



# The Methods of Manufacturing and Optimizing the Permanent Magnet in Order to Increase the Efficiency of the Magnetic Abrasive Finishing Process on Flat and Free Surfaces.



## ARTICLE INFO

### Authors

Rasouli S.A.<sup>1\*</sup>,  
Nori D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

### \* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

[seyedalirezarasouli@gmail.com](mailto:seyedalirezarasouli@gmail.com)

### How to cite this article

Rasouli S A., Nori D. The Methods of Manufacturing and Optimizing the Permanent Magnet in Order to Increase the Efficiency of the Magnetic Abrasive Finishing Process on Flat and Free Surfaces. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):255-261.

## ABSTRACT

One of the components of the MAF process is the magnetic field that is applied through the field source. This source can be permanent or electrical. In terms of shape, permanent magnets are divided into two main categories: cubic and cylindrical. In the past researches, cylindrical overhead magnets have been used to perform MAF on free surfaces, which is not very efficient due to the time-consuming process. In this research, first of all, the methods of making overhead magnets have been examined to find the optimal magnetic conditions. Then, in order to increase the efficiency of the process, methods to increase the efficiency of the overhead magnet have been investigated. Based on this, the mentioned methods have been discussed and evaluated. According to the results, in the method of using a ball magnet and connecting it to a cylindrical magnet, the magnetism density is significant, and also by grooving the head magnet, the roughness changes on the inclined surfaces of the ferromagnetic workpiece from 21% to It reached 34.4% and in the inclined area with a curvature angle of 90 and 105 degrees of the surface of the ferromagnetic workpiece, a 9% increase in roughness changes occurs.

**Keywords** Magnetic Abrasive Finishing, Abrasive Powder, Magnetic Flux Density

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۵۵-۲۶۱



## روش‌های ساخت و بهینه‌سازی آهنربای دائمی سرکروی جهت افزایش راندمان فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطوح تخت و آزاد



## چکیده

یکی از اجزای فرآیند MAF، میدان مغناطیسی می باشد که از طریق منبع میدان اعمال می گردد. این منبع می تواند دائمی و یا الکتریکی باشد. آهنرباهای دائمی از لحاظ شکل به دو دسته عمده مکعبی و استوانه ای تقسیم می گردند. در تحقیقات گذشته از آهنربا استوانه ای سرکروی، جهت انجام MAF بر سطوح آزاد استفاده شده است، که با توجه به زمان بر بودن، انجام فرآیند دارای راندمان بالایی نمی باشد. در این پژوهش، ابتدا روش های ساخت آهنربای سرکروی، برای یافتن شرایط مغناطیسی بهینه بررسی شده اند. سپس، به منظور افزایش راندمان فرآیند، روش هایی برای افزایش کارایی آهنربای سرکروی، بررسی شده است. بر این اساس، روش های مذکور مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته اند. با توجه به نتایج، در روش استفاده از آهنربای ساجمه ای و اتصال آن به آهنربای استوانه ای، چگالی شار مغناطیسی مقدار قابل توجهی بوده و همچنین با شیاردار کردن آهنربای سرکروی، تغییرات زبری در سطوح شیب دار قطعه کار فرومغناطیس از ۲۱ درصد به ۳۴/۴ درصد رسیده و در ناحیه شیب دار با زاویه ی انحناء ۹۰ و ۱۰۵ درجه ی سطح قطعه کار فرومغناطیس، ۹ درصد افزایش تغییرات زبری، رخ می دهد.

## مشخصات مقاله

نویسنده ها

سید علیرضا رسولی<sup>۱\*</sup>

داود نوری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

\* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه ملایر، ملایر

[seyedalirezarasouli@gmail.com](mailto:seyedalirezarasouli@gmail.com)

**کلیدواژه‌ها** پرداخت کاری سایشی مغناطیسی، پودر سایشی، چگالی شار مغناطیسی

## ۱- مقدمه

از جمله روش هایی که از میدان مغناطیسی برای کنترل براده برداری استفاده می شود، پرداخت کاری سایشی مغناطیسی است. مشخصه بارز این فرآیند استفاده از میدان مغناطیسی قابل کنترل برای مطابقت زنجیره سایشی مغناطیسی با فرم سطح ماشین کاری است. در این روش پودر ساینده مغناطیسی که یک مخلوط همگن از ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس است در راستای میدان مغناطیسی قرار گرفته و همانند یک برس ساینده عمل می کند.

همانطور که اشاره شد، یکی از مهم ترین اجزای فرآیند MAF، میدان مغناطیسی می باشد که از طریق منبع میدان اعمال می گردد. این منبع می تواند دائمی و یا الکتریکی باشد. آهنرباهای دائمی از لحاظ شکل به دو دسته عمده مکعبی و استوانه ای تقسیم می-گردند. آهنرباهای استوانه ای با توجه به نسبت ارتفاع به قطر، به دو گروه دیسکی و استوانه ای تقسیم می شوند. در آهنرباهای دیسکی قطر از ضخامت بیش تر و در آهنرباهای استوانه ای بالعکس می-باشد. در هر دو حالت استوانه ای و دیسکی، آهنرباهای رینگ نیز قابل تعریف می باشند. با توجه به شکل فرآیند، آهنربا دارای حرکت دورانی می باشد. لذا استفاده از آهنرباهای مکعبی شکل امکان ندارد. علاوه بر شکل، جنس آهنربای دائمی نیز حائز اهمیت بوده و بر کیفیت فرآیند موثر می باشد.

## ۲-۱- پیشینه پژوهش

چن و همکارانش در سال ۲۰۰۴ پرداخت کاری دو نوع سطح مقعر و محدب را توسط روش MAF مطالعه کردند [۱]. وحدتی و رسولی، پارامترهای موثر در فرآیند MAF بر سطح مقعر آلومنیوم آلیاژی، را بررسی نمودند [۲]. در سال ۲۰۰۷ چینگ لین تین و همکارانش در یک تحقیق تجربی سطوح آزاد فولاد زنگ نزن SUS304 را با استفاده از روش MAF پرداخت کاری کردند [۳]. چوپانی و همکاران، اثر پارامترهای فاصله برس تا قطعه کار، سرعت دورانی قطعه کار استوانه ای و نوع ساینده در فرآیند پرداختکاری سایشی مغناطیسی، بر زبری سطح بیرونی قطعات استوانه ای از جنس فولاد زنگ نزن C۴۴۰، را بررسی نمودند [۴]. رسولی و همکاران، مقایسه ای پیرامون پرداخت سایشی مغناطیسی سطوح محدب و مقعر آلومنیوم آلیاژی انجام دادند [۵]. پروهیت و همکاران، تاثیر فرآیند MAF بر سطح غیرمغناطیس آلومنیوم ۶۰۶۱ با ابزار سرتخت توسط آهنربای الکتریکی را بررسی نمودند [۶]. کومار و سینگ در سال ۲۰۲۰، پارامترهای موثر بر فرآیند MAF بر سطح تخت اینکونل ۷۱۸ با ابزار سرتخت با چپینش خاص آهنربا را مطالعه کردند [۷]. ژو و همکاران، مجموعه ای از تجهیزات آزمایشگاهی جهت بهبود عملکرد فرآیند و ارزیابی عملکرد آن ارائه دادند [۸]. تی کی و همکاران پارامترهای موثر در فرآیند بر سطح تخت

استیل با استفاده از آهنربای الکتریکی را بررسی کردند. [۹]. کیان و همکاران در سال ۲۰۲۰، پژوهش های صورت گرفته در حوزه فرآیند MAF را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰].

## ۳-۱- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

بر اساس بررسی پژوهش های گذشته، تمایل به استفاده از آهنربای سر کروی در فرآیند MAF، کاملاً مشهود است، ولی با توجه به ابعاد آهنربا های مرسوم مورد استفاده، انجام فرآیند MAF بر سطوح قطعات و قالب ها بسیار زمانبر می باشد. که همین امر باعث کاهش راندمان فرآیند MAF می گردد. در این پژوهش، ابتدا روش های ساخت آهنربای سرکروی، برای یافتن شرایط مغناطیسی بهینه بررسی شده اند. همچنین، به منظور یافتن شرایط بهینه و افزایش راندمان فرآیند، روش هایی برای افزایش کارایی آهنربای سرکروی، بررسی شده، که بر این اساس، روش های مذکور مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته اند.

## ۲- مبانی روش ها و نتایج

### ۲-۱- تئوری مسئله

میزان نیروی وارده، به جنس ذره مغناطیسی، اندازه ساینده و مغناطیسی، درصد حجمی آن ها در ترکیب، و مقدار حجم کلی پودر وابسته است [۹]. از طرف دیگر، میزان نیرو با تغییرات شدت میدان نیز تغییر می کند. شدت میدان تولید شده در آهنربا ثابت به نوع، شکل و قدرت آهنربا بستگی دارد. همچنین با تغییر فاصله قطعه-کار از آهنربا، نیز چگالی شار مغناطیسی تغییر می کند. جنس قطعه کار از لحاظ مغناطیسی، نیز تأثیرگذار می باشد. با توجه به اهمیت میزان چگالی شار مغناطیسی در این تحقیق میزان چگالی شار مغناطیسی آهنرباهای دائمی بر سطوح قطعه کارهایی با جنس فرو و غیر فرومغناطیسی توسط نرم افزار المان محدود ماکسول شبیه سازی شده است. همچنین جهت صحت سنجی مقادیر حاصل از شبیه سازی مقادیر چگالی شار مغناطیسی توسط دستگاه گوس سنج نیز اندازه گیری شده و با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است.

نوع مسیر حرکت آهنرباهای تخت و منحنی بر سطوح منحنی توسط نرم افزار پاورمیل استخراج شده است. در یک فرآیند پرداخت کاری علاوه بر توانایی در میزان کاهش زبری سطوح، یکنواختی سطح حاصله از طریق روش مذکور نیز بسیار مهم می باشد.

### ۲-۲- روش های ساخت

#### ۲-۱-۱- استفاده از آهنربای ساچمه ای

استفاده از آهنربای بصورت تک و یا بصورت زنجیروار جهت افزایش چگالی شار مغناطیسی و همچنین برش آهنربا به دو قسمت (از قسمت قطبین آهنربا) و اتصال آن به آهنربا استوانه ای از جمله روش هایی است که جهت استفاده از آهنربای ساچمه ای می توان از آن ها استفاده کرد. جهت برش آهنرباهای کروی از وایرکات استفاده شده است. همچنین بر سطح نیم کره

سایز کوچک این نوع آهنرباها را در فرآیند MAF تنها ایراد آن‌ها است.

### ۲-۲-۲- ساخت نیم کره ی آهنی و اتصال آن‌ها به سطح آهنربا استوانه‌ای

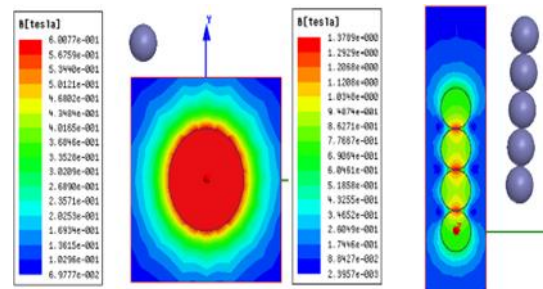
جنس آهن استفاده شده از منظر خصوصیات مغناطیسی بسیار مهم می‌باشد. زیرا هر چه ضریب نفوذ مغناطیسی آهن بیش‌تر باشد، چگالی شار مغناطیسی عبور کرده از نیم کره آهنی بیش‌تر بوده و نیروی بیش‌تری بر ذرات ساینده مغناطیسی وارد می‌شود. اضافه شدن نیم کره های آهنی باعث افزایش فاصله از سطح آهنربا شده و قاعدتاً با افزایش فاصله از سطح آهنربا، چگالی شار مغناطیسی کم‌تر می‌شود. اما اگر این فاصله با ماده‌ای با ضریب نفوذ مغناطیسی نسبتاً بالا جایگزین شود، مقدار این کاهش بسیار کم‌تر می‌شود. در بین فلزات پایه آهنی، آهن خالص با اختلاف زیاد دارای بیش‌ترین میزان ضریب نسبی نفوذ مغناطیسی می‌باشد. این عدد در آهن بصورت یک عدد ثابت نبوده و رابطه بین چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی غیر خطی می‌باشد. با توجه به میزان شدت میدانی که آهنرباهای استفاده شده در آن‌ها قرار دارند، میزان ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی در حدود ۲۴۰۰ می‌باشد. در فولادها و چدن‌ها این مقدار بسیار کم شده و تا حدود ۱۰۰ کاهش می‌یابد. به همین دلیل استفاده از آهن با خلوص بالا بسیار مهم می‌باشد. تصویر سرهای کروی ساخته شده به همراه شیار جهت اتصال به سطح آهنربای استوانه‌ای در شکل ۴ آورده شده است. از آنجا که در این پژوهش یکی از اهداف بررسی انحنای ابزار کروی بر تغییرات زبری می‌باشد، نیم کره هایی با شعاع انحنای مختلف ساخته شده است که در شکل ۶ به این موضوع اشاره شده است. همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی حاصل از این ترکیب (آهنربا استوانه‌ای به همراه نیم کره آهنی) توسط اندازه گیری و شبیه سازی بدست آمده است.

### ۲-۲-۳- ساخت یکپارچه

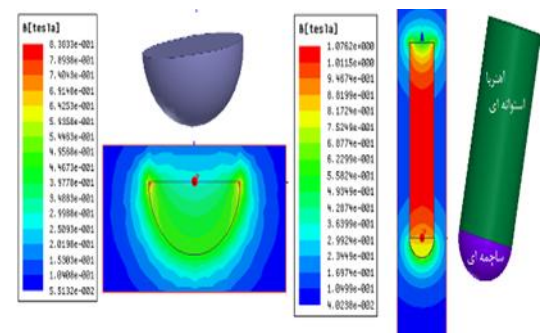
یکی دیگر از روش‌های استفاده از آهنربای کروی، تبدیل آهنربای استوانه‌ای به آهنربایی با سرکروی می‌باشد. جهت این مهم می‌توان از فرآیندهای ماشین کاری استفاده کرد اما از آنجا که آهنرباها بسیار ترد می‌باشند انجام فرآیند ماشین کاری باید با سرعت پیشروی، سرعت برشی و عمق براده برداری بسیار پایین صورت پذیرد. هر چند که در نهایت سطح مطلوبی بدست نمی‌آید. یکی دیگر از روش‌های ایجاد آهنربای سر کروی استفاده از فرآیند اسپارک می‌باشد. قالب مسی اسپارک با توجه به شعاع انحنا مورد نظر ساخته شده و توسط اسپارک، آهنربا استوانه‌ای به آهنربا سرکروی تبدیل شده است. همچنین جهت ایجاد شیار بر سطح این نوع آهنربا نیز از وایرکات استفاده شده است.

ها شیار یک راه و دو راهه نیز توسط وایرکات ایجاد شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

چگالی شار مغناطیسی این دسته از آهنرباها نیز توسط گوس متر اندازه گیری شده است. اتصال مناسب پودرهای ساینده مغناطیسی به سطح کروی آهنربا از فواید این روش می‌باشد. در صورت برش این نوع آهنرباها امکان اتصال به آهنرباهای استوانه‌ای با ابعاد  $(\varnothing 10 \times 40)$  می‌باشد که چگالی شار مغناطیسی آهنربا ترکیبی مذکور نیز محاسبه شده است. تفاوت چگالی شار مغناطیسی پیرامون آهنربای ساچمه ای بصورت تک و زنجیری در شکل ۲ نشان داده شده است. متوسط چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۱mm از سطح آهنربا در تک کره ۳۱۴ میلی تسلا و در ۴ آهنربا زنجیری متصل ۳۹۶ میلی تسلا می‌باشد. همچنین توزیع چگالی شار مغناطیسی آهنربای کروی برش خورده (بصورت نیم کره) بصورت تک و در اتصال با آهنربا استوانه‌ای با ابعاد  $(40 \times 8 \varnothing)$  در شکل ۳ آورده شده است. متوسط چگالی شار مغناطیسی در آهنربای ساچمه ای برش خورده در فاصله ۱mm از سطح آهنربا ۲۴۹ میلی تسلا و در همین فاصله از سطح آهنربای ترکیبی (آهنربا استوانه ای + آهنربا ساچمه ای برش خورده)، ۴۴۳ میلی تسلا می‌باشد.

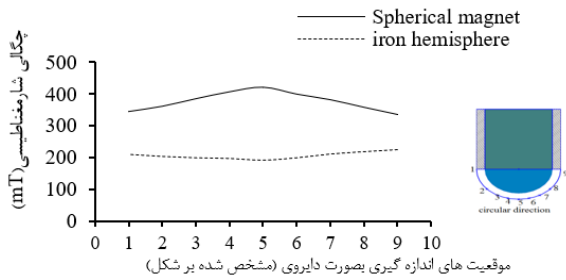


شکل ۲) توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهنربای کروی، تک و ۴ عدد بصورت زنجیری



شکل ۳) توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهنربا ساچمه ای برش خورده و آهنربا ترکیبی

از مقادیر حاصل از شبیه سازی و مطابقت آن‌ها با نتایج اندازه گیری مشخص است که چگالی شار مغناطیسی مخصوصاً در هنگام اتصال به آهنربای استوانه‌ای مقدار قابل توجهی می‌باشد.



شکل ۷) اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح نیم‌کره به صورت دایره‌ای



شکل ۸) نحوه تشکیل جاروبک ساینده

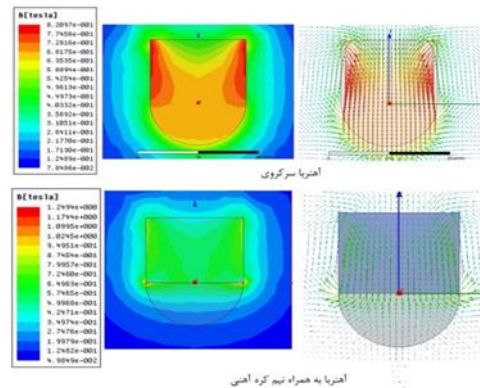
۲-۳- شرایط بهینه

۲-۳-۱- قطب مخالف

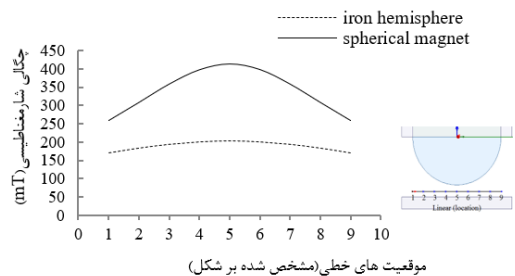
تأثیر آهنربا با قطب مخالف بر پراکندگی ذرات ساینده به دلیل کاهش فاصله ی بین آهنرباها می باشد. قطب مخالف باعث می‌شود که ذرات ساینده ی ناحیه ی پایینی نیم کره ی آهنربا بیشتر شده و بر سطح قطعه کار متمرکز گردند. در شکل ۸ تأثیر قرارگیری آهنربا و درگیری همزمان سطح کامل نیمکره بر سطح قطعه کار نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، زنجیره ی پودرهای ناحیه ی میانی آهنربا نیز با آهنربای قطب مخالف تشکیل مدار بسته داده و به همین خاطر به سمت قطعه کار متمایل می گردند. تأثیر این رویکرد بیشتر در زاویه ی ۹۰ و ۱۰۵ درجه دیده می شود. در زاویه ی ۹۰ درجه عرض جاروبک ساینده عمل کننده بر سطح قطعه کار افزایش پیدا کرده و همین امر باعث افزایش عملکرد تعداد بیشتری زنجیره ی مغناطیسی ساینده بر سطح قطعه کار شده و سطحی با کیفیت مطلوب تر را ایجاد می کنند. در واقع در این دو زاویه علاوه بر تمرکز بیشتر ذرات ساینده، در یک زمان کل سطح نیم کره فرایند MAF را انجام می دهند و همین امر باعث افزایش کارآمدی می گردد. اما در زاویه ی ۱۲۵ درجه در نیمه ی دیگر، با این که جهت ذرات ساینده ی مغناطیسی به سمت قطعه کار متمایل می شود، اما به علت فاصله ی زیاد تا سطح قطعه کار، میزان چگالی شار مغناطیسی به میزان کافی جهت نفوذ ذرات بر سطح نمی باشد. در شکل ۱۴ سطح مؤثر نیم کره ی آهنربا با سطح مقعر در زاویه ی انحناء ۱۲۵، ۱۰۵ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. همچنین در

چگالی شار مغناطیسی حاصل از این نوع آهنربا توسط اندازه گیری و شبیه سازی بدست آمده است. در شکل شکل ۴ توزیع چگالی شار مغناطیسی در نیم کره آهنی و آهنربای سرکروی نشان داده شده است. شکل های ۵ و ۷ به چگالی شار مغناطیسی در راستای خطی و دایره ای حاصل از شبیه سازی اشاره دارند.

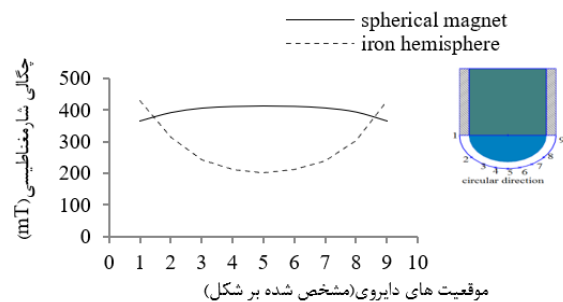
جهت تایید نتایج حاصل از شبیه سازی، اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی توسط گوس متر انجام شده است. نتایج حاصل در شکل ۵ آورده شده است. همچنین نحوه تشکیل جاروبک ساینده مغناطیسی پیرامون هر دو ابزار مذکور در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۹) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهنربای سرکروی و آهنربای استوانه ای به همراه نیم کره آهنی



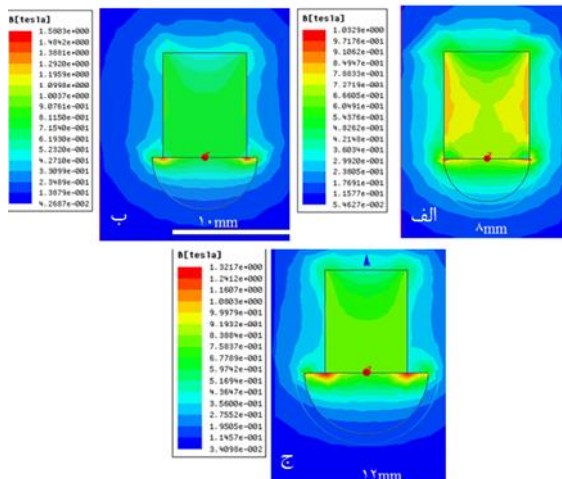
شکل ۱۰) توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی متر از سطح نیم کره به صورت خطی (شبیه سازی)



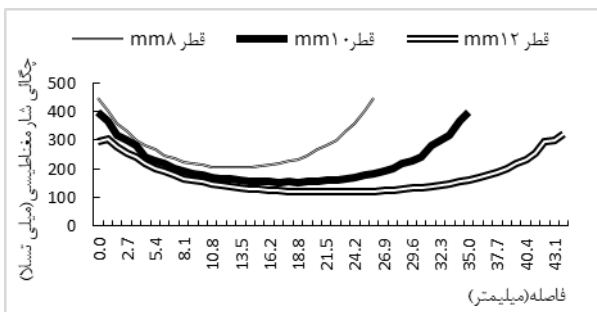
شکل ۱۱) توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی متر از سطح نیم کره به صورت دایره ای (شبیه سازی)

استفاده از حجم پودر بالا سرعت دورانی نباید از ۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یابد. در شکل ۹ نحوه ی قرارگیری پودر ساینده بر سطح نیم کره ی آهنی قبل و بعد از افزایش سرعت دورانی نشان داده شده است.

با توجه به موارد ذکر شده، کاهش قطر نیم کره ی آهنی باعث کاهش فاصله ی آهنربا و در نتیجه افزایش چگالی شار مغناطیسی می شود. از طرف دیگر، کاهش قطر نیم کره ی آهنی باعث کاهش سطح درگیر در انجام فرایند شده و بر تغییرات زبری سطح تأثیر می گذارد. جهت بررسی تأثیر شعاع از نیمکره‌های آهنی با قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی متر استفاده شده است. ابتدا توسط نرم‌افزار المان محدود ماکسول، نحوه ی توزیع چگالی شار مغناطیسی بر سطح نیم کره به دست آمده است (شکل ۷). در شکل ۸ نحوه ی توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ی ۲ میلی متر از نیم کره ی آهنی در قطرهای مختلف آورده شده است.



شکل ۸) توزیع چگالی شار مغناطیسی در نیم کره آهنی با قطرهای گوناگون (الف) ۸mm (ب) ۱۰mm (ج) ۱۲mm



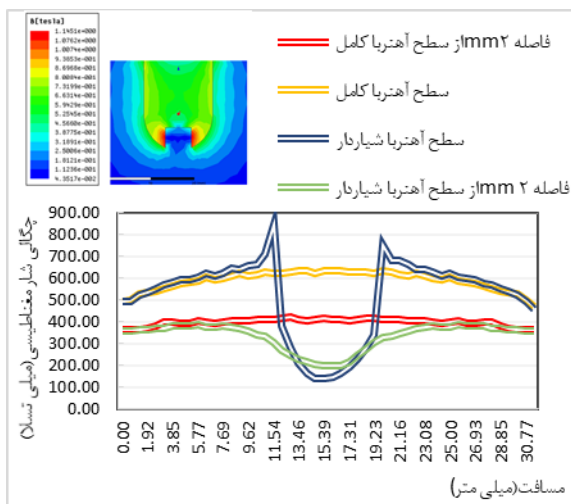
شکل ۹) توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ی ۲ میلی متر از سطح نیم کره های آهنی با شعاع (۸، ۱۰ و ۱۲ میلی متر)

شکل ۱۵ محل قرارگیری نیم کره ی آهنربا بر زاویه ی انحناء ۹۰ درجه ی سطح مقعر نشان داده شده است.

در زاویه ی انحناء ۹۰ و ۱۰۵ درجه، قسمت پایینی و بخشی از قسمت میانی سطح نیم کره ی آهنربا به انجام فرایند MAF می پردازند. اما در زاویه ی ۱۲۵ درجه قسمت میانی و بخشی از قسمت بالایی نیمکره با سطح قطعه کار در تماس هستند. یکی از دلایل عمده ی تفاوت زبری حاصله در این ناحیه نسبت به سایر زوایای انحناء همین مطلب می باشد.

۲-۳-۲- شعاع نیم کره های آهنی متصل به آهنربای استوانه ای یکی از روش های ساخت آهنربای سر کروی، که به آن اشاره شد، نیم کره آهنی متصل به آهنربای استوانه ای است. برخلاف نیم کره ی آهنربا، چگالی شار مغناطیسی ناحیه ی بالایی از ناحیه پایینی بیشتر است. این رفتار با فاصله از سطح نیم کره ی آهنی نیز دیده می شود. در فاصله ی ۲ میلی متر از سطح نیم کره، به جز قسمتی از ناحیه ی فوقانی، مابقی سطح از چگالی شار مغناطیسی یک نواختی برخوردار می باشد. چگالی شار مغناطیسی و سرعت برشی بالای ناحیه فوقانی، نیم کره ی آهنی را جهت انجام فرایند MAF مناسب می سازد. ایراد عمده ی نیم کره های آهنی مقدار کم چگالی شار مغناطیسی بر سطح آن ها می باشد. زیرا برابر با شعاع نیم کره ی آهنی، فاصله با سطح آهنربا ایجاد می شود. هرچند که جنس نیم کره آهن نسبتاً خالص بوده و ضریب نفوذ مغناطیسی بالایی دارد، ولی در نهایت با فاصله گرفتن از سطح آهنربا میزان چگالی شار مغناطیسی کاهش می یابد. با توجه به مطالب گذشته، میانگین توزیع شار مغناطیسی بر سطح نیم کره ی آهنی تقریباً نصف میانگین چگالی شار مغناطیسی بر سطح نیم کره ی آهنربا می باشد. مقدار کم چگالی شار مغناطیسی، نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات سایشی مغناطیسی و در نتیجه میزان نفوذ ذرات ساینده را کاهش می دهد. البته با توجه به این نکته، استفاده از نیم کره ی آهنی جهت انجام فرایند MAF بر سطوح قطعات با سختی کم و همچنین سطوح قطعاتی با زبری سطح پایین جهت جلوگیری از وارد شدن نیروی بیش از حد و ایجاد شیار عمیق، انتخاب مناسبی می باشد. همچنین در صورت استفاده از نیم کره ی آهنی، امکان افزایش دور اسپیندل (سرعت برشی) وجود ندارد. زیرا در سرعت های دورانی بالا، نیروی مغناطیسی مغلوب نیروی گریز از مرکز شده و با توجه به سرعت برشی بالای نواحی بالایی و میانی، ذرات سطوح بالایی و میانی سطح نیم کره ی آهنی را ترک کرده و قسمتی جذب ناحیه ی پایینی شده و مابقی به اطراف پرتاب می شوند. افزایش ذرات ساینده در ناحیه ی پایینی نیز به علت نبود نیروی مغناطیسی کافی، چندان در افزایش راندمان فرایند تأثیرگذار نمی باشد. آزمایشات ابتدایی نشان داد که جهت ایجاد سطح پوشیده از ذرات ساینده بر نیم کره ی آهنی، دو راه وجود دارد. استفاده از حجم پودر کم و یا در صورت

ناحیه پایینی معمولاً در سطوح با کیفیت بالا باعث افزایش زبری می‌گردد و در قطعه کار تأثیر نامطلوب می‌گذارد و باعث کاهش راندمان می‌گردد. یکی دیگر از فواید مهم شیاردار کردن، توزیع پودر سایشی مغناطیسی در سایر نواحی می‌باشد. با توجه به سطح ناحیه‌ی پایینی، مقدار زیادی پودر در این ناحیه جمع شده که کارایی چندانی نیز در فرایند ندارد. با ایجاد شیار، پودر بدون استفاده، به سایر نواحی آهنربا متصل می‌شود.



شکل ۱۰) توزیع چگالی شار مغناطیسی بر سطح و فاصله ۲ میلی‌متر از سطح آهنربای کامل و شیاردار

شیاردار کردن آهنربا باعث کاهش ناحیه‌ی غیر مؤثر پایینی شده و در قطعات غیر فرومغناطیس با کیفیت سطح مطلوب، مانع ایجاد خراش و آسیب دیدگی سطح می‌شود. با استفاده از نیم کره‌ی شیاردار، راندمان فرایند بر سطح شیب دار و در جهت حرکت از بالا به پایین نیز افزایش می‌یابد. تغییرات زبری در سطوح شیب دار قطعه کار فرومغناطیس از ۲۱ درصد به ۳۴/۴ درصد رسیده است. همچنین در انجام فرایند MAF بر سطح با زاویه‌ی انحنای ۹۰ و ۱۰۵ درجه‌ی سطح قطعه کار فرومغناطیس، تمرکز پودر در ناحیه‌ی پایینی برداشته شده و میزان زبری در این ناحیه نیز کاهش پیدا کرده است (۹ درصد افزایش تغییرات زبری).

### ۳- نتیجه‌گیری

با قرار دادن آهنربا با قطب مخالف در زیر قطعه‌کار، ذرات ساییده‌ی ناحیه‌ی پایینی نیم کره‌ی آهنربا بیشتر شده و بر سطح قطعه کار متمرکز گردند. که این امر موجب بهبود اجرای فرآیند بخصوص در زوایای ۹۰ و ۱۰۵ درجه سطح می‌گردد. با استفاده از آهنربای ساچمه‌ای و اتصال آن به آهنربای استوانه‌ای، چگالی شار مغناطیسی، مقدار قابل توجهی می‌باشد. و تنها ایراد آن، سایز کوچک این نوع آهنرباها است.

چگالی شار مغناطیسی با افزایش قطر کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش قطر مساحت سطح درگیر نیم‌کره‌ی آهنی با سطح قطعه کار بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، مساحت نیم کره‌ی آهنی افزایش پیدا کرده و باعث جذب ذرات ساییده‌ی مغناطیسی بیشتری می‌گردد. با افزایش سطح تماس و ذرات ساییده‌ی منطقه‌ی بیشتری از قطعه کار تحت فرایند قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش قطر، سرعت برشی نواحی مختلف افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که این افزایش در محدوده‌ای باشد که امکان حفظ ذرات ساییده مغناطیسی وجود داشته باشد، این اقدام در راستای افزایش راندمان مفید خواهد بود و در صورتی که باعث پرتاب ذرات ساییده مغناطیسی شود، اثر سوء بر فرایند خواهد گذاشت. تطابق نواحی سه‌گانه بر زوایای انحنای سطح محدب و مقعر و همچنین تثبیت فاصله‌ی گپ با افزایش شعاع نیم کره‌ها تغییری پیدا نمی‌کند. در آزمایش‌های انجام شده توسط نیم کره‌ی آهنی با قطر ۲۵ میلی‌متر، افزایش سرعت بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه باعث کاهش ذرات ساییده گردید. اما در قطر ۲۰ میلی‌متر امکان افزایش دور اسپیندل تا ۷۰۰ دور در دقیقه وجود دارد. افزایش قطر و در نتیجه افزایش سطح نواحی سه‌گانه‌ی واقع بر نیم کره، در ایجاد سطح یک نواخت نیز تأثیرگذار خواهد بود. فرایند MAF توسط نیم کره‌ی آهنی و بر سطح قطعات سخت به علت نیروی کم مغناطیسی جهت نفوذ ذرات ساییده در قطعه کار، راندمان مناسبی ندارد. لازم به ذکر است که مسیر نیم کره در استراتژی‌های به دست آمده به ازاء قطرهای مختلف، تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و به ازاء گپ ثابت، نسبتاً موازی با انحنای سطح قطعه کار می‌باشند. در شکل ۱۹ این پدیده نشان داده شده است.

### ۲-۳-۳- آهنربای سرکروی شکاف دار

ناحیه‌ی پایینی نیم کره‌ی آهنربا نسبت به سایر سطوح آهنربا از کارایی کمتری برخوردار می‌باشد. در سطوح با زبری مناسب، این ناحیه باعث ایجاد خراش ناخواسته و آسیب دیدگی سطح می‌گردد. در قطعات فرومغناطیس با تشکیل جاروبک بسیار قوی در بین این ناحیه و سطح قطعه کار، فرایند MAF کارایی بالایی ندارد (شکل ۲۰). جهت حل این مشکل می‌توان از شیاردار کردن آهن ربای کروی استفاده کرد.

با توجه به شکل ۲۱ مشخص است که با استفاده از شیاردار کردن، تمرکز چگالی شار مغناطیسی در ناحیه‌ی پایینی کاهش پیدا می‌کند. البته عمق و عرض شیار نیز تأثیرگذار است که در این پژوهش با توجه به تحقیقات پیشین این مقادیر انتخاب شده است [۲۳].

بررسی آهنربای شیار دار بر سطح قطعه کار آهنی- آلومینیومی بررسی شده است. البته لازم به ذکر است که خراشیدگی ناشی از

10. Qian C, Fan Z, Tian Y, Liu Y, Han J, Wang J. A review on magnetic abrasive finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;112(3):619-34
11. Sathua CS, Jain V, Ramkumar J, Sidpara A. Analysis of forces and surface roughness in magnetic abrasive finishing with a ball-end tool. *International Journal of Precision Technology*. 2013;3(2):131-42.
12. Anzai M, Yoshida T, Nakagawa T. Magnetic abrasive automatic polishing of curved surface, focused on experimental equipments and characterization. *RIKEN Review No 12*. 1996:15-6.
13. Ding YH, Yao XG, Wang XX, Yang SC, editors. Study on the performances of the ferromagnetic poles based on the curved surface magnetic abrasive finishing. *Key engineering materials*; 2008: Trans Tech Publ.
14. Sun Y, Yuan S, Feng B, Cai GQ, Shi JS, Hu G, editors. Research on magnetic abrasive finishing for the free form surface of mould by 5-DOF parallel virtual axis machine tool. *Key Engineering Materials*; 2004: Trans Tech Publ.

در روش اتصال نیم کره آهنی به استوانه آهنربا، کاهش قطر نیم کره آهنی باعث کاهش فاصله آهنربا و در نتیجه افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌شود. و همچنین، کاهش قطر نیم کره آهنی باعث کاهش سطح درگیر در انجام فرآیند شده و بر تغییرات زبری سطح تأثیر می‌گذارد.

با شیاردار نمودن آهنربای سرکروی، تغییرات زبری درسطوح شیب دار قطعه کار فرومغناطیس از ۲۱ درصد به ۳۴/۴ درصد رسیده و همچنین در ناحیه شیب دار با زاویه ۹۰ و ۱۰۵ درجه ی سطح قطعه کار فرومغناطیس، ۹ درصد افزایش تغییرات زبری، رخ می‌دهد.

#### ۴-مراجع

1. Chen H, Zhang Y, Yan W, editors. The technology of finishing process of die space based upon magnetic abrasive finishing. *Key engineering materials*; 2004: Trans Tech Publ.
2. Vahdati M, Rasouli S. Evaluation of parameters affecting magnetic abrasive finishing on concave freeform surface of Al alloy via RSM method. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016;2016.
3. Lin C-T, Yang L-D, Chow H-M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007;34(1):122-30.
۴. چوپانی ی، خواجه زاده م، رازفر م. بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی با استفاده از روش روبه پاسخ. *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*. ۲۰۱۹;۵۲(۱۰):۷۰۸-۲۶۹۱.
۵. رسولی سع، وحدتی م، جابری اا. تأثیر پارامترهای حرکتی پرداخت کاری به روش سایشی مغناطیسی بر روی سطح محدب و مقعر آلومنیوم آلیاژی. *مجله علمی پژوهشی مهندسی ساخت و تولید ایران*. ۲۰۲۲;۸(۱۱):۶۳-۷۵.
6. Purohit R, Rana R, Yadav V, Singh R, Kushwaha S. Magnetic abrasive finishing of non-magnetic materials (Al 6061) using flexible magnetic brush. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44:2205-10.
7. Singh G, Kumar H. Influence of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on external roundness of Inconel 625 tubes. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:3283-8.
8. Zou Y, Xie H, Zhang Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;109(7):1825-39.
9. Kanish T, Narayanan S, Kuppan P. Experimental investigations on magnetic field assisted abrasive finishing of SS 316L. *Procedia Manufacturing*. 2019;30:276-83.