



مطالعه فرایند پرداخت کاری مغناطیسی فولاد AISI 4140

مسعود رودی^۱، حسین امیرآبادی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، hamirabadi@birjand.ac.ir

چکیده- در این پژوهش، قابلیت‌های روش پرداخت کاری مغناطیسی در فولاد AISI 4140 مطالعه شده است. زبری سطح به‌عنوان تابعی از سرعت دوران ابزار، فاصله ابزار تا قطعه کار، و نوع ماده ساینده در نظر گرفته شد. ابزار مغناطیسی ویژه‌ای برای پرداخت کاری صفحه‌های تخت فولادی توسط ماشین فرز طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها با چیدمان پیشنهادی روش طراحی آزمایش تاگوچی و با بکار بردن مواد ساینده متشکل از مخلوط پودرهای کاربید سیلیسیم یا اکسید آلومینیم با آهن کربونیل و پارافین در اندازه‌های متفاوت انجام گردید. پس از اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها، با استفاده از روش آنالیز واریانس، نحوه تأثیرگذاری پارامترهای مختلف فرایند بر کیفیت سطح نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که در پرداخت کاری صفحه‌ای فولاد مذکور، به ترتیب متغیرهای فاصله ابزار تا قطعه کار، سرعت دوران ابزار و نوع ساینده دارای بیشترین تأثیرگذاری در زبری سطح به دست آمده هستند. نهایتاً با انجام تحلیل رگرسیون، تابع مناسبی برای پیش‌بینی زبری سطح فولاد ارائه شد.

کلیدواژگان: پولیش کاری مغناطیسی، زبری سطح، طراحی ابزار، ماشین کاری.

Magnetic abrasive finishing of AISI 4140 steel

M. Roodi¹, H. Amirabadi^{2*}

1- MSc. Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

*P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran. hamirabadi@birjand.ac.ir

Abstract- In this research the Magnetic Abrasive Finishing capabilities in AISI 4140 steel polishing was studied. Surface roughness was considered as a function of the tool rotational speed, working gap, abrasive material and abrasives particle mesh size. To conduct the tests, a specific magnetic tool was designed to polish the flat steel surfaces by a milling machine. Experiments were arranged based on Taguchi method and using abrasive material consisting of Aluminum Oxide or Silicon Carbide with paraffin oil and Carbonyl Iron powders with different mesh sizes. After surface roughness measurement of samples, the effect of each parameter on the surface quality was inspected by ANOVA method. Results showed that in Magnetic Abrasive Finishing of mentioned steel, the parameters of working gap, tool rotational speed and the abrasive material type are of the most importance as ordered. Finally, a roughness predictor function was introduced by regression method.

Keywords: Magnetic Abrasive Finishing, Surface Roughness, Tool Design, Machining.

۱- مقدمه

ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که این دو مهم، مستقیماً مرتبط با نوع فرایند پولیش کاری بکار رفته در ساخت قطعه یا قالب می‌باشد، لذا بکارگیری روش‌های با دقت و کارایی بالا در این زمینه الزامی است. ساخت ویفرهای سیلیکونی، میکرو و نانو

با پیشرفت روزافزون فناوری، نیاز به معرفی روش‌های تولید با قابلیت‌های خاص بیشتر از قبل احساس می‌شود. در این میان تولید قطعاتی با کیفیت سطح بالا و تolerانس‌های بسته از اهمیت

فاصله اندکی از سطح قطعه دوران می‌کند. در نتیجه حرکت برس ساینده روی سطح، شاهد پرداخت کاری قطعه کار خواهیم بود. در این مقاله با تمرکز بر فرایند پرداخت کاری مغناطیسی فولاد AISI 4140، ضمن طراحی ابزاری برای پرداخت کاری سطوح فولادی توسط ماشین فرز، چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند بر زبری سطح نهایی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نهایتاً با تحلیل داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی به روش آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون، تابعی برای پیش‌بینی زبری سطح معرفی می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرایند MAF، تحقیقات آزمایشگاهی بسیاری انجام شده است. کومار و همکارانش [۷] به مطالعه اثر دو پارامتر اندازه گپ و نیز سرعت محیطی قطعه کار بر زبری سطح پرداختند. تأثیر زمان پرداخت کاری و اندازه دانه‌های ساینده در نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح به دست آمده برای قطعات استوانه‌ای شکل با بکار بردن ماده ساینده نوع باند نشده^۳ توسط چانگ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. موری و همکارانش [۸] در مورد انرژی تشکیل برس ساینده بحث نمودند. آنها با انتخاب قطعه کار از جنس فولاد SUS 304 به مطالعه در نحوه تشکیل برس با استفاده از پودرهای نوع باند شده^۴ از جنس اکسید آلومینیم-آهن پرداختند. سینگ و همکارانش با بکار بردن طراحی آزمایش به روش تاگوچی به بررسی پارامترهای مؤثر بر کیفیت سطح پرداختند [۹]. آزمایش‌های تجربی نشان داد که پارامترهای اندازه گپ و ولتاژ اعمالی به آهن‌ربای الکتریکی مؤثرترین پارامترها بوده و اندازه دانه و سرعت دورانی به ترتیب در جایگاه پایین‌تری قرار دارند. جین یک بررسی چند جانبه بر روی روش‌های مختلف پرداخت کاری در ابعاد میکرو-نانو که در آنها از جریان ذرات ساینده استفاده می‌شود، انجام داد. ایشان نتیجه گرفت که ایجاد حفره در آهن‌ربا می‌تواند نرخ براده‌برداری بالاتری در MAF نتیجه دهد [۶]. کواک سعی داشت شار مغناطیسی مورد استفاده در پرداخت کاری مواد غیرمغناطیسی را افزایش دهد و به‌طور خاص بر پرداخت کاری منگنز تمرکز نمود [۱۰]. توزیع میدان برای مواد فرومغناطیس و غیرمغناطیس

ماشین‌ها، تلسکوپ‌های فضایی نوین و لنزهای چشمی بخشی از نیازهایی هستند که فرایندهای سنتی قادر به تولید آنها نیستند. در حال حاضر، روش‌های مرسوم پولیش کاری به استفاده از ابزارهای الاستیک، کاغذهای سنباده، خمیرهای ساینده، نمدهای دوار و موارد مشابه محدود است. نرخ براده‌برداری مطابق معادله پرستون وابسته به دو فاکتور سرعت نسبی بین ابزار و قطعه کار و فشار تماسی بین آنها است [۱]. از آنجا که اعمال فشار توسط دست غیریکنواخت است و حتی در پرداخت کاری سنتی به کمک ماشین‌های کنترل عددی نیز مشکل تغییر ابعاد هندسی ابزار حین فرایند بروز می‌کند، کنترل دقیق نرخ براده‌برداری در فرایندهای پرداخت کاری سنتی ناممکن خواهد بود [۲].

MAF^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های نوین پرداخت کاری سطوح در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در پرداخت کاری مغناطیسی به کمک ذرات ساینده از پودرهای ساینده‌ای استفاده می‌شود که در میدان مغناطیسی به شکل برس در می‌آیند و با حرکت دورانی نسبی بین ابزار و قطعه کار عمل بار برداری انجام می‌شود. با استفاده از این فرایند می‌توان سطوح تخت، جداره‌های داخلی و سطح بیرونی سیلندرها را در مواد مغناطیسی و غیر مغناطیسی پرداخت کاری نمود [۳]. اخیراً پژوهش‌هایی برای توسعه کاربردهای آن در پرداخت کاری سطوح سه بعدی صورت گرفته است [۴]. از کاربردهای صنعتی آن می‌توان به فرایند پرداخت کاری عدسی‌ها اشاره کرد. ماشین کیو ای دی^۲ نمونه بارزی از توسعه این فناوری در دو دهه اخیر بوده است [۵].

در MAF ذرات ساینده به طور خودکار در حین فرایند تیز می‌شوند و برس ساینده بر مبنای سطح زیرینش شکل می‌گیرد. برخلاف روش‌های سنتی نیازی به اصلاح شکل ابزار نیست و نیروهای ماشین کاری توسط میدان مغناطیسی قابل تنظیم هستند. از آنجا که اندازه نیروها کوچک است، احتمال بروز ترک‌های میکروسکوپی به‌ویژه در مواد ترد پایین است [۶]. در پرداخت کاری به روش مغناطیسی، ماده‌ی ساینده فرومغناطیس با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی ما بین یک آهن‌ربا و قطعه کار، در راستای خطوط میدان شکل گرفته و فشار تماسی مورد نیاز را تأمین می‌کند. ابزار آهن‌ربایی نیز با

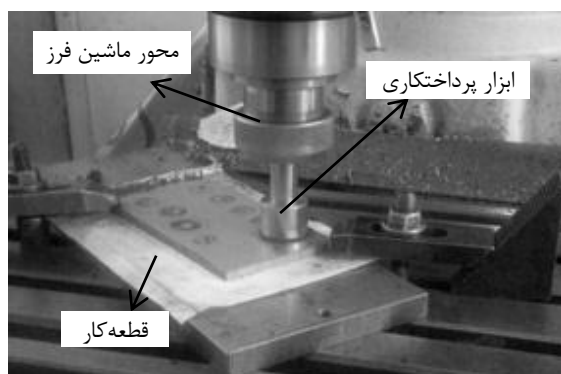
3. Unbonded Abrasive
4. Bonded Abrasive

1. MAF = Magnetic Abrasive Finishing
2. QED

شده است. برای انجام آزمایش‌ها از یک ماشین فرز سه محور مدل FP3A ساخت شرکت دکل استفاده شد. در ادامه، روند فراهم آوردن مقدمات انجام آزمایش و تجهیزات مربوطه آورده شده است.

۳-۱- ابزار

تحقیقات کواک [۱۰] نشان داده که توزیع شار مغناطیسی برای یک آهنربای استوانه‌ای توخالی در مقابل قطعه‌کار فرومغناطیس، به صورت شکل ۲ است. یعنی محدوده حداکثر شار به اندازه نصف شعاع از مرکز آهنربا فاصله دارد و شدت میدان در مرکز ابزار ناچیز است. از طرفی با توجه به این که سرعت نسبی بین ابزار و قطعه‌کار در نواحی با شعاع کوچک‌تر کمتر است، پس طبق معادله پرستون در این نواحی نرخ براده‌برداری از سطح نیز کمتر از قسمت‌های با شعاع بیشتر است [۱۳]. شکل ۳ نیز نحوه توزیع میدان در سطح آهنربا را مطابق یافته‌های جیسوال نشان می‌دهد. در نواحی زیر شیارها فشار پرداخت کاری مقداری منفی خواهد داشت. نواحی با فشار منفی می‌توانند به عنوان ذخیره کننده پودرهای ساینده عمل نموده و همچنین با کاهش یافتن سطح آهنربا، چگالی خطوط در نواحی غیر شیاردار افزایش می‌یابد [۱۴]. با در نظر گرفتن موارد فوق، ابزار مورد استفاده در این آزمایش مطابق شکل ۴ طراحی و ساخته شد. از آهنربای دائمی نئودیموم-آهن-بور استوانه‌ای با شدت میدان ۱/۳ تسلا به عنوان تأمین کننده میدان مغناطیسی استفاده شد. یک غلاف مسی آهنربا را در بر گرفته و مرکز آهنربا نیز تو خالی است.



شکل ۱ نمایش ابزار در حال پرداخت کاری سطح قطعه‌کار

شبیه‌سازی شد. برای به دست آوردن مؤثرترین پارامتر در فرایند و نیز درک حالت بهینه پارامترها از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. از روی آزمایش‌های تجربی به دست آمده و نیز نتایج شبیه‌سازی‌ها، معلوم شد که ناحیه با حداکثر شار مغناطیسی، به اندازه نصف شعاع آهنربا از مرکز ابزار فاصله دارد. یانگ و همکارانش با استفاده از روش المان محدود به بررسی خواص سطح حاصل از بکاربردن سه نوع آهنربای استوانه‌ای با شکل‌های استوانه توپر، استوانه با سوراخ مرکزی، استوانه با سوراخ مرکزی به همراه شیاری در سطح آن پرداختند. مطالعه آنها نشان داد که ایجاد یک سوراخ در مرکز استوانه به همراه شکاف‌هایی در سطح آهنربا می‌تواند موجب بهبود کیفیت سطح در MAF شود. این شکاف‌ها در سطح آهنربا چگالی شار مغناطیسی را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد. (در واقع چون $B = \Phi/A$ ، با کاهش سطح از طریق ایجاد شکاف، میدان قوی‌تری خواهیم داشت). همچنین آنها ادعا کرده‌اند که ایجاد شکاف موجب کاهش سایش سطح آهنربا و افزایش طول عمر آن می‌شود [۱۱].

چنان که از مطالعات انجام شده بر می‌آید، اطلاعات چندانی از نتایج انجام روش MAF بر قطعات از جنس فرومغناطیس در دست نیست. بیشتر فعالیت‌های انجام شده بر مواد غیر مغناطیس تمرکز داشته‌اند. از آنجا که پارامتر شدت میدان مغناطیسی تأثیر بسیار مهمی بر نرخ براده‌برداری دارد و از پارامترهایی اساسی در MAF محسوب می‌شود، هر اندازه این میدان قوی‌تر باشد مطلوب‌تر است. این میدان می‌تواند هم توسط آهنربای دائمی و هم الکتریکی تأمین شود. اگر چه در بیشتر تحقیقات انجام شده از آهنرباهای الکتریکی استفاده شده است، اما به عنوان مثال برای تأمین میدانی در حدود ۱/۳ تسلا به حجم بسیار بالایی از سیم پیچ، مدارات کنترلی و سیستم خنک کننده احتیاج است. از آنجا که آهنرباهای دائمی نئودیموم با ابعاد کوچک قادر به تأمین میدان مورد نیاز فرایند مذکور هستند [۱۲]، در این پژوهش از این نوع آهنرباها استفاده شد و از داده‌های به دست آمده در تحقیقات قبل برای انتخاب شکل بهینه آهنربا استفاده شده است.

۳- کار آزمایشگاهی

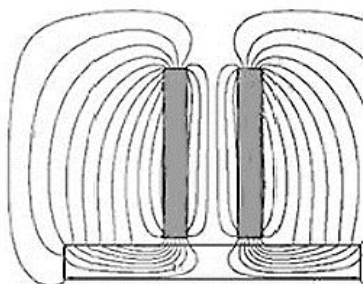
ابزار و قطعه کار در حین پرداخت کاری در شکل ۱ نشان داده

شکل ۵ نحوه توزیع خطوط میدان را در اطراف یک آهنربای استوانه‌ای تو خالی در مجاورت قطعه کار فرومغناطیس مطابق تحقیقات یانگ [۱۱] نشان می‌دهد. چنان که در شکل مشخص است، مدار مغناطیسی در مسیر برگشت خطوط میدان از قطعه کار مناسب نیست. به منظور بسته شدن بهتر مدار مغناطیسی در ابزار، از یک پوسته آهنی استفاده شده است. بدون غلاف مسی، شکل قسمت بیرونی برس ساینده اندک‌متمایل به خارج از مرکز آهنربا خواهد بود. علت بروز این پدیده، انحراف خطوط میدان به سمت پوسته آهنی است، چراکه ضریب نفوذ مغناطیسی آهن بسیار بالاتر از هواست. به عبارت دیگر، استفاده از غلاف مسی موجب تمرکز بهتر میدان در نوک ابزار می‌شود.

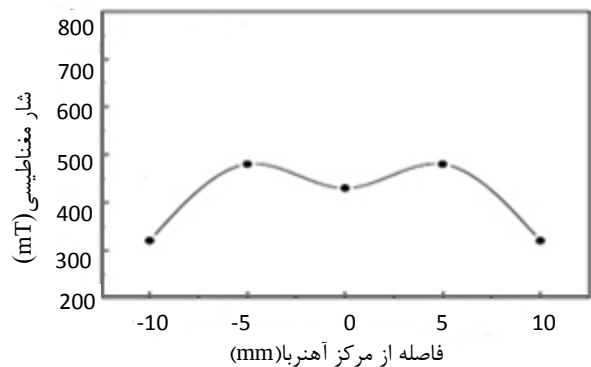
در واقع خطوط میدان با خروج از نوک آهنربا، به درون پوسته آهنی متمایل شده و در انتها از کف قطعه نگه‌دارنده مجدداً به داخل آهنربا بازگشت می‌کنند. این چیدمان موجب بهبود شدت میدان در ابزار خواهد شد.

۳-۲- ماده ساینده

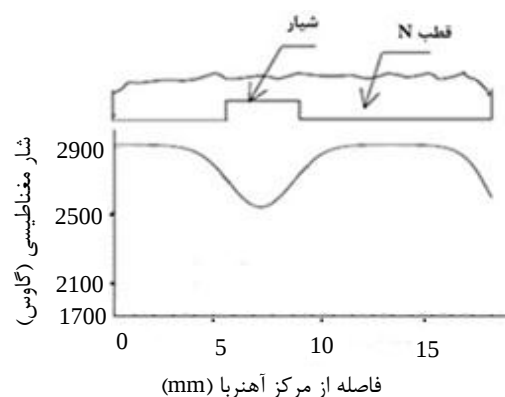
با توجه به در دسترس بودن و نیز قیمت تمام شده کمتر، در این پژوهش از پودرهای مغناطیسی نوع باند نشده استفاده شده است. اکسید آلومینیم و کاربید سیلیسیم به عنوان پودرهای ساینده انتخاب شدند. مخلوط هریک از این پودرها به همراه ذرات آهن کربونیل فرومغناطیس و نیز روغن پارافین در نقش روان‌کار، ماده ساینده مورد استفاده فرایند پرداخت کاری مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. نسبت ترکیب حجمی بکار رفته عبارت از ۶۰٪ پارافین، ۲۰٪ پودر آهن و ۲۰٪ پودر ساینده می‌باشد. این مخلوط به طور پیوسته هم زده شده تا ترکیب یکنواختی حاصل شود.



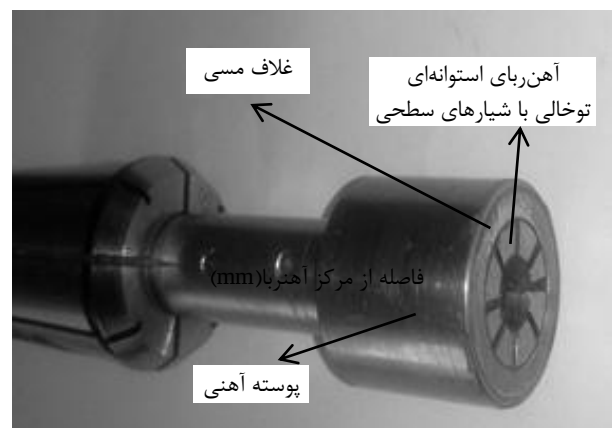
شکل ۵ نمایش خطوط میدان مغناطیسی اطراف آهنربای استوانه‌ای در مجاورت قطعه کار فرومغناطیس [۱۱]



شکل ۲ نحوه توزیع شار در آهنربای استوانه‌ای توخالی [۱]



شکل ۳ نحوه توزیع شار مغناطیسی زیر ابزار شیار دار [۱۲]



شکل ۴ ابزار مغناطیسی نصب شده بر روی ابزارگیر ماشین فرز

مجموعه آهنربا و غلاف مسی خود توسط یک پوسته ثانویه از جنس آهن در بر گرفته شده‌اند و مجموعه به محوری با قطر ۱۶ میلی‌متر منتهی شده که درون ابزارگیر ماشین فرز جای می‌گیرد. وظیفه غلاف مسی اطراف آهنربا، دفع خطوط میدان مغناطیسی به سمت مرکز آهنربا است.

بین نتایج و مقدار مورد نظر استفاده می شود. از آنجا که شاخص بهبود کیفیت در این پژوهش، اختلاف زبری سطح پرداخت کاری شده با حالت اولیه می باشد، لذا از معیار "مقدار بزرگتر بهترین است" مطابق رابطه (۱) برای محاسبه تابع زیان L_i استفاده می شود.

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \left(\frac{1}{y_i}\right)^2 \quad (1)$$

در این رابطه، n تعداد تکرارها و y_i خروجی های اندازه گیری شده هستند. پس از محاسبه مقدار تابع زیان برای هر خروجی، از رابطه (۲) مقدار سیگنال به نویز کلرا محاسبه می شود:

$$SN = -10 \log(L_i) \quad (2)$$

هرچه عدد حاصل از تحلیل سیگنال به نویز برای یک سطح از پارامتر مورد نظر بالاتر باشد، نشان دهنده بزرگتر بودن تأثیر تغییرات آن پارامتر بر نتیجه ی اندازه گیری شده می باشد [۱۵]. مطالعه اثر پارامترها بر روی زبری سطح قطعه کار در نرم افزار مینی تب^۲ توسط بخش آنالیز واریانس تاگوچی انجام گرفت. خروجی آنالیز واریانس در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول هرچه مقدار عدد آزمون F برای یک پارامتر بیشتر باشد اثر آن پارامتر بر روی زبری سطح بیشتر است. نتایج نشان می دهد که فاصله ابزار تا قطعه کار بیشترین تأثیر را بر زبری سطح نهایی دارد و پس از آن به ترتیب، سرعت دوران ابزار و نهایتاً نوع ساینده در جایگاه بعدی قرار دارند. مقدار R^{-3} $Sq(adj)$ برای این آنالیز واریانس ۹۶/۷ به دست آمد که نشان دهنده قابلیت اطمینان مطلوبی می باشد.

۵-۱- اثر نوع ساینده بر زبری سطح

مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل سیگنال به نویز در شکل ۶، سطوح اول تا سوم معرف تأثیر استفاده از پودر کاربید سیلسیم بر زبری و سطوح ۴ تا ۶ نیز نشان دهنده اثر استفاده از اکسید آلومینیم است. با مقایسه مقادیر سطوح ۱ با ۴ و به همین ترتیب سطوح ۲ با ۵ و نیز ۳ با ۶ می توان دریافت که صرف نظر از اندازه ذرات، استفاده از پودر کاربید سیلسیم نسبت به اکسید آلومینیم در حالت کلی زبری سطح پایین تری نتیجه خواهد داد.

در مجموع، برای در نظر گرفتن اثر پارامترهای جنس ساینده و نیز اندازه ذرات آن در آزمایش ها، هر یک از پودرهای اکسید آلومینیم و کاربید سیلسیم در سه اندازه مش (معرف حالت های زبر، متوسط و نرم) تهیه شدند. در جدول ۲ ترکیب مواد ساینده مشخص شده است. در تمامی نمونه ها، پودر ساینده و پودر آهن کربونیل با مش یکسان مخلوط شدند تا اثر اختلاف اندازه ذرات آنها در نتیجه آزمایش وارد نشود.

۳-۳- قطعه کار

در این تحقیق از یک صفحه فولادی AISI 4140 به ابعاد $10 \times 120 \times 200$ میلی متر به عنوان قطعه کار استفاده شد که مشخصات ترکیب آن در جدول ۱ آمده است. قطعه کار ابتدا توسط ماشین فرز گونیا شده و سپس به طور دقیق سنگ خورده است.

۴- چیدمان آزمایش

تمامی پارامترهای مورد آزمایش به همراه سطوح انتخابی آنها در جدول ۲ آورده شده است. برای در نظر گرفتن اثر سطوح پارامترهای این جدول بر زبری سطح نهایی، می بایست تعداد ۵۴ آزمایش انجام شود. از آنجا که بررسی کلیه حالت های ممکن با توجه به محدودیت های مالی و زمانی امکان پذیر نیست، لذا در این پژوهش از روش طراحی آزمایش تاگوچی به منظور کاهش تعداد آزمایش ها استفاده می شود. با استفاده از آرایه متعامد L_{18} ، چیدمان آزمایش ها مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شد و پس از اندازه گیری زبری سطح نمونه ها، اعداد مربوط به تغییر مقدار زبری سطح هر نمونه در جدول مذکور ثبت شد.

جدول ۱ نمایش درصد ترکیب عناصر فولاد AISI 4140

عنصر	کربن	سیلسیم	منگنز	کروم	مولیبدن
درصد وزنی	۰/۴	۰/۲۵	۰/۸۵	۱	۰/۲۵

۵- نتایج آزمایش و بحث

در تحلیل تاگوچی از تابع زیان^۱ برای محاسبه تغییرات موجود

2. Minitab
3. Adjusted R-square

1. Loss Function

جدول ۲ پارامترهای آزمایش و سطوح انتخابی آنها

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۶
نوع ساینده (A)	SiC+Fe ۸۰#	SiC+Fe ۱۵۰#	SiC+Fe ۳۲۵#	Al ₂ O ₃ +Fe ۸۰#	Al ₂ O ₃ +Fe ۱۵۰#	Al ₂ O ₃ +Fe ۳۲۵#
سرعت دوران ابزار (B) (rpm)	۵۰۰	۱۵۰۰	۲۵۰۰	-	-	-
فاصله ابزار تا قطعه کار (C) (mm)	۱	۱/۵	۲	-	-	-

سطح مربوط به مش‌های ۸۰ و ۱۵۰، به‌طور قابل توجهی نسبت به اختلاف بین سطوح با مش‌های ۱۵۰ و ۳۲۵ بیشتر است. البته، مطابق تحقیقات جین چون تغییرات اندازه مش ذرات فرومغناطیس خود می‌تواند موجب تغییر در رفتار مغناطیسی ماده ساینده و نیز زبری سطح نهایی شود، پس نمی‌توان به‌طور مطلق در مورد تأثیر تغییرات اندازه ذرات ماده ساینده بدون در نظر گرفتن اندازه ذرات پودر آهن در زبری نهایی قطعه کار نظر داد [۳]. بررسی این اثرات نیازمند انجام تحقیقات مفصل‌تری است.

۵-۲- اثر سرعت دوران بر زبری سطح

چنان که از شکل ۷ بر می‌آید، با افزایش سرعت دورانی ابزار، کیفیت سطح نهایی به دست آمده بالاتر خواهد بود. تحقیقات انجام شده نیز نتیجه مشابهی را در پرداخت کاری فولاد زنگ‌نزن غیر مغناطیسی نشان داده است [۷]. نکته حایز اهمیت در این شکل، کاهش چشم‌گیر شیب منحنی بین سرعت‌های ۲۵۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه نسبت به شیب در حد فاصل ۱۵۰۰ و ۵۰۰ دور است. به آن معنی که، اگرچه افزایش سرعت دورانی موجب بهبود کیفیت سطح نهایی می‌شود، اما نرخ تغییرات زبری در سرعت‌های بالا ناچیز خواهد بود. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در سرعت‌های دورانی بالا، به‌علت افزایش نیروی گریز از مرکز وارده بر ماده ساینده، ذرات از فضای ماشین‌کاری به بیرون پرتاب شده و چگالی آنها در این ناحیه کاهش می‌یابد. بنابراین اثر منفی کاهش ذرات ساینده تا حدودی اثر مثبت افزایش سرعت دورانی را تعدیل می‌کند. چنان که واضح است این اثر در ناحیه بین ۱۵۰۰ و ۵۰۰ دور کمتر است.

۵-۳- اثر فاصله ابزار تا قطعه کار بر زبری سطح

تأثیر تغییرات پارامتر فاصله ابزار تا سطح قطعه کار در شکل ۸ آورده شده است. چنان که در تصویر نیز مشخص است، این افزایش فاصله، تأثیر چشم‌گیری بر زبری سطح قطعه کار دارد.

جدول ۳ چیدمان آزمایش به‌روش تاگوچی (زمان آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه و ثابت در نظر گرفته شد)

شماره	فاصله ابزار تا	سرعت دوران	نوع ماده	تغییر در زبری سطح
آزمایش	قطعه کار (mm)	ابزار (RPM)	ساینده	میانگین قطعه کار (nm)
۱	۱	۵۰۰	۱	۲۳۷
۲	۱/۵	۱۵۰۰	۱	۲۱۸
۳	۲	۲۵۰۰	۱	۹۸
۴	۱	۵۰۰	۲	۲۷۱
۵	۱/۵	۱۵۰۰	۲	۲۵۴
۶	۲	۲۵۰۰	۲	۱۷۶
۷	۱/۵	۵۰۰	۳	۲۱۲
۸	۲	۱۵۰۰	۳	۱۴۶
۹	۱	۲۵۰۰	۳	۴۳۷
۱۰	۲	۵۰۰	۴	۲۲
۱۱	۱	۱۵۰۰	۴	۳۳۹
۱۲	۱/۵	۲۵۰۰	۴	۲۲۳
۱۳	۱/۵	۵۰۰	۵	۱۷۲
۱۴	۲	۱۵۰۰	۵	۱۱۰
۱۵	۱	۲۵۰۰	۵	۴۱۹
۱۶	۲	۵۰۰	۶	۶۰
۱۷	۱	۱۵۰۰	۶	۴۰۹
۱۸	۱/۵	۲۵۰۰	۶	۳۶۸

جدول ۴ داده‌های خروجی آنالیز واریانس

پارامترها	درجه آزادی	Adj ¹ MS	Adj ² SS	فاکتور F	فاکتور P
نوع ساینده	۵	۲۰۹۰۷	۴۱۸۱/۴	۸/۱۹	۰/۰۰۵
سرعت دوران	۲	۴۸۳۳۵	۲۴۱۶۷/۷	۴۷/۳۴	۰/۰۰۰
فاصله	۲	۱۸۸۳۰۳	۹۴۱۵۱/۴	۱۸۴/۴۱	۰/۰۰۰
خطای ماند	۸	۴۰۸۴	۵۱۰/۶	-	-
مجموع	۱۷	-	-	-	-

در مورد یک نوع پودر ساینده نیز با افزایش اندازه دانه‌ها، شاهد بهبود کیفیت سطح خواهیم بود چنان که اثر این تغییر، بین دو

1. Adjusted Mean of Squares
2. Adjusted Sum of Squares

بازگشت و بسته شدن مدار مغناطیسی انتخاب می‌کنند. این خود موجب افت چگالی شار مغناطیسی و به تبع آن، کاهش فشار مغناطیسی در ناحیه ماشین کاری می‌شود. تأثیر این پدیده را می‌توان در تغییر جهت‌گیری رشته‌های برس ساینده نسبت به سطح ابزار از حالت افقی به حالت عمود در حین کاهش گپ ماشین کاری مشاهده کرد.

۴-۵- پیش‌بینی چیدمان بهینه به روش تاگوچی

پس اجرای فرمان آنالیز تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب، چیدمان بهینه تاگوچی برای رسیدن به حداقل زبری به صورت $(A_3B_3C_1)$ معرفی شد که این چیدمان خود در مجموعه ۱۸ آزمایش آرایه متعامد جدول طراحی آزمایش نیز قرار دارد. نتایج این تحلیل به همراه داده‌های حاصل از آزمایش تجربی در جدول ۵ آورده شده است. چنان که این تحلیل نشان می‌دهد، مقدار پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی و داده‌های تجربی با تقریب مناسبی به یکدیگر نزدیک هستند.

۵-۵- پیش‌بینی زبری سطح به روش رگرسیون

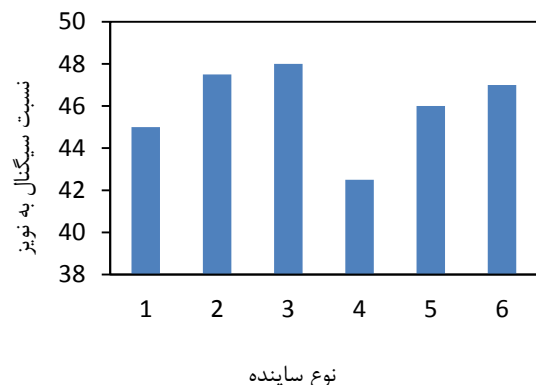
مدل رگرسیون برای پیش‌بینی مقدار یک متغیر بر مبنای متغیرهای دیگر به کار می‌رود و یکی از متداول‌ترین کاربردهای آن در تحلیل داده‌های آماری است. رگرسیون شامل تدوین و تحلیل یک معادله ریاضی است که در آن بین یک متغیر موسوم به متغیر وابسته که باید پیش‌بینی شود و متغیر یا متغیرهای مستقلی که طبق اصول نظری به متغیر وابسته مربوط هستند، تعیین می‌شود. در این تحقیق از مدل خطی استفاده شده و شکل کلی معادله رگرسیون در رابطه (۳) نشان داده شده است. در مدل رگرسیون چند متغیره فرض بر آن است که تعداد k متغیر مستقل با ظرفیت‌های بالقوه برای ارتباط با یک متغیر وابسته به صورت زیر وجود دارد.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

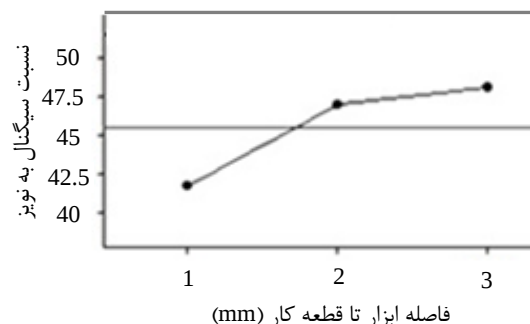
در این رابطه y متغیر وابسته و x_k و x_2 و x_1 متغیرهای مستقل، β_k و $\dots$ و β_1 و β_0 ضرایب آنها و ε متغیر خطا است.

جدول ۵ زبری پیش‌بینی شده با روش تاگوچی و مقدار تجربی

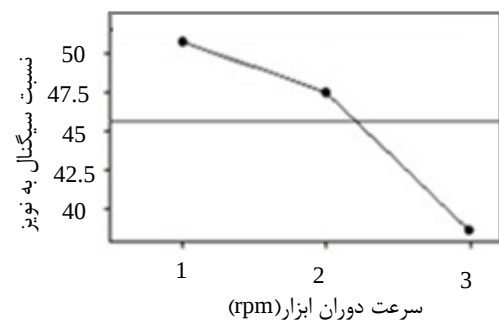
زبری (R_a) نسبت نویز/ سیگنال		
نتیجه پیش‌بینی زبری به روش تاگوچی	۴۴۱	۵۵/۲۱۵
نتیجه آزمایش تجربی	۴۳۷	-



شکل ۶ نمودار سیگنال به نویز برای نوع ساینده



شکل ۷ نمودار سیگنال به نویز برای فاصله ابزار تا قطعه کار



شکل ۸ نمودار سیگنال به نویز برای سرعت دوران ابزار

به این صورت که با افزایش آن، تغییرات زبری سطح کاهش می‌یابد. البته این اثر کاهشی، از سطح ۱/۵ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر افت بیشتری نسبت به حد فاصل دو سطح اول دارد. برای توجیه این اختلاف شیب می‌توان گفت، با افزایش فاصله ابزار از سطح، خطوط میدان خارج شده از سطح آهن‌ربا انحراف بیشتری خواهند داشت و به علت بالاتر بودن ضریب نفوذ مغناطیسی غلاف آهنی نسبت به هوا، تعداد بیشتری از خطوط میدان به جای نفوذ در ماده فرومغناطیس، مسیر غلاف را برای

از شکل واضح است که مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها هم‌پوشانی مناسبی با داده‌های حاصل از مدل رگرسیون دارد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان گفت:
- استفاده از ابزار پیشنهاد شده در این پژوهش برای پرداخت کاری فولاد AISI 4140 می‌تواند زبری سطح را بطور قابل توجهی بهبود بخشد.

- پارامترهای فاصله ابزار تا قطعه کار، سرعت دوران ابزار و نوع ماده ساینده به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر زبری سطح حاصل از فرایند MAF روی فولاد مذکور هستند.

- در پرداخت کاری مغناطیسی فولاد AISI 4140، استفاده از پودر کاربیدسیلیم نتیجه بهتری نسبت به پودر اکسید آلومینیم (با اندازه ذرات یکسان) به دست می‌دهد.

- صرف‌نظر از جنس ماده ساینده، هرچه اندازه ذرات پودر ساینده کوچکتر باشد، زبری سطح نهایی کمتر خواهد بود.

- افزایش فاصله ابزار تا قطعه کار زبری سطح نهایی را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

- به طور کلی، هر چند افزایش سرعت دوران ابزار موجب بهبود زبری سطح نهایی می‌شود، اما میزان تغییرات زبری در سرعت‌های بالاتر کمتر خواهد بود.

- با استفاده از تابع به دست آمده از روش تحلیل رگرسیون می‌توان زبری سطح حاصل از پرداخت کاری به روش MAF را با دقت مطلوبی پیش‌بینی کرد.

۷- مراجع

- [1] Kalpakjian S., Schmid S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, 2001, pp. 541-585.
- [2] Amirabadi H., Shakeri M., Horichi O., Imen J., "Mist-Abrasion Machining of Brittle Material and Its Application in Corrective Figuring of Optical Parts", *J. Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, No. 6, 2008.
- [3] Jain N. K., Jain V. K., Jha S., "Parametric optimization of advanced fine-finishing processes", *Int. J. Advance Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 11, 2007, pp. 1191-1213.
- [4] JiS. M., XuY. M., Chen G. D., "Comparative Study of Magnetic Abrasive Finishing in Free-Form Surface Based on Different Polishing Head",

زبری سطح میانگین (R_a) به‌عنوان متغیر وابسته و متغیرهای فرایند پرداخت کاری مغناطیسی شامل نوع ماده ساینده (A)، سرعت دوران ابزار (B) و فاصله ابزار تا قطعه کار (C) به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته (جدول ۳) در نهایت مدل رگرسیون با استفاده از توانایی‌های نرم‌افزار مینی‌تپ برای پیش‌بینی زبری سطح قطعه کار به شکل معادله (۴) به دست آمد.

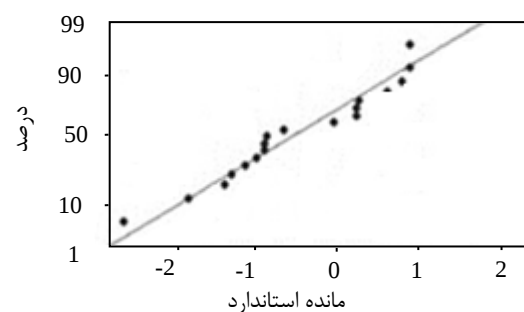
$$R_a = 317 + 11.5A + 62.3B - 125C \quad (4)$$

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون انجام شده در جدول ۶ ارائه شده است. ضرایب معادله (۴) در ستون ضرایب جدول آمده است. مقدار آزمون P به نسبت موفقیت مدل رگرسیون در جامعه آماری اشاره می‌کند. $R-Sq(adj)$ برای این جدول ۹۰/۴ درصد به دست آمد. تست نرمالیت نیز توزیع نرمال مقادیر مانده در مدل رگرسیون را نشان داد.

شکل ۹ نشان دهنده پراکندگی مقادیر مانده حاصل از مدل رگرسیون در برابر مقادیر به دست آمده از آزمایش است.

جدول ۶ پارامترهای خروجی رگرسیون برای متغیرهای مستقل

پیش‌بینی کننده	ضرایب	SE ^۱	T ^۲	P ^۳	VIF ^۴
ثابت	۳۱۶/۹۲	۳۷/۵۶	۱۱/۱۲	۰/۰۰۰	-
فاصله ابزار قطعه کار	-۱۲۵	۱۱/۰۹	۲/۱۷	۰/۰۴۸	۱/۰۰۰
سرعت دوران ابزار	۶۲/۲۵	۱۱/۰۹	۵/۶۱	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰
نوع ساینده	۱۱/۵۱۴	۲۲/۱۸	۵/۳۰۳	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰



شکل ۹ توزیع داده‌های مدل رگرسیون و داده‌های آزمایش

1. Standard Error
2. T Value
3. P Value
4. Variance Inflation Factor

- [10] Kwak J., "Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet", *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No. 7-8, 2009, pp. 613-618.
- [11] Yang L. D., Lin C. T., Chow H. M., "Optimization in MAF operations using Taguchi parameter design for AISI304 stainless steel", *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 5, 2009, pp. 595-605.
- [12] Vahdati, M., Sepehrafghan, A., "finishing process with abrasive particles in a magnetic field, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, No. 31, 2008, pp. 55-67. (In Persian)
- [13] Marinescu I. D., Uhlmann E., Doi T. K., *Hand Book of Lapping and Polishing*, Taylor and Francis, London, 2007.
- [14] Jayswal S. C., Jain V. K., Dixit P. M., "Analysis of magnetic abrasive finishing with slotted magnetic pole", *AIP Conference Proceeding 712*, Columbus, Ohio(USA), 2004, 1435-1440.
- [15] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y., *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley, New York, 2004.
- [5] <http://www.qedmrf.com/polishing/mrf-technology>, 2012.
- [6] Jain V. K., "Magnetic field assisted abrasive based micro-nanofinishing", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 6, 2009, pp. 622-638.
- [7] Jain V. K., Kumar P., Behera P.K., Jayswal S. C., "Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process", *Wear*, Vol. 250, No. 1, 2001, pp. 384-390.
- [8] Mori T., Hirota K., Kawashima Y., "Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, No. 4, 2003, pp. 682-686.
- [9] Singh D. K., Jain V.K., Raghuram V., "Parametric study of magnetic abrasive finishing process", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 3, 2004, pp. 22-29.