس مطالعات گذشته^[۱۵]، میزان حداکثر چگالی شار مغناطیسی برای جذب ذرات کربونیل آهن به نوک ابزار و نگه داری دانه های ساینده در پرداخت قطعات غیر فرومغناطیسی در بین ۰/۵ تا ۰/۸ تسلا می باشد که در صورت دستیابی به این مقادیر حداکثر چگالی شار مغناطیسی می توان با کاهش دادن جریان الکتریکی سیم پیچ در صورت لزوم به مقادیر کمتر هم دسترسی داشت.

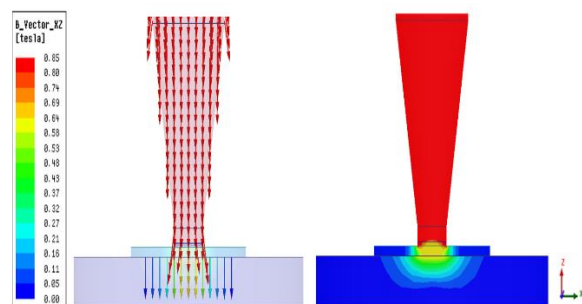
مقادیر بیش از ۰/۸ تسلا برای چگالی شار مغناطیسی می تواند باعث اشباع مغناطیسی ابزار یا ایجاد خط و خش ناخواسته بر روی سطح قطعه کار شود^[۲۰]. قطر نوک ابزار ۱۰ میلیمتر، طول ابزار ۲۶۴ میلیمتر، و طول قسمت مخروطی ابزار ۴۴ میلیمتر در نظر گرفته شده است. این مقادیر بر اساس فضای موجود بر روی دستگاه CNC، ابعاد قطعه کار و ابعاد ابزار موجود BEMRF که در مقالات مختلف به صورت متداول استفاده شده است^[۲۱] انتخاب شده اند. علاوه بر اندازه های ابعادی و هندسی ابزار، پارامترهای فرآیندی مؤثر در عملیات پرداخت توسط ابزار BEMRF عبارتند از جریان الکتریکی سیم پیچ، فاصله کاری و سرعت دورانی که از میان این پارامترها دو پارامتر جریان الکتریکی و فاصله کاری در میزان چگالی شار مغناطیسی در سطح قطعه کار مؤثر هستند. به همین منظور در این مطالعه این دو پارامتر توسط شبیه سازی بهینه شده اند. شدت جریان الکتریکی سیم پیچ از ۱ تا ۴ آمپر و فاصله کاری ۰/۶ تا ۱/۲ میلیمتر برای این شبیه سازی در نظر گرفته شده است. ابعاد نوک ابزار باید به صورتی باشد که بتواند تمرکز مناسبی از خطوط میدان داشته باشد و کمترین میزان پراکندگی خطوط میدان مغناطیسی در نوک ابزار ایجاد شود. به همین منظور در نوک مخروطی شکل ابزار یک دنباله استوانه ای شکل به طول ۳ میلیمتر اضافه شده است. این قسمت می تواند تا حدودی باعث جمع شدن خطوط میدان مغناطیسی شود و از پراکندگی خطوط میدان بعد از عبور از ناحیه مخروطی جلوگیری کند. در جدول ۱ جنس مواد بکار رفته در شبیه سازی و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی آن ها نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات مغناطیسی مواد به کار رفته در شبیه‌سازی

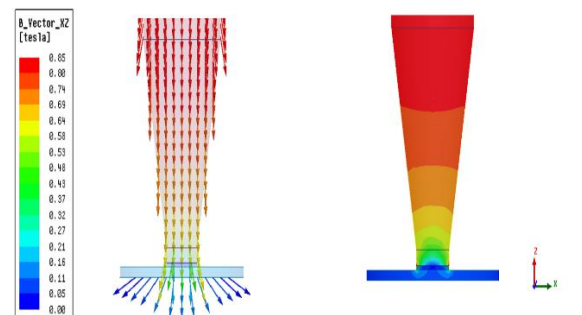
جنس ماده	نفوذپذیری مغناطیسی (μ)
سیم‌پیچ الکترومغناطیسی	۱
هسته سیم‌پیچ	آهن ۴۰۰۰
سیال MR	-
قطعه کار	BK7 ۱
تکیه‌گاه فرومغناطیسی	آهن ۴۰۰۰

۳-۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی

در بخش اول شبیه‌سازی اثر افزودن تکیه‌گاهی فرومغناطیسی از جنس آهن در زیر قطعه کار غیرفرومغناطیسی از جنس شیشه در افزایش چگالی شار مغناطیسی بررسی شده است. در شبیه‌سازی قطعات ابزار BEMRF از مواد با خواص مغناطیسی مطابق جدول شماره ۱ استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود در حالتی که از تکیه‌گاهی از جنس آهن در زیر قطعه کار از جنس شیشه نسبت به حالتی که تکیه‌گاه آهنی در زیر قطعه کار از جنس شیشه قرار ندارد همگرا تر شده دارد که در نتیجه چگالی شار مغناطیسی بیشتری هم در ناحیه پرداخت ایجاد خواهد شد. با توجه به این نتایج استفاده از تکیه‌گاه فرومغناطیسی در پرداخت قطعات غیرفرومغناطیسی در این روش می‌تواند در جهت افزایش نیروی عمود بر سطح قطعه کار سودمند باشد.



الف



ب

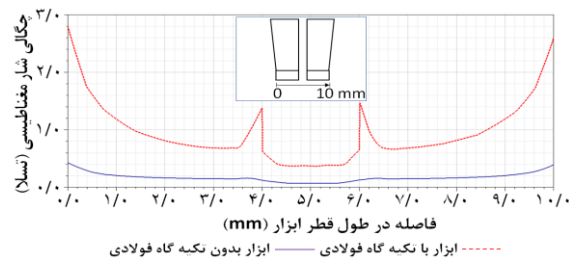
شکل ۲) چگالی شار مغناطیسی و خطوط میدان در ابزار BEMRF جدید با شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر و فاصله کاری ۰/۸ میلی‌متر، (الف) با تکیه‌گاه آهنی، (ب) بدون تکیه‌گاه آهنی

در مرحله دوم شبیه‌سازی، ابزار در دو حالت با راهگاه میانی و بدون راهگاه میانی مدل‌سازی شده تا اثر حذف راهگاه میانی بررسی شود. در شکل ۳ اثر حذف راهگاه میانی و همچنین اثر تکیه‌گاه فرومغناطیسی از جنس آهن در زیر قطعه کار به صورت هم‌زمان مشاهده می‌شود. در شکل ۳-الف ابزار بدون راهگاه میانی و در شکل ۳-ب ابزار با راهگاه میانی نشان داده شده است. در این نتایج دیده می‌شود که با حذف راهگاه میانی ابزار توزیع یکنواخت‌تری از چگالی شار مغناطیسی به دست می‌آید که می‌تواند به علت تفاوت بسیار زیاد در نفوذپذیری مغناطیسی هسته ابزار از جنس فولاد و نفوذپذیری مغناطیسی سوراخ حاوی سیال MR باشد. همچنین نتایج نشان‌دهنده افزایش ناگهانی چگالی شار مغناطیسی در لبه‌های راهگاه و کاهش ناگهانی در مرکز ابزار هستند. در حالتی که ابزار سوراخ مرکزی دارد شار مغناطیسی کمتری در ناحیه مرکز ابزار به وجود می‌آید که می‌تواند در میزان پرداخت این ناحیه مرکزی ابزار تأثیرگذار باشد. در نتیجه حالت مناسب برای ابزار BEMRF جدید بدون راهگاه میانی به همراه تکیه‌گاه فرومغناطیسی انتخاب شد.

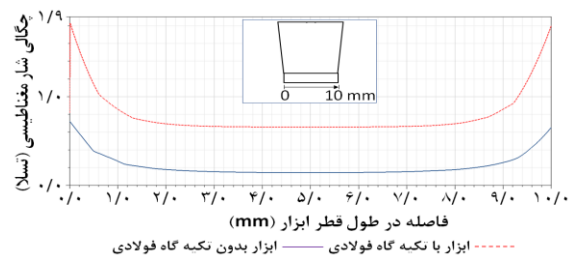
با ایجاد شار مغناطیسی با بزرگی مناسب هدف مهم بعدی این است که پارامترهای فرآیندی طوری انتخاب شوند که گرادیان کاهشی مناسبی در فاصله کاری پرداخت ایجاد شود. این گرادیان کاهشی باعث خواهد شد که دانه‌های کربونیل آهن به نوک ابزار جذب شده و دانه‌های ساینده را به ناحیه سطح قطعه کار که میدان مغناطیسی کمتری وجود دارد توسط نیروی شناوری (levitation) هل داده شوند. این دانه‌های ساینده که نقش مستقیم در پرداخت قطعه کار دارند دانه‌های فعال نامیده می‌شوند و هر چقدر دانه‌های فعال بیشتری روی سطح قطعه کار وجود داشته باشد، پرداخت بهتری انجام می‌شود. به همین منظور در شبیه‌سازی بعدی ابزار صلب بدون راهگاه میانی و همراه با تکیه‌گاه فرومغناطیسی با پارامترهای فرآیندی در محدوده‌های جدول ۲ انجام شده تا مشاهده شود که در کدامیک از این پارامترهای فرآیندی امکان ایجاد گرادیان کاهشی میدان مغناطیسی وجود دارد. با این شرط لازم که بزرگی چگالی شار مغناطیسی در سطح قطعه کار در محدوده ۰/۵ تا ۰/۸ تسلا حفظ شود.

جدول ۲) پارامترهای چگالی شار مغناطیسی

علامت اختصاری	واحد	مقادیر اختصاص داده شده
شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ	I	۴، ۳، ۲، ۱ آمپر
فاصله کاری	g	۱/۲، ۱، ۰/۸، ۰/۶ mm



ب

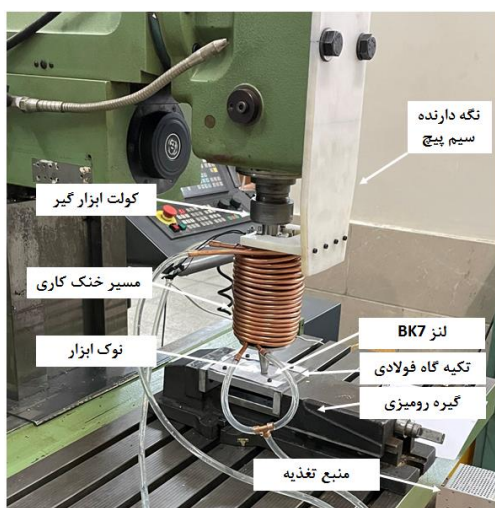


الف

شکل ۳) چگالی شار مغناطیسی و خطوط میدان در ابزار BEMRF جدید با شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر و فاصله کاری ۰/۸ میلیمتر، الف) بدون راهگاه میانی، ب) با راهگاه میانی

۴- آزمایش‌های تجربی

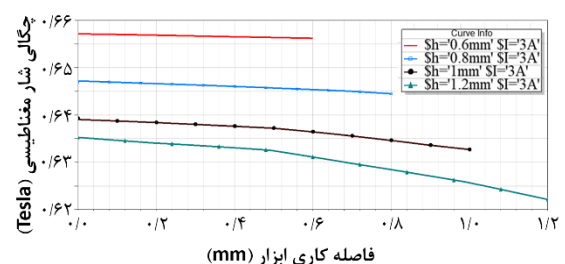
در ابزار BEMRF جدید، منبع تغذیه مستقیم 24V با قابلیت تأمین شدت جریان الکتریکی تا ۱۰ آمپر به سیم‌پیچ متصل می‌شود. جریان آب خنک‌کاری در دو مسیر داخلی و خارجی توسط پمپ آب و مخزن آب در دمای محیط تأمین می‌شود و عملیات خنک‌کاری را انجام می‌دهد. سیم‌پیچ الکترومغناطیسی با ۲۰۰۰ دور، طول ۱۴۰ میلیمتر قطر داخلی ۳۰ میلیمتر و قطر خارجی ۷۰ میلیمتر و با سیم مسی روکش لاک‌ی قطر ۱ میلیمتر ساخت شد. شفت مرکزی ابزار از جنس فولاد کم‌کربن با قطر نوک ابزار ۱۰ میلیمتر ساخته شد. شکل ۵ نمایشی از اجزای مختلف ابزار BEMRF نصب شده بر روی فرز CNC را نشان می‌دهد. پارامترهای ابزار در این تست شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر و فاصله کاری ۰/۸ میلیمتر و سرعت دورانی ۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد و مدت زمان ۳۰ دقیقه پرداخت در نقطه‌ای ثابت انجام شد.



شکل ۵) ابزار BEMRF نصب شده بر روی ماشین فرز CNC

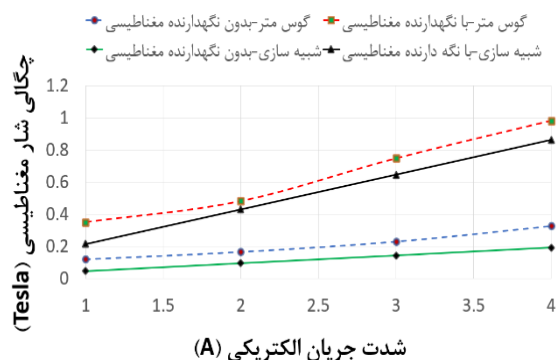
تست تجربی ابزار BEMRF طراحی و ساخته شده از دو منظر انجام می‌شود. در مرحله اول تست چگالی شار مغناطیسی تولید شده توسط ابزار در دو حالت با تکیه‌گاه فرومغناطیسی و بدون تکیه‌گاه فرومغناطیسی انجام شده و با هم مقایسه می‌شوند. در مرحله بعد

نتایج شبیه‌سازی توسط قابلیت بهینه‌سازی (optimize) نرم‌افزار ماکسول به صورت فول فاکتوریل (full factorial) با پارامترهای جدول ۲ به دست می‌آیند. با فیلترکردن این نتایج مقادیر مورد نیاز برای چگالی شار مغناطیسی ابزار BEMRF به دست می‌آیند. با توجه به نتایج به دست آمده، اگر فاصله کاری ابزار از ۰/۸ میلیمتر کمتر شود گرادیان کاهشی چگالی شار مغناطیسی در فاصله کاری کاهش می‌یابد و تقریباً چگالی شار مغناطیسی روی سطح قطعه کار و ابزار باهم برابر هستند و اگر از ۱ میلیمتر بیشتر شود، افت شدید چگالی شار مغناطیسی را در پی دارد که به تضعیف نیروی نگه‌داری دانه‌های ساینده در بین زنجیره‌های CIP و کاهش نیروی فروروی در سطح قطعه کار را در پی خواهد داشت. نتایج توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله نوک ابزار تا سطح قطعه کار که فاصله کاری نامیده می‌شود برای شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای شدت جریان‌های الکتریکی از ۱ تا ۴ آمپر نتایج به همین ترتیب قابل استخراج هستند. هر چقدر شدت جریان الکتریکی مغناطیس کننده سیم‌پیچ بیشتر باشد چگالی شار مغناطیسی بزرگ‌تری ایجاد خواهد شد. نکته مهم برای انتخاب محدوده مناسب این است که محدوده شار مغناطیسی باید به اندازه‌ای باشد که آن قدر کم نباشد که باعث کاهش نیروی فروروی دانه ساینده در سطح قطعه کار شود و آن قدر زیاد نباشد که باعث اشباع مغناطیسی ابزار شود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی و با توجه به این که محدوده حدود ۰/۵ تا ۰/۸ تسلا و گرادیان کاهشی که برای ابزار در نظر گرفته شده، فاصله کاری ۰/۸ میلیمتر و شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر برای این ابزار در نظر گرفته شد.



شکل ۴) اثر تغییرات فاصله کاری بر توزیع چگالی شار مغناطیسی در ناحیه پرداخت با شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ ۳ آمپر

است. برای اندازه‌گیری به دلیل اینکه ضخامت نوک حسگر گوس‌متر نیاز به فضای حداقلی برای اندازه‌گیری دارد و غیرمغناطیسی بودن شیشه، قطعه کار از محل بسته شدن خود خارج و اندازه‌گیری بدون حضور قطعه کار انجام شد. شکل ۶-ب مقدار اندازه‌گیری شده با جریان الکتریکی ۳ آمپر و در فاصله کاری ۰/۸ میلیمتر را نشان می‌دهد که با توجه به انتظاری که از نتایج شبیه‌سازی و مطالعات پیشین برای این مقدار از چگالی شار مغناطیسی داشتیم، مقادیر پارامترهای فرآیندی انتخاب شده مناسب برای پرداخت قطعه کار در نظر گرفته شده می‌باشند.



الف



ب

شکل ۶) چگالی شار مغناطیسی، (الف) نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی (ب) نحوه اندازه‌گیری با گوس‌متر

کیفیت سطح قطعه کار BK7 اولیه در ۵ نقطه از محل پرداخت با استفاده از دستگاه زبری‌سنج MarSurf PS 10 در طول ۱/۵ میلیمتر اندازه‌گیری شده و زبری سطح (R_a) متوسط این نقاط قبل از پرداخت برابر با ۰/۵۵۸ میکرومتر به دست آمد. بعد از مدت ۳۰ دقیقه پرداخت توسط ابزار BEMRF مجدداً زبری سطح (R_a) نهایی در ۵ نقطه اندازه‌گیری شده و متوسط آن‌ها ۰/۲۴۰ به دست آمد. تغییرات صافی سطح یکی از اندازه‌گیری‌های زبری سطح قبل و بعد از پرداخت به مدت ۳۰ دقیقه توسط ابزار BEMRF جدید در شکل ۷ نشان داده شده است.

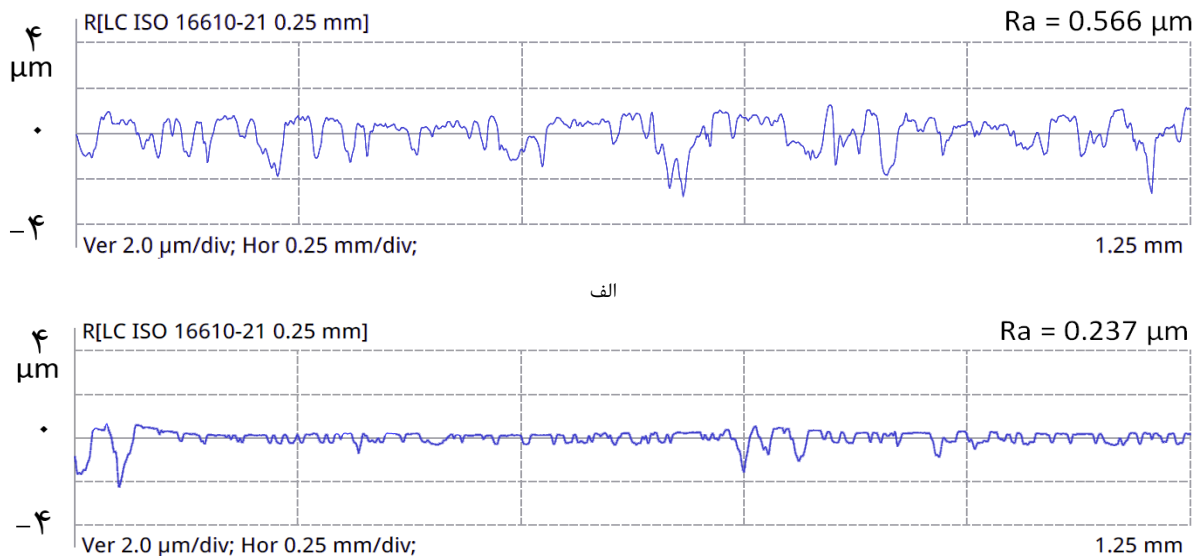
با تست پرداخت ابزار توسط پارامترهای بهینه سیال که در مطالعات پیشین برای ابزار BEMRF توصیه شده‌اند و پارامترهای فرآیندی فاصله کاری و شدت جریان الکتریکی که توسط شبیه‌سازی به دست آمده‌اند میزان تغییرات زبری سطح در مدت زمان پرداخت ۳۰ دقیقه‌ای محاسبه می‌شود. هدف از انجام تست پرداخت بررسی قابلیت نفوذ دانه‌های ساینده بر سطح قطعه کار می‌باشد. کاهش زبری سطح در این تست نشان‌دهنده اعمال نیروی کافی برای پرداخت سطح است و در جهت تنظیم بهینه این نیرو نیاز به طراحی آزمایش بر اساس پارامترهای ابزار می‌باشد.

برای انجام تست تجربی، تکیه‌گاه سنگ زده شده از جنس فولاد کم‌کربن بر روی گیره رومیزی دقیق نصب و لنز از جنس BK7 توسط نوارهای پلاستیکی روی تکیه‌گاه فولادی بسته شد. شفت مرکزی ابزار توسط کولت ماشین CNC نگه داشته شده و برای جلوگیری از چرخش سیم‌پیچ مغناطیسی برای توسط نگه دارنده ای غیرمغناطیسی به بدنه ماشین CNC مقید شد. برای اندازه‌گیری چگالی از گوس‌متر Lutron MG-3002 استفاده شد. چگالی شار مغناطیسی در نوک و قسمت مرکزی ابزار در حالت بدون تکیه‌گاه فولادی ۰/۲۹۰ تسلا و در حالت با تکیه‌گاه فولادی ۰/۷۴۲ تسلا اندازه‌گیری شدند. برای اینکه نشان داده شود که این مقدار از شار مغناطیسی می‌تواند نیروی لازم در جهت نفوذ دانه‌های ساینده در سطح BK7 را ایجاد کند یک نمونه سیال بهینه شده با پارامترهای سیال معرفی شده در ابزار BEMRF متداول در مقالات گذشته [20] تهیه شده و برای پرداخت BK7 با ۶۰ درصد حجمی آب دیونیزه، ۱۰ درصد حجمی سریم اکساید با متوسط اندازه دانه ۵ میکرون و ۳۰ درصد حجمی پودر کربونیل آهن (CIP) با متوسط اندازه دانه ۴ میکرون، ۲/۵ درصد حجمی گلیسرین و ۰/۷۵ درصد حجمی NaOH به عنوان تثبیت کننده تهیه و به صورت همگن مخلوط و هم زده شد.

۵- بررسی نتایج

سیال خنک‌کاری در طول مدت پرداخت در دو مسیر داخلی و خارجی سیم‌پیچ جریان داشته مانع از افزایش زیاد دمای ابزار می‌شد. دمای سیم‌پیچ در طول پرداخت هم دما با مخزن سیال خنک‌کاری نگه داشته شد. دمای آب مخزن در طول ۳۰ دقیقه پرداخت در حدود ۴ درجه سانتیگراد افزایش داشت که در نتیجه با افزودن مسیر خنک‌کاری داخلی سیم‌پیچ الکترومغناطیسی، از افزایش زیاد و ناگهانی سیم‌پیچ جلوگیری شده و هیچ‌گونه نیازی به توقف در فرآیند پرداخت جهت خنک‌کاری نداشت.

در مقایسه مقادیر تجربی با شبیه‌سازی می‌توان به این نتیجه رسید که ابزار ساخته شده با استفاده از تکیه‌گاه فولادی برای قطعه‌کاری شیشه‌ای قابلیت ایجاد شار کافی را دارد. نتایج اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در شدت جریان‌های ۱ تا ۴ آمپر و در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی و تست تجربی در شکل ۶ نشان داده شده



شکل ۷) پروفایل کیفیت سطح Ra، (الف) قبل از پرداخت (ب) بعد از ۳۰ دقیقه پرداخت

حدود ۳ درجه سانتیگراد بود که در نتیجه با استفاده از سیستم خنک‌کاری داخلی و خارجی سیم‌پیچ تغییرات دمای سیم‌پیچ در حین پرداخت محسوس نبوده و نیازی برای توقف فرآیند پرداخت در جهت خنک‌کاری سیم‌پیچ نمی‌باشد.

۳- در تست پرداخت قطعه کار توسط ابزار با پارامترهای بهینه به دست آمده از شبیه‌سازی کیفیت سطح قطعه کار بهبود پیدا کرده و پس از ۳۰ دقیقه پرداخت از زبری سطح ۰/۵۵۸ میکرومتر به زبری ۰/۲۴۰ میکرومتر رسید. این میزان از تغییرات صافی سطح در ۳۰ دقیقه از پرداخت نشان می‌دهد که با این روش پرداخت برای شیشه BK7 می‌تواند مؤثر باشد.

تأییدیه‌های اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- 1- Singh AK, Jha S, Pandey PM. Magnetorheological ball end finishing process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012 1;27(4):389-94.
- 2- Khan DA, Alam Z, Iqbal F, Jha S. Experimental investigations on the effect of relative particle sizes of abrasive and iron powder in polishing fluid composition for ball end MR finishing of copper. *International Journal of Precision Technology*. 2019;8(2-4):354-64.
- 3- Miao C, Lambropoulos JC, Jacobs SD. Process parameter effects on material removal in magnetorheological finishing of borosilicate glass. *Applied optics*. 2010 1;49(10):1951-63.

۶- نتیجه‌گیری

ابزار BEMRF که در مطالعات پیشین بیشتر برای پرداخت قطعات فرومغناطیسی مثل فولاد استفاده می‌شد، با طراحی جدید برای پرداخت‌کاری شیشه BK7 استفاده شد. در طرح جدید ابزار با حذف راهگاه میانی ابزار، انتقال سیال MR از خارج از ابزار به ناحیه پرداخت تزریق شده و از سیستم خنک‌کاری داخلی و خارجی برای خنک‌کاری سیم‌پیچ استفاده شد به صورتی که در طرح جدید حرارت تولیدی توسط سیم‌پیچ هیچ‌گونه اثر مخربی بر سیال نداشته باشد. نتایج زیر از شبیه‌سازی و تست‌های تجربی به دست آمدند:

۱- از قطعه کار غیرمغناطیسی انتظار می‌رفت که چگالی شار مغناطیسی کمی در ناحیه پرداخت ایجاد شود؛ اما با تغییرات انجام شده با شبیه‌سازی و تست ابزار توسط گوس‌متر مشخص شد که ابزار جدید قابلیت ایجاد چگالی شار مغناطیسی کافی و در نتیجه نیروی لازم برای پرداخت قطعات از جنس BK7 را دارد. میزان چگالی شار اندازه‌گیری شده توسط گوس‌متر در حالتی که نگه دارنده قطعه کار از جنس فولاد کم‌کربن بود و شدت جریان الکتریکی ۳ آمپر در سیم‌پیچ برقرار بود برابر با ۰/۷۴۲ اندازه‌گیری شد. این مقدار چگالی شار مغناطیسی می‌تواند برای مقاصد مختلف با تغییرات شدت جریان الکتریکی کاهش یا افزایش داده شود.

۲- با قابلیت نصب ابزار بر روی ماشین فرز CNC این ابزار توانایی پرداخت انواع شکل‌ها و سطوح پیچیده را خواهد داشت. همچنین خنک‌کاری مناسب این طرح مانع از توقف ناخواسته شده و از اثرات سو حرارتی روی سیال پرداخت‌کننده جلوگیری می‌کند. در مدت پرداخت ۳۰ دقیقه‌ای افزایش دمای سیال خنک‌کاری در

- V002T02A002). American Society of Mechanical Engineers.
- 19- Alam Z, Khan DA, Jha S. A study on the effect of polishing fluid volume in ball end magnetorheological finishing process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(11):1197-204.
- 20- Kumar S, Singh AK. Magnetorheological nanofinishing of BK7 glass for lens manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(11):1188-96.
- 21- Alam Z, Jha S. Modeling of surface roughness in ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process. *Wear*. 2017;374:54-62.
- 4- Kumar S, Singh AK. Nanofinishing of BK7 glass using a magnetorheological solid rotating core tool. *Applied Optics*. 2018;57(4):942-51.
- 5- Kumar S, Singh AK. Magnetorheological nanofinishing of BK7 glass for lens manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018;33(11):1188-96.
- 6- Kordonski WI, Jacobs SD. Magnetorheological finishing. *International Journal of modern physics B*. 1996 30;10(23n24):2837-48.
- 7- Kumar Singh A, Jha S, Pandey PM. Nanofinishing of a typical 3D ferromagnetic workpiece using ball end magnetorheological finishing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012 ;63:21-31.
- 8- Sidpara AM, Jain VK. Nanofinishing of freeform surfaces of prosthetic knee joint implant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012 ;226(11):1833-46.
- 9- Shorey AB, Kwong KM, Johnson KM, Jacobs SD. Nanoindentation hardness of particles used in magnetorheological finishing (MRF). *Applied optics*. 2000;39(28):5194-204.
- 10- Shorey AB, Jacobs SD, Kordonski WI, Gans RF. Experiments and observations regarding the mechanisms of glass removal in magnetorheological finishing. *Applied Optics*. 2001;40(1):20-33.
- 11- Singh AK, Jha S, Pandey PM. Design and development of nanofinishing process for 3D surfaces using ball end MR finishing tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(2):142-51.
- 12- Khan DA, Jha S. Selection of optimum polishing fluid composition for ball end magnetorheological finishing (BEMRF) of copper. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100:1093-103.
- 13- Saraswathamma K, Jha S, Rao PV. Experimental investigation into ball end magnetorheological finishing of silicon. *Precision Engineering*. 2015 ;42:218-23.
- 14- Saraswathamma K, Jha S, Rao PV. Rheological characterization of MR polishing fluid used for silicon polishing in BEMRF process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(5):661-8.
- 15- Khurana A, Singh AK, Bedi TS. Spot nanofinishing using ball nose magnetorheological solid rotating core tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92:1173-83.
- 16- Specification EP. Deterministic magnetorheological finishing [Internet]. Vol. 220037. 2002. p. 1-40.
- 17- Singh AK, Jha S, Pandey PM. A novel ball end magnetorheological finishing process. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2014* (Vol. 46445, p. V02BT02A032). American Society of Mechanical Engineers.
- 18- Khan DA, Alam Z, Jha S. Nanofinishing of copper using ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process. In *ASME international mechanical engineering congress and exposition 2016* (Vol. 50527, p.