



## اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی وارد بر ذره ساینده در روش پرداخت- کاری سایشی مغناطیسی

مهرداد وحدتی<sup>۱\*</sup>، سید علیرضا رسولی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* vahdati@kntu.ac.ir، ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹

### چکیده

از روش‌های غیر سنتی پرداخت‌کاری که برای قطعات با شکل‌ها و جنس‌های مختلف مانند صفحات تخت، سطوح آزاد و پیچیده، و انواع لوله‌ها با قطرهای متفاوت و هر قطعه‌ای که نیاز به صافی سطح بسیار خوب داشته باشد، قابل استفاده است، پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی می‌باشد. مکانیزم براده برداری در حد بسیار کم (میکرو و نانو) را می‌توان با تشکیل جاروبک ساینده مغناطیسی که شامل ذرات مغناطیسی مانند آهن و ذرات ساینده مانند اکسید آلومینیوم، و غیره می‌باشد، توضیح داد. این بررسی شامل اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در فاصله بین آهن‌ربا با شکل‌های مختلف و قطعه‌کار با جنس‌های متنوع شامل فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس می‌باشد. اندازه‌گیری توسط دستگاه تسلامتر صورت گرفته است. همچنین جهت بررسی مدل‌ها و شرایط مختلف به شبیه‌سازی با بسته نرم‌افزاری المان محدود ماکسول نیز پرداخته شده است. تاثیر جنس فیکسچر آهن‌ربا و فیکسچر قطعات نیز بر روی نحوه شکل‌گیری میدان مغناطیسی و شدت آن بررسی شده است. این شبیه‌سازی‌ها در هر دو حالت ۲ بعدی و ۳ بعدی انجام شده است.

کلید واژگان: پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، آزمایشات، شبیه‌سازی، تسلامتر، نرم‌افزار ماکسول

## Measurement and simulation of the magnetic flux density exerted on the abrasive particles in Magnetic abrasive finishing (MAF)

Mehrdad Vahdati\*, Seyyed Alireza Rasouli

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, vahdati@kntu.ac.ir

### ABSTRACT

Magnetic abrasive finishing is non-traditional machining process which is applicable for various parts of different shapes and materials, such as flat plates of complex levels and types of pipes with different diameters and every piece that needs good surface finish. Removal mechanism, at the very least (Micro and Nano) can be explained by the formation of magnetic abrasive brushes which include magnetic particles such as iron and aluminum oxide abrasive particles. This study includes the measurement of the intensity of the magnetic field, the distance between the magnets and various forms of workpieces in a variety of materials, including ferromagnetic and non-ferromagnetic. Measurement was performed by tesla meter. The simulation was performed with Maxwell finite element software package to survey the methods and conditions. The effects of the magnet fixture material and fixture components have been studied on the formation of the magnetic field and its severity. These simulations were performed in both 2D and 3D.

**Keywords:** Abrasive Finishing, Experiment, Magnetic field, Simulation, Tesla Meter.

که از میدان مغناطیسی برای کنترل براده‌برداری استفاده می‌کند پرداخت-  
کاری سایشی مغناطیسی است [۲]. مشخصه بارز این فرآیند استفاده از  
میدان مغناطیسی قابل کنترل برای مطابقت زنجیره سایشی مغناطیسی با فرم  
سطح ماشین‌کاری است. در این روش پودر ساینده مغناطیسی که یک  
مخلوط همگن از ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس مانند آهن است روی  
سطحی از قطعه‌کار که باید پرداخت شود قرار می‌گیرد. هنگامی که ذرات  
آهن در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، در امتداد خطوط نیروی مغناطیسی  
به هم متصل می‌شوند و تشکیل زنجیره مغناطیسی را می‌دهند. از اتصال  
زنجیره‌ها جاروبک ساینده انعطاف‌پذیر به وجود می‌آید. به علت وجود پودر  
ساینده دارای لبه‌های برنده در برس، جاروبک مانند یک ابزار چند لبه رفتار  
می‌کند. با حرکت میدان مغناطیسی نسبت به قطعه‌کار این توده پودری به

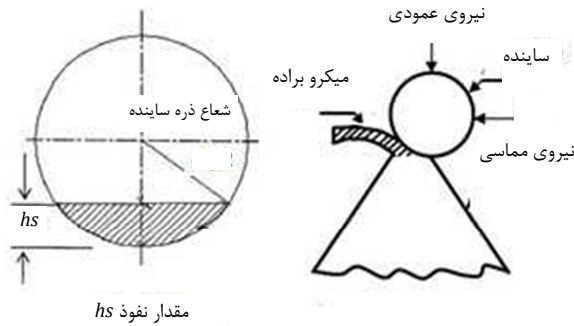
### ۱- مقدمه

نیاز روزافزون به سطوح پرداخت شده و دقیق در صنایع و ناتوانی روش‌های  
سنتی در بسیاری موارد، منجر به تحولات بسیاری در زمینه فرآیندهای تولید  
و پرداخت قطعات شده است. در روش‌های سنتی به دلیل این‌که ابزار مورد  
استفاده برای پرداخت صلب است، در مورد قطعات با منحنی‌های خاص  
قابلیت تطبیق با شکل قطعه را ندارد و حتی در برخی موارد سبب آسیب  
دیدن سطح کار می‌شود. برای پرداخت این سطوح نیاز به پرداخت به صورت  
دستی می‌باشد [۱]. این گونه پرداخت اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر است. بنابراین  
نیاز به روش‌های جدید که قابلیت پرداخت سطوح با اشکال هندسی و  
هم‌چنین جنس‌های مختلف را داشته باشند به شدت احساس می‌شود. در این  
راستا استفاده از میدان مغناطیسی به طور عمومی در کنترل فرآیند تولید و  
به طور خاص در پرداخت‌کاری مورد توجه واقع شده است. از جمله روش‌هایی

Please cite this article using:

M. Vahdati, S.A. Rasouli, Measurement and simulation of the magnetic flux density exerted on the abrasive particles in Magnetic abrasive finishing (MAF), Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 248-256, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۲ شماتیکی از ذره ساینده به همراه مقدار نفوذ

همین راستا بررسی رفتار منشأ نیروی مغناطیسی که همان آهن‌ربا دائم می‌باشد بسیار ضروری است. پیرامون شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی آهن‌ربا الکتریکی تحقیقاتی در گذشته صورت گرفته است [۹،۸]. میثرا و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی حرارتی جاروبک ساینده مغناطیسی در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی پرداختند. دمای پیش‌بینی شده در جاروبک در محدوده ۳۴-۵۱ می‌باشد [۱۰]. دای یانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ پارامترهای پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را با روش تاگوچی بررسی کرده‌اند. جهت انتخاب آهن‌ربا دائمی مورد نیاز، آهن‌ربا استوانه‌ای توپر، توخالی و توخالی شیاردار را شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۱]. جوی سائب در سال ۲۰۱۱ آهن‌ربا الکتریکی را در میز آهن‌ربا جهت پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی صفحات منیزیمی شبیه‌سازی کرده است. تاثیر آهن‌ربای با قطب مخالف در زیر قطعه-کار بررسی شده است [۱۲]. جای سائب همچنین اثر آهن‌ربا مخالف را در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی توسط آهن‌ربا دائمی در سال ۲۰۰۹ توسط شبیه‌سازی بررسی کرده است [۱۳].

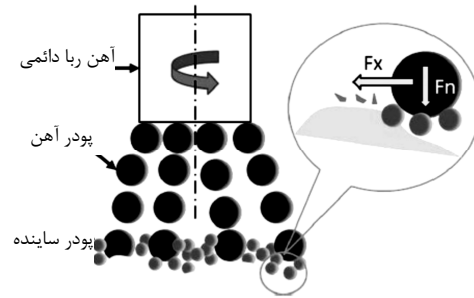
در این مطالعه با توجه به شکل و سایز آهن‌ربا دائمی، جنس قطعه‌کار، جنس فیکسچر قطعات و جنس فیکسچر آهن‌ربای دائمی به اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی و در نهایت نیروی مغناطیسی وارد بر ذره ساینده پرداخته شده است.

## ۲- بررسی ابعاد هندسی آهن‌ربای دائمی

از آن‌جا که در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی سطوح تخت، آهن‌ربا دارای حرکت دورانی می‌باشد، از آهن‌ربا استوانه‌ای استفاده می‌شود. قطر و ارتفاع آهن‌ربا و همچنین تعداد آهن‌ربا مورد استفاده در حالت دویعدی و سه بعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار المان محدود ماکسول صورت گرفته است. شاید تصور شود که بطور مثال هر نوع آهن‌ربا Nd۳۵، ۱/۳ تسلا در سطح آهن‌ربا همان مقدار چگالی شار مغناطیسی اسمی را دارد. در حالی که با توجه به ابعاد آهن‌ربا و شرایط مجاورتی آهن‌ربا مقدار چگالی شار مغناطیسی خروجی متفاوت می‌باشد. به همین خاطر تسلط بر نوع رفتار آهن‌ربا در سایزهای گوناگون و شرایط هم‌جواری متفاوت جهت بررسی نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات ساینده مغناطیسی و در نتیجه میزان عمق نفوذ ذره ساینده بسیار مهم می‌باشد.

## ۲-۱- بررسی ارتفاع آهن‌ربا دائمی

آهن‌ربای دائمی N۳۵ با قطر ۲۰ میلی‌متر و با ارتفاع‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵



شکل ۱ شماتیکی از فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی

حرکت در می‌آید و برداشت ماده به‌صورت بسیار ظریف و ریز اتفاق می‌افتد و ناهمواری‌های در حد میکرومتر و نانومتر ماشین‌کاری می‌شوند [۳]. دمای ایجاد شده در فرآیند مذکور در مقایسه با سایر روش‌های پرداخت‌کاری بسیار ناچیز می‌باشد. در شکل ۱ شماتیکی از فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نشان داده شده است [۴].

نیروی مغناطیسی از آهن‌ربا الکتریکی و دائمی حاصل می‌شود. با توجه به مشکلات آهن‌ربا الکتریکی مانند اشغال فضای زیاد و نیاز مبرم به سیستم خنک‌کاری از آهن‌ربا دائمی جهت تولید میدان مغناطیسی استفاده شده است [۵]. از تفاوت‌های عمده روش سایشی مغناطیسی با روش‌های سنتی مقدار نیروی اعمال شده بر ذرات ساینده می‌باشد. مقدار نیروی مغناطیسی وارد بر ذره ساینده در حد میکرونیوتن می‌باشد که باعث نفوذ بسیار ناچیز ذره ساینده در سطح قطعه‌کار می‌گردد. فشار پرداخت‌کاری وارد بر سطح قطعه-کار از رابطه (۱) به دست می‌آید [۶].

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) = \left[\mu_0 H^2 \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right)\right] / 2 \quad (1)$$

$$\mu_m = \frac{2 + \mu_F - 2(1 - \mu_F)V_i}{2 + \mu_F - (1 - \mu_F)V_i} \quad (2)$$

در این رابطه مشخص است که فشار پرداخت‌کاری  $P$  رابطه مستقیم با شدت میدان مغناطیسی  $H$  (KA-per-m)، چگالی شار مغناطیسی  $B(T)$ ، ضریب نفوذ مغناطیسی در خلا  $\mu_0$  و رابطه معکوس با ضریب نفوذ مغناطیسی جاروبک ساینده  $\mu_m$  دارد. ضریب نفوذ مغناطیسی جاروبک ساینده از رابطه (۲) به دست می‌آید که در آن  $\mu_F$  ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهن و  $V_i$  درصد حجمی ذرات آهن نسبت به کل پودر می‌باشد. با فرض یکسان بودن قطر تمامی ذرات ساینده میزان نیروی اعمالی بر ذرات مغناطیسی طبق رابطه (۳) و (۴) به دست می‌آید. همچنین با فرض این که در هر ذره مغناطیسی یک لبه ساینده وجود دارد مقدار نیروی اعمالی بر ذره ساینده به دست می‌آید.

$$F_n = PA \quad (3)$$

$$f_n = \frac{F_n}{n_a} \quad (4)$$

که در آن  $F_n$  مقدار نیروی وارد بر سطح،  $A$  سطح مقطع آهن‌ربا،  $n_a$  تعداد ذرات ساینده واقع بر سطح آهن‌ربا می‌باشد. با در نظر گرفتن کروی بودن ذره ساینده میزان عمق نفوذ ذره ساینده  $h_s$  را در سطح قطعه‌کار می‌توان از رابطه (۵) به دست آورد [۷].

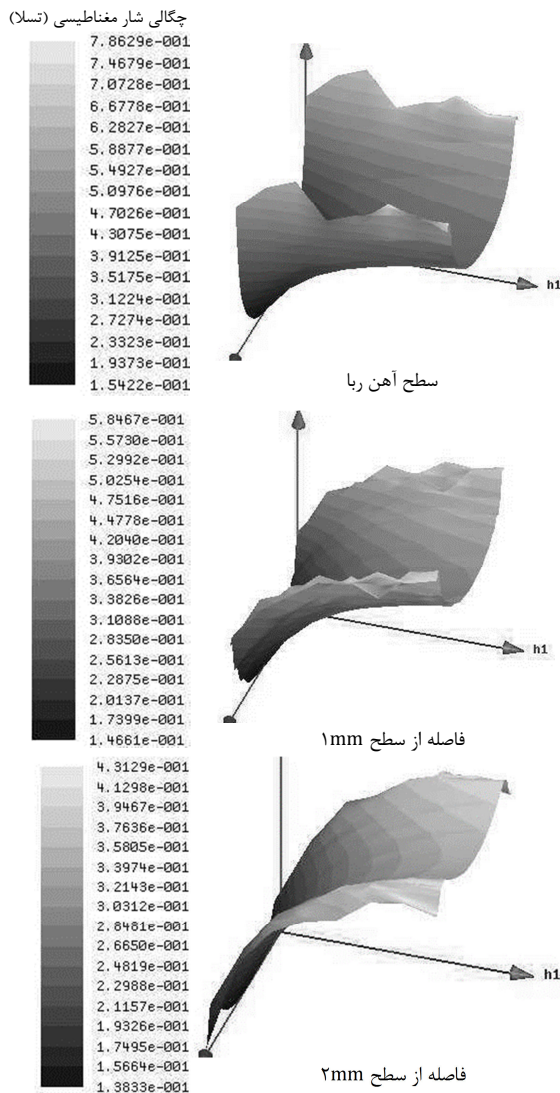
$$h_s = \frac{ds}{2} - \sqrt{\left(\frac{ds}{2}\right)^2 - \frac{f_n}{H_m \pi}} \quad (5)$$

که در آن  $ds$  قطر ذره ساینده و  $H_m$  سختی قطعه‌کار می‌باشد. در شکل ۲ شماتیکی از ذره ساینده به همراه میزان نفوذ نشان داده شده است.

از آن‌جا که هدف رسیدن به زبری سطح کمتر از میکرومتر می‌باشد، بررسی و کنترل دقیق مقدار نیروی وارد بر ذره ساینده بسیار مهم است. در

با توجه به منحنی‌های شکل ۵ مشهود است که در قطر ثابت با افزایش ارتفاع آهن‌ربا میزان شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار افزایش پیدا می‌کند. تفاوت چشمگیر مقادیر لبه‌های کناری آهن‌ربا و سایر نواحی به علت اثر لبه می‌باشد که در سطوح لبه‌دار آهن‌ربا صورت می‌گیرد و با فاصله گرفتن از سطح آهن‌ربا این پدیده نیز کاهش پیدا می‌کند.

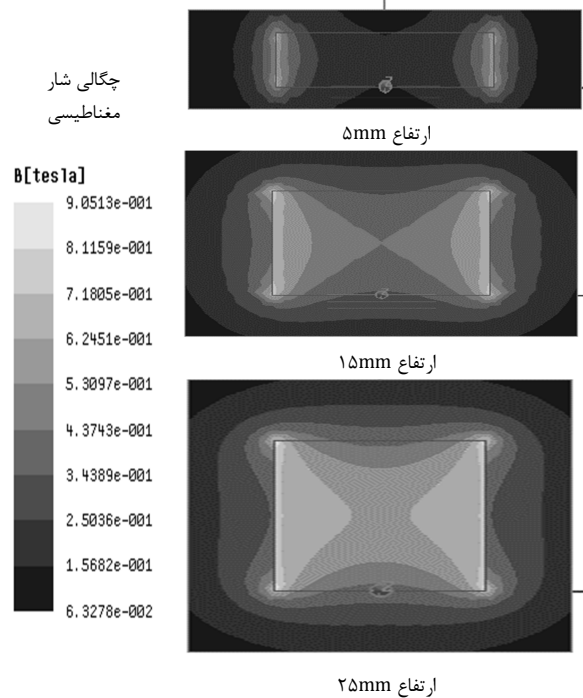
در شکل ۶ نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی حاصل از شبیه‌سازی در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا آورده شده است. در شکل ۷ نیز مقادیر اندازه‌گیری شده از فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌رباهای با قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵ و ۲۰ میلی‌متر آورده شده است. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در فواصل مختلف از سطح آهن‌رباهای مذکور در جدول شماره ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات در نمودارهای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با یکدیگر مطابقت دارد. تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در کمترین حالت ۴٪ و در بیشترین حالت ۱۴٪ می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی از مقادیر اندازه‌گیری بیشتر است.



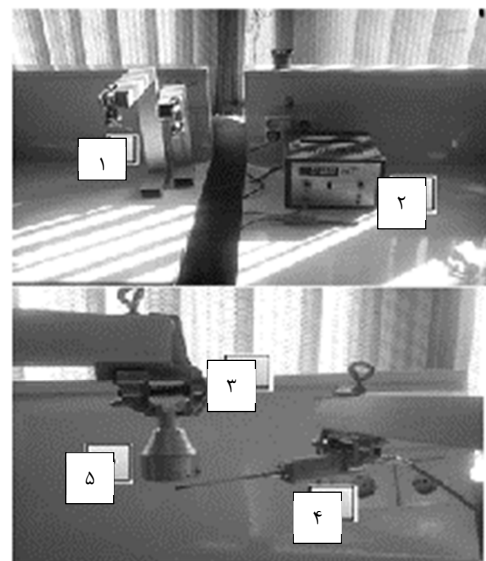
شکل ۵ چگالی شار مغناطیسی (B) در آهن‌ربا با ارتفاع‌های گوناگون (سطح آهن‌ربا و فواصل (۲ و ۱ میلی‌متر)

میلی‌متر به صورت ۲ بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل ۳ چگالی شار مغناطیسی را در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد.

تایید شبیه‌سازی و بررسی تاثیر ارتفاع آهن‌رباهای استوانه‌ای آزمایشاتی نیز انجام شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری توسط گوس سنج (PHWVE- در محدوده ۰-۲ تسلا) در سطح آهن‌ربا، و فواصل (۱ و ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا و در ۳ موقعیت صورت گرفته است. تمامی تجهیزات مورد استفاده در اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی از مواد غیرفرم مغناطیس ساخته شده است (شکل ۴).

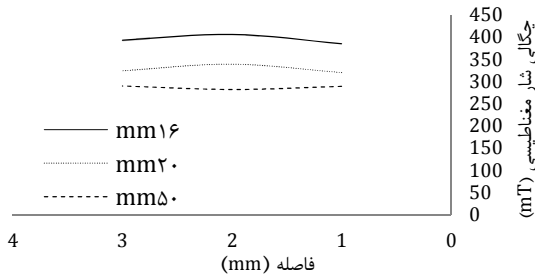


شکل ۳ شدت میدان مغناطیسی (H) در ارتفاع‌های متفاوت (آهن‌ربا ۳۵N با قطر ۲۰mm)



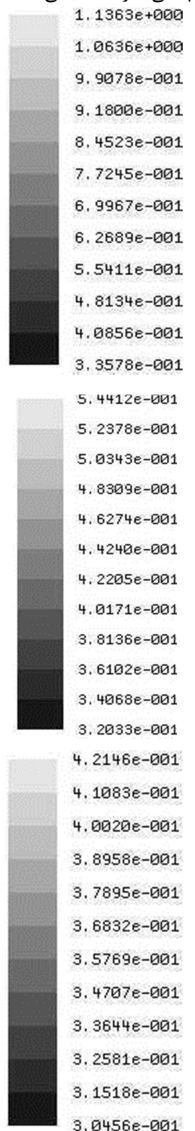
شکل ۴ تجهیزات اندازه‌گیری (۱) پایه‌های آلومینیومی (۲) دستگاه تسلا متر PHWVE (بهمراه پروپ (۳) گیره آلومینیومی (۴) پروپ اندازه‌گیری (۵) فیکسچر آلومینیومی آهن‌ربا

چگالی شار مغناطیسی را در سطح و با فواصل ۱ و ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ریبا نشان می‌دهد.

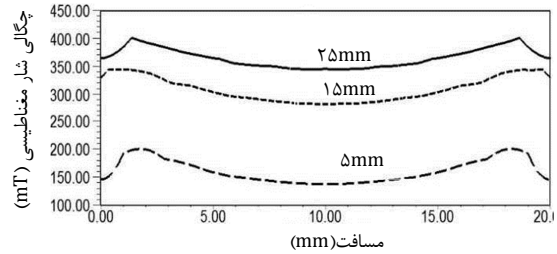


شکل ۹ مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی در آهن‌ریب‌های با ارتفاع ثابت و قطر متغیر

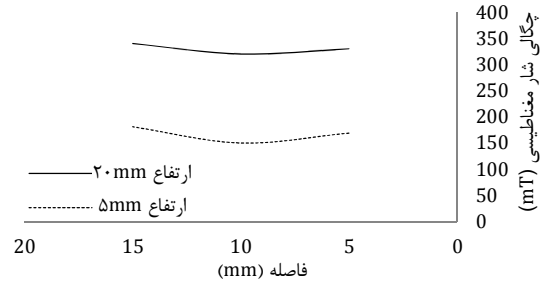
چگالی شار مغناطیسی (تسلا)



شکل ۱۰ توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهن‌ریبا با ارتفاع ۲۰ mm و قطرهای متفاوت (در فواصل مختلف از سطح آهن‌ریبا)



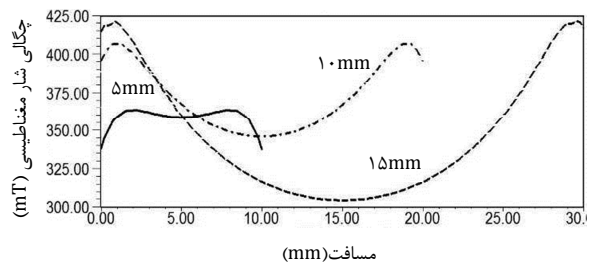
شکل ۶ توزیع چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در آهن‌ریبا با قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع‌های مختلف در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح (شبیه‌سازی)



شکل ۷ توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ریب‌های با قطر ۲۰ و ارتفاع‌های ۵ و ۲۰ میلی‌متر (اندازه‌گیری)

جدول ۱ مقادیر متوسط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در فواصل مختلف از آهن‌ریبا

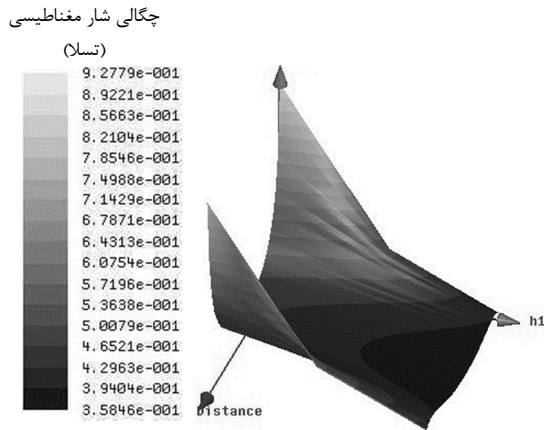
آهن‌ریب N35	ارتفاع ۵ mm	ارتفاع ۵ mm	ارتفاع ۲۰ mm	ارتفاع ۲۰ mm
قطر ۲۰ mm	شبیه‌سازی	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	اندازه‌گیری
سطح آهن‌ریب	۲۶۴/۱	۲۴۳/۳۳	۵۰۳	۴۴۳
فاصله = ۱ mm	۲۰۸	۲۰۰	۴۲۲/۹	۳۷۱
فاصله = ۲ mm	۱۷۸/۳	۱۶۶/۶۶	۳۷۱	۳۴۰



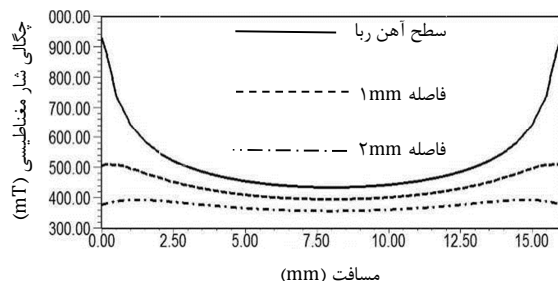
شکل ۸ توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهن‌ریب دائمی N۳۵ با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و قطرهای متفاوت در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ریب (شبیه‌سازی)

## ۲-۲- بررسی قطر آهن‌ریب دائمی

ارتفاع آهن‌ریب شبیه‌سازی شده ۲۰ میلی‌متر است. قطر ۱۰ میلی‌متر بیشترین میزان چگالی شار مغناطیسی را خواهد داشت. در شکل ۸ نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی ناشی از شبیه‌سازی در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح آهن‌ریب با قطرهای گوناگون دیده می‌شود. در شکل ۹ مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی آهن‌ریب‌های با ارتفاع ۲۰ و قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر در فاصله ۲ میلی‌متری آورده شده است. مانند قسمت قبل، بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مطابقت وجود دارد. شکل ۱۰ میزان تغییرات



شکل ۱۲ چگالی شار مغناطیسی آهن‌ریا قطر ۱۶ mm ارتفاع ۲۰ mm در فواصل مختلف از آهن‌ریا



شکل ۱۳ توزیع چگالی شار مغناطیسی (B) در فواصل مختلف از آهن‌ریا

متفاوت است. رابطه شدت میدان و چگالی شار به صورت منحنی می‌باشد. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با فاصله‌گیری از سطح آهن‌ریا رفتار منحنی چگالی شار مغناطیسی تغییر پیدا می‌کند و از حالت تقعر به حالت ثابت و تا حدی تحدب تبدیل می‌گردد.

#### ۲-۵- بررسی تاثیر جنس قطعه‌کار، فیکسچر آهن‌ریا و فیکسچر قطعه‌کار بر چگالی شار مغناطیسی

واضح است که در حین انجام فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، آهن‌ریا در داخل فیکسچر قرار می‌گیرد. جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ریا از لحاظ خصوصیات مغناطیسی بر میزان شدت میدان آهن‌ریا و همچنین نحوه پراکندگی شدت میدان مغناطیسی در سطح آهن‌ریا بسیار تاثیرگذار است. درصد وزنی ذرات فرومغناطیس در برس ساینده نیز بر مقدار چگالی و شدت میدان مغناطیسی و بالتبع بر میزان فشار پرداخت‌کاری و نیروی مغناطیسی اثر می‌گذارد. لازم به ذکر است که یکنواختی میزان شدت میدان در سطح آهن‌ریا نیز بسیار مهم می‌باشد. اگر تفاوت چگالی شار مغناطیسی بین مرکز و لبه آهن‌ریا زیاد باشد بر میزان تغییرات زبری سطح اثر نامناسبی می‌گذارد. شبیه‌سازی صورت گرفته با در نظر گرفتن ۳ فاکتور و هر فاکتور ۲ سطح انجام شده است. آلومینیوم با ضریب نفوذ مغناطیسی نزدیک به ۱ جزء مواد غیرفرومغناطیس بوده و فولاد جزء مواد فرومغناطیس می‌باشد. در شبیه‌سازی و آزمایشات از این مواد استفاده شده است. جهت بدست آوردن فاکتورهای موثر بر میزان چگالی شار مغناطیسی از روش‌های آماری طراحی آزمایشات جهت انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. از روش فول

بیشترین میزان متوسط در آهن‌ریا در محدوده قطر ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشهود است با کاهش قطر تغییرات میزان چگالی شار نیز کمتر می‌شود. به طور کلی از لحاظ ساختار هندسی آهن‌ریای استوانه‌ای را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. آهن‌ریاهای دیسکی (آهن‌ریاهایی که قطر از ارتفاع بیشتر است) و یا آهن‌ریاهای استوانه‌ای که ارتفاع آن‌ها از قطرشان بیشتر است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشخص است که استفاده از آهن‌ریاهای استوانه‌ای به علت یکنواختی بیشتر چگالی شار مغناطیسی در سطح آهن‌ریا در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نتایج بهتری را رقم می‌زند.

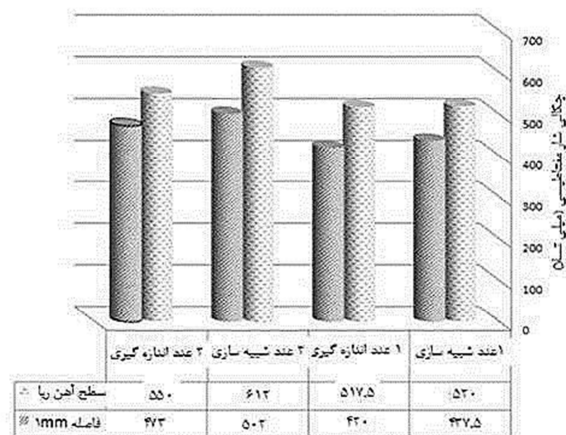
#### ۲-۳- تاثیر تعداد آهن‌ریا

در بعضی مواقع جهت افزایش شدت میدان آهن‌ریا، آهن‌ریاها را از سمت قطب مخالف به یکدیگر متصل می‌کنند. همان‌طور که مشخص است با اتصال آهن‌ریاها شدت میدان چند برابر نمی‌گردد. در شکل ۱۱ نمودار مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی ۱ و ۲ عدد آهن‌ریا بر روی سطح و فاصله ۱ میلی‌متری از سطح آورده شده است.

#### ۲-۴- اثر فاصله از آهن‌ریا

از نکات بسیار مهم در میزان شدت میدان مغناطیسی گپ یا فاصله از سطح آهن‌ریا می‌باشد. در فرآیند MAF مقدار بهینه گپ بسیار مهم می‌باشد. در یک آهن‌ریا ثابت با ایجاد فاصله از سطح آهن‌ریا میزان شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. اگر فاصله بین سطح قطعه‌کار و سطح آهن‌ریا در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی بیش از حد کم باشد، برس ساینده صلب شده و باعث خراشیدگی سطح قطعه‌کار می‌گردد و اگر گپ بیش از حد زیاد باشد آهن‌ریا در سرعت‌های دورانی بالا توان نگهداری پودر ساینده مغناطیسی را نخواهد داشت. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تاثیر گپ در آهن‌ریای دائمی N۳۵ با ابعاد ۱۶mm قطر و ۲۰mm ارتفاع نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی فاصله گپ، هوا با نفوذ مغناطیسی ( $\mu=1$ ) در نظر گرفته شده است.

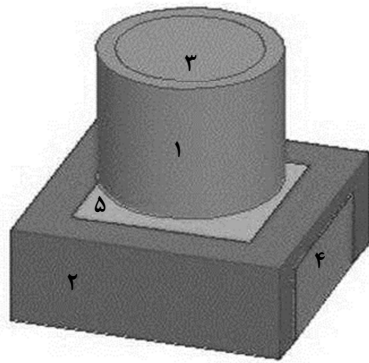
طبق رابطه  $B = \mu H$  رفتار شدت میدان و چگالی شار با یکدیگر متناسب می‌باشد. البته این هماهنگی در شرایطی است که در رابطه ضریب  $\mu$  ثابت باشد. در بسیاری از مواد ضریب نفوذ مغناطیسی مواد در شدت میدان‌های مختلف



شکل ۱۴ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده چگالی شار مغناطیسی ۱ و ۲ عدد آهن‌ریا (در سطح و فاصله ۱mm)

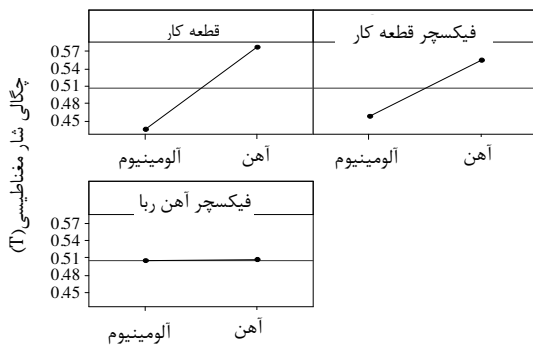
جدول ۴ داده های خروجی آنالیز واریانس

پارامتر	درجات آزادی	عدد فیشر	مقدار P
فاکتور های اصلی	۳	۶۳۷۶/۲۵	۰/۰۰۹
جنس قطعه کار	۱	۱۲۹۵۰/۴	۰/۰۰۶
جنس فیکسچر قطعه کار	۱	۶۱۷۷/۹۶	۰/۰۰۸
جنس فیکسچر آهن ربا	۱	۰/۳۶	۰/۶۵۶
بر هم کنش ها	۳	۱۶۲/۶۰	۰/۰۵۸
قطعه کار «فیکسچر قطعه کار	۱	۳۶۱/۶۰	۰/۰۳۳
قطعه کار «فیکسچر آهن ربا	۱	۱۴/۴۴	۰/۱۶۴
فیکسچر قطعه کار «فیکسچر آهن ربا	۱	۳۶/۱۲	۰/۰۶
خطا	۱		
مجموع	۷		

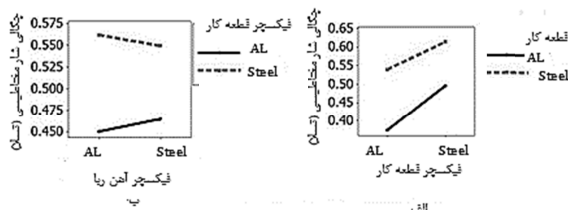


شکل ۱۴ مدل استفاده شده در شبیه سازی ۳ بعدی (۱) فیکسچر آهن ربا (۲) فیکسچر قطعه کار (۳) آهن ربا (۴) آهن ربا (۵) قطعه کار

نمودار تاثیر فاکتورهای اصلی و بر هم کنش فاکتورها در شکل های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است.



شکل ۱۵ اثر فاکتورهای اصلی



شکل ۱۶ اثر بر هم کنش ها الف) بر هم کنش قطعه کار و فیکسچر قطعه کار ب) فیکسچر قطعه کار و فیکسچر آهن ربا

فاکتورهای ۱ جهت طراحی مراحل شبیه سازی استفاده شده است. شکل ۱۴ مدل شبیه سازی شده را در حالت های ۲ بعدی و ۳ بعدی نشان می دهد. تمامی پارامترهای شبیه سازی شده به همراه سطوح انتخابی آن ها در جدول ۲ آورده شده است.

مقدار میانگین چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی متری از سطح آهن ربا به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ شبیه سازی های صورت گرفته به همراه مقادیر خروجی آورده شده است. با آنالیز آماری واریانس<sup>۲</sup> بر روی مقادیر خروجی، فاکتورهای موثر و همچنین نحوه تاثیر آن ها بر میزان چگالی شار مغناطیسی به دست می آید. در جدول ۳ مقادیر مربوط به آنالیز واریانس آورده شده است. نرم افزار مینیتب<sup>۳</sup> نسخه ۱۶، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرآیند موثر هستند که مقدار  $p$  بدست آمده با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد برای آن ها از ۰/۰۵ کمتر باشد. بر همین اساس جنس قطعه کار و جنس فیکسچر قطعه کار و بر هم کنش این دو فاکتور موثر می باشند.

طبق شکل های بالا مشخص است که تغییر جنس قطعه کار و جنس فیکسچر قطعه کار بر میزان چگالی شار مغناطیسی تاثیر می گذارد ولی جنس فیکسچر آهن ربا تاثیر چندانی ندارد. همچنین از اثر بر هم کنش فاکتورها مشخص است که در قطعه کار فرومغناطیس، فیکسچر قطعه کار فرومغناطیس باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی می گردد. البته در شرایطی که قطعه کار غیر فرومغناطیس باشد تاثیر فیکسچر قطعه کار فرومغناطیس خیلی بیشتر است. همچنین در شرایطی که فیکسچر قطعه کار فرومغناطیس باشد، فیکسچر غیر فرومغناطیس آهن ربا باعث افزایش بیشتر چگالی شار مغناطیسی بر سطح قطعه کار می گردد.

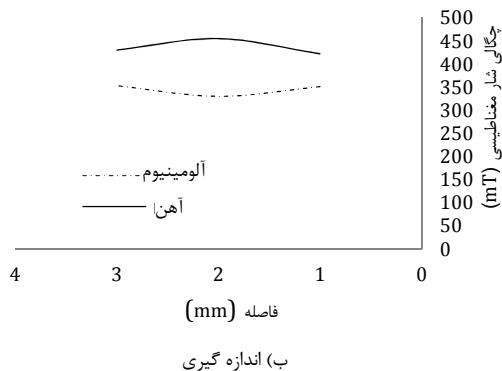
جدول ۲ فاکتورها و سطوح انتخابی آن ها

فاکتور	سطح
جنس قطعه کار	Steel108 Al7075
جنس فیکسچر قطعه کار	Steel1080 Al7075
جنس فیکسچر آهن ربا	Steel1080 Al7075

جدول ۳ شبیه سازی های انجام شده و مقادیر

شماره	جنس قطعه کار	جنس فیکسچر	جنس فیکسچر آهن ربا	چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا)
۱	Al	Al	Al	۰/۳۷
۲	steel	Al	Al	۰/۵۳
۳	Al	steel	Al	۰/۵۰۴
۴	steel	steel	Al	۰/۶۱۹
۵	Al	Al	steel	۰/۳۷۸
۶	steel	Al	steel	۰/۵۵
۷	Al	steel	steel	۰/۴۸۸
۸	steel	steel	steel	۰/۶۱

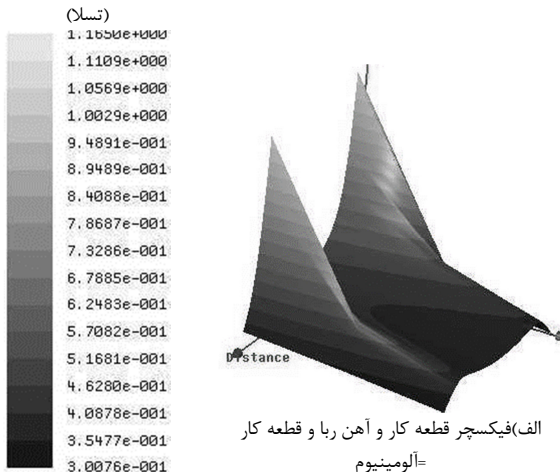
1. Full factorial  
2. Analysis of variance (ANOVA)  
3. Minitab



شکل ۱۸ شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تاثیر جنس قطعه‌کار بر چگالی شار مغناطیسی

میزان چگالی شار مغناطیسی و ایجاد مدار بسته استفاده از فیکسچر فرومغناطیسی می‌باشد. البته افزایش چگالی شار مغناطیسی در مرکز با توجه به این مطلب که سرعت برشی در مرکز (با توجه به  $V = \frac{\pi DN}{60}$ ) کمتر می‌باشد، می‌تواند باعث خراشیدگی سطح قطعه کار گردد. شیاردار کردن آهن‌ریا یا استفاده از آهن‌رباهای رنگی مواردی است که جهت جلوگیری از این پدیده انجام می‌گیرد. جهت تایید این مطلب نحوه تشکیل جاروبک ساینده در حالت‌های مختلف در شکل ۲۰ نشان داده شده است. زاویه بسته و تمرکز پودرها در قطعه‌کارهای جنس آهنی و یا با فیکسچر آهنی دیده می‌شود. در شکل ۲۰- الف قطعه‌کار آهنی و در ۲۰- ب قطعه‌کار از جنس آلومینیوم می‌باشد. نحوه تمرکز پودر بر روی سطح قطعه‌کار آهنی و پراکندگی پودر در قطعه‌کار آلومینیومی در حال حرکت دورانی مشخص است. در شکل ۲۱ نحوه تشکیل زنجیره‌های مغناطیسی دیده می‌شود. پودر استفاده شده از ذرات استیل با قطر ۱ میلی‌متر است. جهت بهتر دیده شدن تشکیل جاروبک ساینده مغناطیسی از ذرات نسبتاً بزرگ استفاده شده است. در شکل ۲۱- الف فیکسچر آهن‌ریا از جنس آلومینیوم و در ۲۱- ب از آهن می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در فیکسچر آهنی مقداری از پودر جذب لبه‌های کناری فیکسچر می‌شود که البته در مغناطیسی فرایند پرداخت کاری سایشی مواد غیر فرومغناطیس می‌تواند تا حدی باعث افزایش کارآمدی گردد ولی در پولیش کاری قطعات فرومغناطیس مناسب نمی‌باشد.

چگالی شار مغناطیسی



الف) فیکسچر قطعه کار و آهن‌ریا و قطعه کار آلومینیوم =

براساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در نهایت مدل رگرسیون برای پیش‌بینی مقدار چگالی شار مغناطیسی طبق رابطه (۶) بدست آمده است. مقدار چگالی شار مغناطیسی (B) به عنوان متغیر وابسته و جنس قطعه‌کار (W.P)، جنس فیکسچر قطعه کار (W.P fixture) و جنس فیکسچر آهن‌ریا (magnet fixture) به عنوان متغیرهای مستقل می‌باشند.

$$B(T) = 0.506 + 0.07 \times W.P + 0.04 \times W.P \text{ Fixture} - 0.011 \times w.p \times w.p \text{ fixture} \quad (6)$$

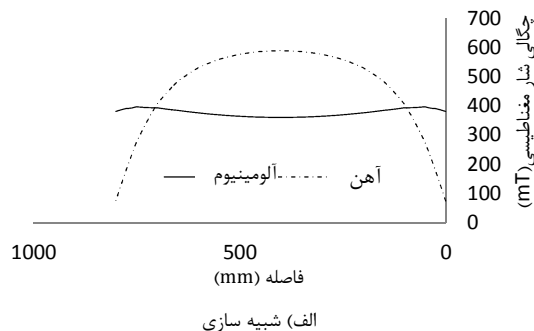
در شکل ۱۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در شرایط مختلف نشان داده شده است. در شکل ۱۷- الف فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ریا و همچنین قطعه‌کار غیر فرومغناطیسی می‌باشند. در شکل ۱۷- ب فیکسچر آهن‌ریا و فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیسی و قطعه‌کار غیر فرومغناطیسی می‌باشد.

در شکل ۱۸ نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تاثیر جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه‌کار آورده شده است. در شکل ۱۸ جنس فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ریا آلومینیومی می‌باشد. اثر تغییر جنس قطعه‌کار بررسی شده است. علت تفاوت در ایجاد حلقه بسته آهن‌ریا با قطعات فرومغناطیسی می‌باشد. به تعبیر دیگر قطعات فرومغناطیسی در مقابل آهن‌ریا مانند قطب مخالف عمل می‌کنند. همچنین جهت تفرع و تحذب منحنی در مقابل قطعات با جنس‌های مختلف نیز در شکل ۱۸ دیده می‌شود. هماهنگی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات مشخص است. در قطعات فرومغناطیس میزان چگالی شار مغناطیسی در مرکز بیشتر از اطراف آهن‌ریا می‌باشد. در حالی‌که در قطعات غیر فرومغناطیسی برعکس می‌باشد. همچنین مقادیر چگالی شار مغناطیسی در مواد فرومغناطیس بیشتر می‌باشد.

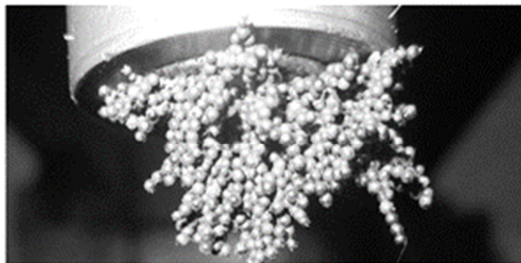
همچنین در شکل ۱۹ تصویر ۳ بعدی حاصل از شبیه‌سازی مربوط به تغییر جنس قطعه‌کار و فیکسچر قطعه‌کار آورده شده است. در شکل ۱۹- الف جنس همه قطعات غیر فرومغناطیس می‌باشد، در ۱۹- ب جنس قطعه‌کار فرومغناطیس و مابقی غیر فرومغناطیس و در ۱۹- ج جنس فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس و مابقی غیر فرومغناطیس می‌باشند. همان‌طور که مشخص است اثر فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیسی نیز مانند قطعه‌کار فرومغناطیسی می‌باشد. در هنگام پولیش کاری مواد غیر فرومغناطیس یکی از راه‌های افزایش



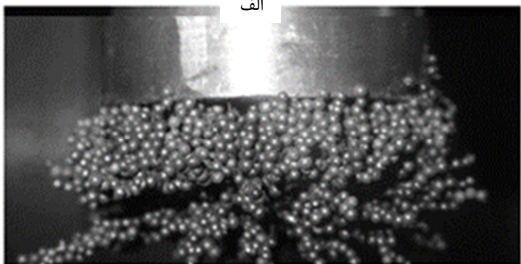
شکل ۱۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی (الف) همگی قطعات غیر فرومغناطیس (ب) فیکسچر قطعه‌کار و آهن‌ریا فرومغناطیس، قطعه‌کار غیر فرومغناطیس



طور که در قبل نیز دیده شد بدنه آهنی فیکسچر آهن‌ریا مانند مسیر برگشت خطوط میدان عمل کرده و مدار بسته آهن‌ریا با بدنه تشکیل می‌گردد. در حالی که در فیکسچر آلومینیومی چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد. در شکل ۲۲ نحوه ایجاد حلقه بسته دیده می‌شود. در شکل ۲۲- الف فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس و در شکل ۲۲- ب فیکسچر آهن‌ریا فرومغناطیس می‌باشد. سایر قطعات نیز غیر فرومغناطیس می‌باشند.

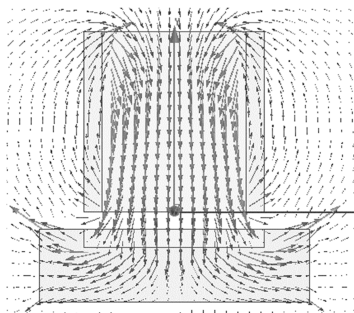


الف

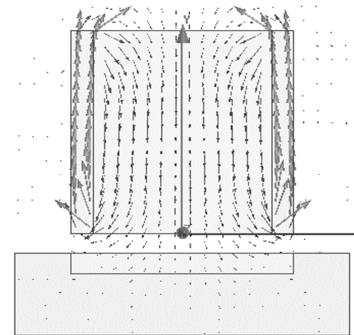


ب

شکل ۲۱ الف) فیکسچر آهن‌ریا غیر فرومغناطیس ب) فیکسچر آهن‌ریا فرومغناطیس

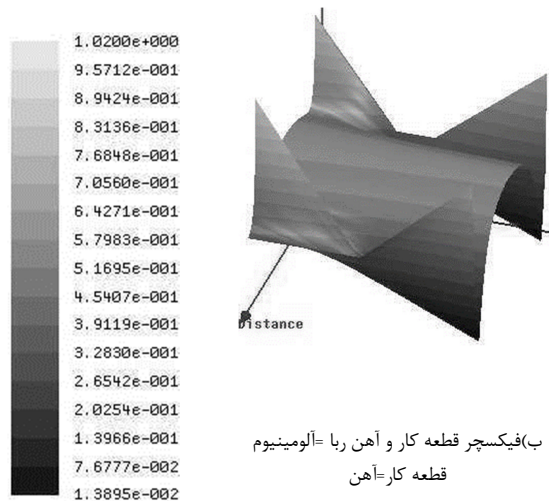


الف) فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس

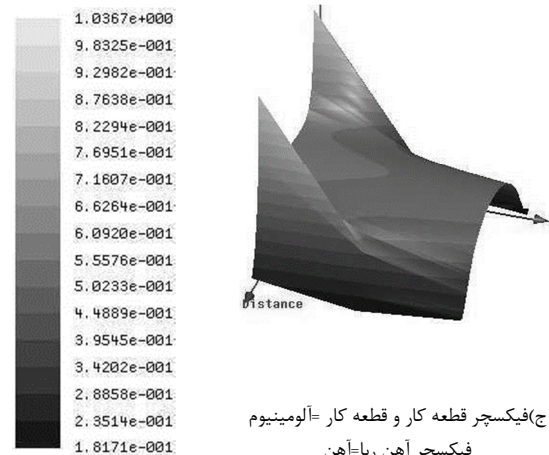


ب) فیکسچر آهن‌ریا فرومغناطیسی

شکل ۲۲ نحوه ایجاد مدار بسته الف) فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس ب) فیکسچر آهن‌ریا فرومغناطیس

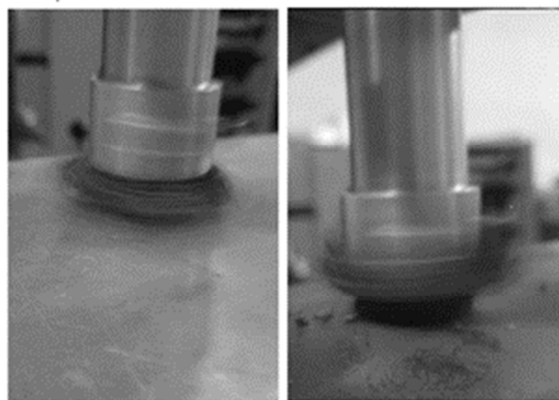


ب) فیکسچر قطعه‌کار و آهن‌ریا = آلومینیوم  
قطعه‌کار = آهن



ج) فیکسچر قطعه‌کار و قطعه‌کار = آلومینیوم  
فیکسچر آهن‌ریا = آهن

شکل ۱۹ توزیع بعدی چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ریا



ب

الف

شکل ۲۰ الف) قطعه‌کار آهنی ب) قطعه‌کار آلومینیومی

در فیکسچر آلومینیوم پودر به لبه‌های پایینی فیکسچر متصل نمی‌گردد. البته لازم به ذکر است پیرامون لبه‌های جانبی فیکسچرها این رفتار متفاوت می‌باشد. به این معنی که به بدنه فیکسچر آلومینیومی پودرها به راحتی متصل می‌گردند در حالی که در فیکسچر آهنی چنین رفتاری دیده نمی‌شود. همان-



## ۳- نتیجه‌گیری

در آهن‌ربا دائمی با قطر ثابت با افزایش ارتفاع میزان چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند.

در آهن‌ربا دائمی با ارتفاع ثابت با افزایش قطر میزان چگالی شار مغناطیسی کاهش و میزان تغییرات آن در سطح آهن‌ربا افزایش پیدا می‌کند. با قرار دادن ۲ عدد آهن‌ربا (استوانه‌ای قطر ۱۶mm و ارتفاع ۲۰mm) روی یکدیگر میزان چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۱ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا در شبیه‌سازی تا ۱۵٪ و در اندازه‌گیری تا ۱۳٪ افزایش پیدا می‌کند. با افزایش فاصله از سطح آهن‌ربا میزان چگالی شار مغناطیسی و اثر پدیده لبه کاهش پیدا می‌کنند.

میزان نیروی وارده بر ذره ساینده (با قطر ۱۰ میکرون) در آهن‌ربا استوانه‌ای و در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح آهن‌ربا  $2/3 \times 10^{-7}$  نیوتن و همچنین میزان عمق نفوذ در سطح  $4 \times 10^{-8}$  متر می‌باشد.

جنس قطعه‌کار، جنس فیکسچر قطعه‌کار و برهم کنش این دو فاکتور بر میزان چگالی شار مغناطیسی موثر می‌باشند.

جهت تمرکز پودر ساینده مغناطیسی در فرآیند پولیش‌کاری قطعات غیرفرومغناطیسی می‌توان فیکسچر این نوع قطعات را از جنس فرومغناطیسی تهیه کرد.

جنس فیکسچر آهن‌ربا تاثیر چندانی در میزان چگالی شار مغناطیسی ندارد. البته جهت افزایش کارآمدی فرآیند سایشی مغناطیسی قطعات فرومغناطیسی بهتر است از جنس غیرفرومغناطیسی استفاده شود.

## ۴- مراجع

- [1] V. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 20, pp. 6022-6038, 2009.
- [2] N. Jain, V. Jain, S. Jha, Parametric optimization of advanced fine-finishing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 11-12, pp. 1191-1213, 2007.
- [3] S. Jha, V. Jain, *Nanofinishing techniques*, in: *Micromanufacturing and nanotechnology*, Eds., pp. 171-195: Springer, 2006.
- [4] V. Ganguly, T. Schmitz, A. Graziano, H. Yamaguchi, Force Measurement and Analysis for Magnetic Field-Assisted Finishing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 135, No. 4, pp. 041016, 2013.
- [5] Y. M. Hamad, Improvement of Surface Roughness Quality for Stainless Steel 420 Plate Using Magnetic Abrasive Finishing Method, *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, Vol. 6, No. 4, pp. 10 - 20, 2010.
- [6] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Experimental investigations and modeling of finishing force and torque in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 134, No. 5, pp. 051008, 2012.
- [7] S. Jayswal, V. Jain, P. Dixit, Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 477-490, 2005.
- [8] D. K. Singh, V. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 149, No. 1, pp. 22-29, 2004.
- [9] D. K. Singh, V. Jain, V. Raghuram, Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, No. 7-8, pp. 652-662, 2006.
- [10] V. Mishra, H. Goel, R. S. Mulik, P. Pandey, Determining work-brush interface temperature in magnetic abrasive finishing process, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 2, pp. 248-256, 2014.
- [11] L.-D. Yang, C.-T. Lin, H.-M. Chow, Optimization in MAF operations using Taguchi parameter design for AISI304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 5-6, pp. 595-605, 2009.
- [12] J.-S. Kwak, H.-S. Kang, Assessment on magnetic flux density of magnetic array table in magnetic abrasive polishing process, *Proceeding of the International Multi-Conference of Engineering and Computer Scientists (IMECS)*, Hong Kong, Vol. II, 2011.
- [13] J.-S. Kwak, Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 7, pp. 613-618, 2009.