



## بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی با استفاده از روش رویه پاسخ

یحیی چوپانی، محسن خواجه‌زاده\*، محمدرضا رازفر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸

### کلمات کلیدی:

پرداخت کاری ساینده مغناطیسی  
بهینه‌سازی  
روش رویه پاسخ  
فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰ سی  
زبری سطح

**خلاصه:** فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی با توجه به ماهیت آن یک فرآیند سرد محسوب می‌شود. بنابراین، این فرآیند آسیب‌های سطحی همچون میکرو ترک‌ها، تغییر فاز، سوختگی و غیره را بر روی سطح قطعات ماشین‌کاری شده ایجاد نخواهد کرد. در این مقاله، اثر پارامترهای گپ‌کاری، سرعت دورانی قطعه‌کار و نوع ساینده در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر زبری سطح بیرونی قطعات استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن ۴۴۰C با استفاده از روش رویه پاسخ برای رسیدن به کمترین زبری سطح، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده است. با اجرای آزمایش‌ها، میزان زبری سطح نمونه‌ها به عنوان تابع هدف اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از روش رویه پاسخ، مقادیر بهینه پارامترهای گپ‌کاری و سرعت دورانی قطعه‌کار به دست آمده است. نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ نشان می‌دهد که فرآیند با دقت خوبی مدل‌سازی شده است و همچنین استفاده از مدل توسعه‌یافته میزان بهبود در زبری سطح پرداخت‌شده را به میزان ۵۲/۱۷ درصد افزایش داده است. علاوه بر این، نتایج میکروسکوپی بافت سطح نمونه‌ها، نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی جهت و شیارهای ناشی از فرآیند سنگ‌زنی را به‌طور قابل‌توجهی از بین برده است و همچنین یک سطح پرداخت فوق‌صیقل و یکنواختی به مانند یک آینه تا محدوده ۰/۲۰۷ میکرومتر به دست آمده است.

### ۱- مقدمه

در ادامه، تحقیقات اخیر که در این زمینه انتشار یافته است، بیان می‌شود.

آبراهام [۲] در سال ۱۹۲۹ میلادی، برای اولین بار فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را معرفی کرد و با استفاده از این فرآیند سطوح داخلی قالب‌های کشش سیم را پرداخت کرد. پس از آن، در سال ۱۹۴۰ میلادی، کوآتس [۳] با استفاده از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، سطوح داخلی پوسته‌های بشکه‌ای را پرداخت کرد. بعد از آن، محققین ژاپنی در سال ۱۹۸۰ میلادی، فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را به‌عنوان یک فرآیند پرداخت نهایی مورد استفاده قرار دادند [۴]. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه بهبود عملکرد، کاربرد و مزایای فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی صورت گرفته است [۱۷-۱۵].

سینک و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ میلادی، با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را بر روی درصد تغییرات زبری

بسیاری از فرآیندهای تولید نظیر سنگ‌زنی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup>، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی<sup>۲</sup> و غیره به دلیل ماهیت خود سبب ایجاد آسیب‌های سطحی مانند میکرو ترک‌ها، تغییر فاز، تنش‌های پسماند کششی، مرز دانه و زبری سطح ضعیف و غیره روی سطح قطعات می‌شوند که روی عملکرد قطعات در حین کار تأثیر بسزایی دارند. جهت اصلاح سطح این قطعات، فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی<sup>۳</sup> رشد و توسعه‌یافته است. فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، به‌واسطه پایین بودن دمای ماشین‌کاری آن، یک فرآیند سرد محسوب می‌شود. بنابراین، این فرآیند آسیب‌های سطحی روی سطح قطعات را تجربه نمی‌کند [۱]. در زمینه فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی مطالعات بسیاری انجام شده است.

- 1 Electric Discharge Machining (EDM)
- 2 Electrochemical Machining (ECM)
- 3 Magnetic Abrasive Finishing (MAF)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo.khajezadeh@aut.ac.ir



به صورت معناداری بر روی زبری سطح این آلیاژ منیزیم تأثیر دارد. این محققین گزارش کردند که پارامترهای ورودی را به میزان شدت جریان ۲ آمپر، گپ کاری ۱ میلی متر، سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و مقدار پودر ساینده ۰/۷ گرم برای دستیابی به کمترین زبری سطح، بهینه کردند.

مالیک و پاندی [۱۱] در سال ۲۰۱۰ میلادی، با استفاده از روش رویه پاسخ پارامترهای ورودی فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی زبری سطح قطعات تخت فولاد ۵۲۱۰۰ را بهینه سازی کردند. تحلیل آماری داده های آزمایش های آن ها نشان می دهد که پارامترهای اندازه مش ساینده، درصد وزنی ذرات ساینده، دوران آهنربا الکتریکی و ولتاژ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر درصد تغییرات زبری سطح دارند. این محققین، کمترین زبری سطح به دست آمده را در مدت زمان فرآیند ۱۲۰ ثانیه به میزان ۵۱ نانومتر گزارش کردند.

در مطالعه دیگر، کالا و پاندی [۱۲] در سال ۲۰۱۵ میلادی، با استفاده از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، ماشین کاری قطعات آلیاژ مس<sup>۱</sup> و فولاد زنگ نزن<sup>۲</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها، آزمایش ها را بر اساس متدلوژی رویه پاسخ انجام دادند و با استفاده از تحلیل واریانس، داده های تجربی را بر روی درصد تغییرات زبری سطح تحلیل کردند. این محققین، بهترین مقدار صافی سطح برای آلیاژ مس و فولاد زنگ نزن به ترتیب ۵۳ و ۷۹ نانومتر گزارش نمودند.

ورما و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ میلادی، تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی سطوح داخلی لوله های فولاد زنگ نزن ۳۰۴<sup>۳</sup> را مطالعه کردند. آن ها برای انجام آزمایش ها و تحلیل داده ها، از روش رویه پاسخ بر اساس طرح مرکب مرکزی<sup>۴</sup> استفاده نمودند. این محققین گزارش کردند که زبری سطح تحت شرایط پارامترهای بهینه شده؛ سرعت دورانی آهنربا الکتریکی ۵۰۰ دور بر دقیقه، چگالی شار مغناطیسی ۰/۸ تسلا، ۲۰ درصد وزنی ذرات ساینده و اندازه مش ساینده ۱۲۰۰ به میزان ۸۹/۶ درصد بهبود یافته است.

در تحقیقی دیگر، پاندی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸

سطح قطعات تخت فولاد زنگ نزن، مورد بررسی قرار دادند. آن ها گزارش کردند که تحت شرایط ولتاژ بالا (۱۱/۵ ولت)، گپ کاری پایین (۱/۲۵ میلی متر)، افزایش سرعت دورانی آهنربا (۱۸۰ دور بر دقیقه) و اندازه مش ساینده بالا، درصد تغییرات زبری سطح افزایش یافته است. آن ها همچنین، یک مدل رگرسیون خطی استخراج کردند که نشان می دهد با افزایش ولتاژ آهنربا الکتریکی و کاهش گپ کاری، نیروها و درصد تغییرات زبری سطح افزایش می یابد.

در تحقیقی دیگر، گیرما و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۶ میلادی، تأثیر پارامترهای اندازه مش ساینده و نسبت آن ها، نرخ پیشروی و شدت جریان را در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی زبری سطح و نرخ برداشت ماده قطعات تخت را با استفاده از روش رویه پاسخ<sup>۱</sup>، بررسی کردند. آن ها مشاهده کردند که به طور کلی، زبری سطح به طور مستقیم متناسب با نرخ پیشروی و شدت جریان بهبود می یابد. نتایج مدل سازی و بهینه سازی آن ها نشان می دهد که کمترین زبری سطح (بیش از ۵۰ درصد مقدار اولیه آن) و بیشترین نرخ برداشت ماده (بیش از مقدار ۱۴ میلی گرم مقدار اولیه آن) به دست آمده است و همچنین برای خروجی های فرآیند یک مدل رگرسیون استخراج شده است.

لین و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ میلادی، با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی پارامترهای ورودی فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی زبری سطح قطعات فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (غیرمغناطیسی)<sup>۲</sup> با هندسه آزاد را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها دریافتند که پارامترهای گپ کاری، نرخ پیشروی و مقدار ساینده به ترتیب بیشترین تأثیر را بر میزان زبری سطح دارند و برای این پارامترها یک مقدار بهینه به دست آمده است. در نهایت، آن ها گزارش کردند که فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی زبری سطح را به میزان ۹۴ درصد بهبود بخشیده است.

در تلاشی دیگر، کیم و کواک [۱۰] در سال ۲۰۰۸ میلادی، با استفاده از بهینه سازی به روش تاگوچی، تحلیل نسبت سیگنال به نویز<sup>۳</sup> پارامترهای ورودی فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی زبری سطح قطعات تخت آلیاژ منیزیم<sup>۴</sup> را مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج بررسی های آن ها نشان می دهد که سرعت دورانی

5 AISI 52100  
6 C61 400  
7 SS 202  
8 SS304  
9 Central Composite Design (CCD)

1 Response Surface Method (RSM)  
2 SUS304  
3 S-to-N Ratio (S/N)  
4 AZ31

بر روی درصد بهبود زبری سطح داشته است. این محققین، برای پیش‌بینی خروجی‌های فرآیند مدل‌های رگرسیونی استخراج نمودند و همچنین گزارش کردند که کمترین زبری سطح به میزان ۱۷/۷ نانومتر به‌دست آمده است.

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته به نظر می‌رسد تاکنون بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی قطعات استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰سی<sup>۲</sup> با خاصیت مغناطیسی به کمک روش رویه پاسخ مطالعه نشده است. بنابراین، در این مقاله تأثیر پارامترهای گپ کاری<sup>۳</sup>، سرعت دورانی قطعه کار و نوع ساینده (تزریق دوغاب ساینده کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم، ژل الماس) در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی در ماشین کاری سطوح بیرونی قطعات استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰سی به صورت تجربی مطالعه شده است. برای انجام آزمایش‌ها، تجهیزاتی طراحی و ساخته شد. سپس، آزمایش‌ها بر اساس روش طراحی آزمایش کامل انجام شد. در مرحله بعد، با استفاده از روش رویه پاسخ مقادیر بهینه پارامترهای گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار برای دستیابی به کمترین زبری سطح، مدل‌سازی و استخراج شده است. علاوه بر این، برای درک بهتر نتایج حاصل از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴</sup> بافت سطح نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تئوری فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی

شکل ۱ نحوه توزیع میدان و نیروی مغناطیسی اعمال شده به یک دانه فرومغناطیس در پرداخت کاری سطوح بیرونی قطعات استوانه‌ای را نشان می‌دهد. نیروهایی مغناطیسی بر روی ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس اثر می‌گذارند؛ در شکل ۱ نیروهای وارد بر یک دانه در موقعیت A، خارج از گپ کاری، نشان داده شده است [۱۷]:

$$F_x = Vx_m \mu_0 H \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (1)$$

میلادی، اثر پارامترهای سرعت پولیش کاری، گپ کاری، اندازه مش ساینده و درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی زبری سطح ویفرهای سیلیکونی به کمک روش رویه پاسخ و تحلیل واریانس مورد بحث و بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که زبری سطح تحت شرایط پارامترهای بهینه شده به میزان ۸۹ درصد بهبود یافته است. آن‌ها همچنین، یک مدل رگرسیون برای پیش‌بینی زبری سطح استخراج کردند.

جدیدترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، جین و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ میلادی، با استفاده از روش رویه پاسخ نیروهای ماشین کاری در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را بر روی قطعات مغناطیسی (فولاد<sup>۱</sup>) و غیرمغناطیسی (برنج) مطالعه کردند. آن‌ها، مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی نیروها را بر اساس نتایج تجربی استخراج کردند. تحلیل آماری این محققین، نشان می‌دهد که در میان تمامی پارامترهای ورودی فرآیند، پارامترهای میدان مغناطیسی آهنربای الکتریکی و گپ کاری به ترتیب بیشترین سهم را بر روی خروجی‌های فرآیند داشته است. به علاوه، آن‌ها ادعان داشتند که درصد روغن در برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر بر روی نیروی نرمال اثر معناداری ندارد، اما بر روی نیروی مماسی تأثیر قابل توجهی دارد. آن‌ها همچنین، گزارش کردند که با افزایش سرعت دورانی آهنربای الکتریکی، نیروی نرمال و نیروی مماسی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، آن‌ها مشاهده کردند که اندازه مش ساینده بر روی نیروی نرمال تأثیر قابل توجهی ندارد. به هر حال، دیده شده است که روی نیروی مماسی تأثیر بسزایی دارد، به طوری که با افزایش اندازه مش ذرات ساینده، نیروی مماسی کاهش می‌یابد.

در تحقیقی دیگر، کومار و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۹ میلادی، تأثیر پارامترهای شدت جریان، مقدار ذرات ساینده مغناطیسی، سرعت دورانی قطعه کار و درصد ذرات ساینده الماس در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی نرخ برداشت ماده و درصد بهبود زبری سطح قطعات استوانه‌ای فولاد زنگ‌نزن را به کمک روش رویه پاسخ و تحلیل واریانس مطالعه کردند. آن‌ها ادعان داشتند که تمامی پارامترهای ورودی هر دو خروجی فرآیند به‌طور معناداری تأثیرگذار می‌باشند. آن‌ها همچنین، مشاهده کردند که مقدار ساینده مغناطیسی در مقایسه با سرعت دورانی قطعه کار بیشترین تأثیر را

2 AISI 440C

3 Working Gap

4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، ذرات مغناطیسی در امتداد خطوط میدان مغناطیسی بین قطب‌های  $S$  و  $N$  آهنربا به‌طور مغناطیسی به یکدیگر متصل می‌شوند و یک برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر<sup>۲</sup> را تشکیل می‌دهند.

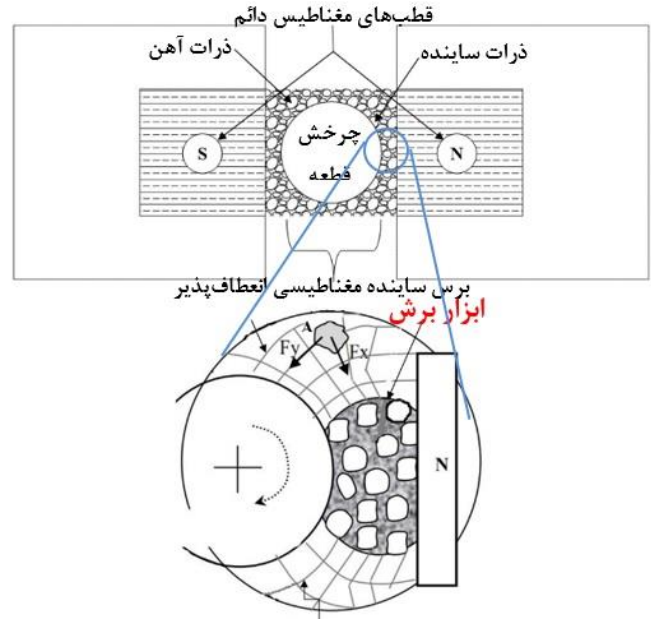
شکل ۲ نمای واقعی از نحوه شکل‌گیری برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را نشان می‌دهد. برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر، باعث ایجاد فشار بر روی سطح قطعه کار می‌شود. به علاوه، این برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر مانند یک ابزار با چندین لبه برنده رفتار می‌کند. همچنین، با دوران قطعه کار برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر بر روی سطح قطعه کار به حرکت در می‌آید و ناهمواری‌ها سطح را ماشین‌کاری می‌کند.

در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی چون نیروی براده‌برداری، نیروی مغناطیسی است بنابراین براده‌ها بسیار ریز هستند و زبری سطح در محدوده نانومتر حاصل می‌گردد. به علاوه، در این فرآیند به‌واسطه این‌که نیروها پایین است، دمای ماشین‌کاری (در محدوده ۵۰ درجه سانتی‌گراد) در ناحیه پرداخت کاری بسیار پایین می‌باشد. به همین دلیل است که فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی آسیب‌های سطحی نظیر میکروتَرَک‌ها، تنش‌های پسماند کششی، سوختگی و غیره را روی سطح قطعه کار تجربه نمی‌کند.



شکل ۲: نمای واقعی از نحوه شکل‌گیری برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی

Fig. 2. The actual view of formation flexible magnetic abrasive brush (FMAB) in magnetic abrasive finishing (MAF) process



شکل ۱: شماتیک فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، برای پرداخت کاری سطوح بیرونی استوانه‌ها

Fig. 1. Schematic illustration of magnetic abrasive finishing process for finishing external surfaces of cylindrical parts

$$F_y = Vx_m \mu_0 H \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)،  $x$  جهت خطوط میدان مغناطیسی،  $y$  جهت خطوط هم‌پتانسیل مغناطیسی<sup>۱</sup>،  $x_m$  حساسیت ذرات فرومغناطیسی،  $\mu$  نفوذپذیری در خلأ،  $V$  حجم ذرات ساینده فرومغناطیسی،  $H$  شدت میدان مغناطیسی در نقطه  $A$ ،  $\frac{\partial H}{\partial x}$  و  $\frac{\partial H}{\partial y}$  گرادیان شدت میدان مغناطیسی در جهت‌های  $x$  و  $y$  هستند. نیروی مغناطیسی عامل تحریک ذرات ساینده است تا آن‌ها را در پرداخت کاری قطعه کار شرکت دهد.  $F_x$  نیروی برشی در امتداد خطوط نیروی مغناطیسی بر ذرات ساینده وارد می‌شود و عامل اصلی نفوذ در قطعه کار است که عملیات براده‌برداری را انجام می‌دهد. در معادله‌های (۱) و (۲) نیروی مغناطیسی در گپ‌کاری بر روی ذرات فرو مغناطیس عمل می‌کند و باعث بهتر شدن مقاومت میدان مغناطیسی می‌شود. همچنین، به علت دوران قطعه کار از پاشش ذرات فرو مغناطیس جلوگیری می‌کند.

- 1 Line of Magnetic Force
- 2 Magnetic Equipotential Line

## ۲-۲- تجهیزات فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی

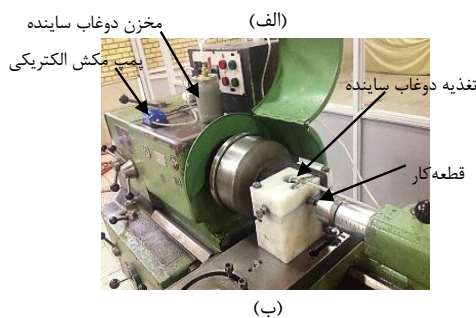
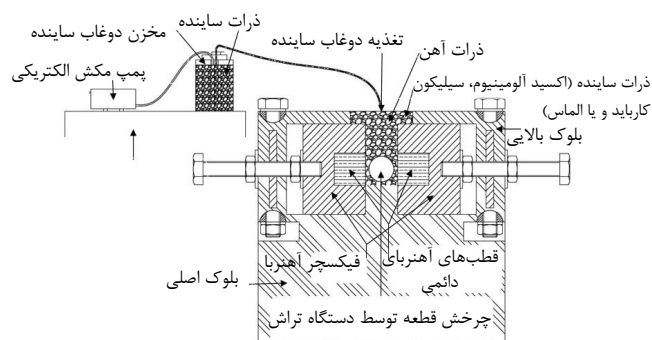
شکل ۳ دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایش‌های فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی را نشان می‌دهد. در این مکانیزم، حرکت خطی آهنرباها قابل تنظیم می‌باشد. این کار سبب کنترل فاصله بین قطعه کار و آهنرباها (گپ کاری) می‌شود. همچنین، حرکت دورانی قطعه کار توسط یک دستگاه تراش تولید شده است. برای جلوگیری از انحراف خطوط میدان مغناطیسی در ناحیه پرداخت کاری برای ساخت تجهیزات از مواد غیرمغناطیسی استفاده شده است. به علاوه، برای بهبود کیفیت سطح پرداخت، دوغاب ساینده که حاوی ذرات ساینده (کارباید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم) با آب است، در طی پرداخت کاری تزریق شده است. علاوه بر این، دوغاب ساینده باعث خنک شدن سطح پرداخت کاری شده و نیروهای اصطکاک را کاهش می‌دهد. دوغاب ساینده به وسیله یک پمپ مکشی به ناحیه پرداخت کاری تزریق شده است.

## ۳-۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

مواد انتخاب شده در این تحقیق فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰ سی با خاصیت مغناطیسی می‌باشد که ساختار شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. این فولاد در ساخت یاتاقان‌ها، نازل‌ها، قطعات سایشی پمپ‌های هواپیما، قالب اینسرت‌ها، ابزارهای جراحی و غیره به کار برده می‌شود.

در این تحقیق، از سه نوع پودر ساینده کارباید سیلیسیم (شکل ۴-الف)، اکسید آلومینیوم (شکل ۴-ب) و ژل الماس با اندازه دانه به ترتیب ۵/۵، ۱۸ و ۲ میکرومتر استفاده شده است. برای تعیین اندازه ذره پودرها از نرم‌افزار آنالیز تصاویر<sup>۱</sup> بهره گرفته شد. همچنین، در این مطالعه از ذرات آهن با متوسط اندازه ذره ۱۵۰ میکرومتر (شکل ۴-ج) به عنوان ذرات فرومغناطیس استفاده شده است.

در این تحقیق، قطعات استوانه‌ای فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰ سی با استفاده از دستگاه تراش، ماشین کاری شده‌اند. در مرحله بعدی برای ایجاد سختی نمونه‌ها از عملیات حرارتی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌ها تا دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در کوره نگهداری شد و به مدت ۱۵ دقیقه در روغن کوئنچ شدند. سپس با استفاده از سختی‌سنج، سختی نمونه‌ها ۵۰ راکول سی اندازه‌گیری شد. در نهایت نمونه‌ها با استفاده از فرآیند سنگ‌زنی، سنگ زده شده‌اند. قبل از انجام آزمایش‌های تجربی، با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پرتومتر<sup>۲</sup> ساخت شرکت ماهر<sup>۳</sup> آلمان زبری سطح اولیه نمونه‌ها در چند نقطه متفاوت اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها یعنی مقدار ۰/۴۱۸ میکرومتر ثبت گردید (شکل ۵).



شکل ۳: تجهیزات فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی (الف) نمایش شماتیک و (ب) نمای واقعی

Fig. 3. Equipment of magnetic abrasive finishing process (a) Schematic illustration and (b) Actual view

Table 1. Chemical composition of AISI 440C stainless steel

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۴۴۰ سی

عنصر شیمیایی	درصد وزنی (%)
آهن	فلز پایه
کربن	۰/۹۸۳
سیلیسیوم	۰/۷۶۹
منگنز	۰/۴۰۵
کروم	۱۷/۳

1 Image Analyzer Olysia

2 Perthometer M2

3 Mahr

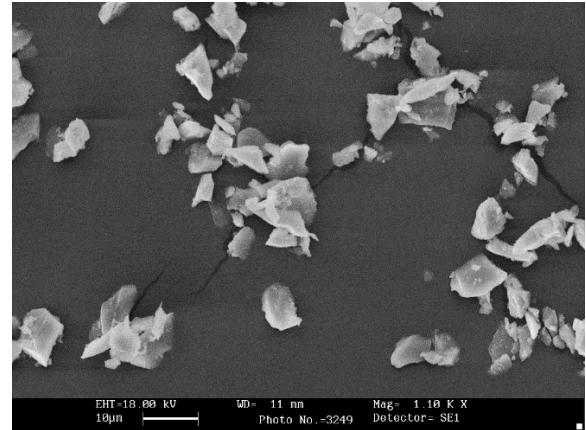


شکل ۵: اندازه‌گیری زبری سطح با زبری‌سنج

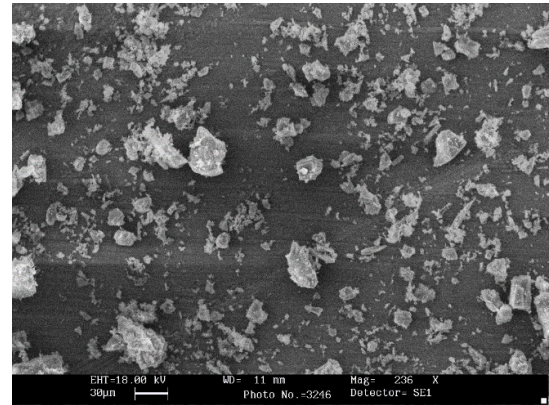
Fig. 5. Surface roughness measuring device

#### ۲-۴- طراحی و اجرای آزمایش‌ها

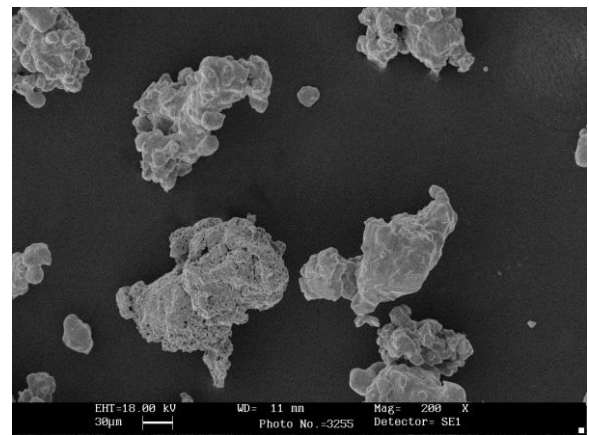
در این مقاله، برای انجام آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش کامل<sup>۱</sup> استفاده شده است. طراحی آزمایش کامل، اطلاعات جامعی از فرآیند فراهم می‌آورد. بدین معنا که در این روش بررسی اثرات پارامترهای اصلی و تمام تعاملات بین پارامتری امکان‌پذیر است. همچنین، در طراحی آزمایش کامل تعداد سطوح همه پارامترها با هم برابر می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر پارامترهای گپ‌کاری، سرعت دورانی قطعه‌کار و نوع ساینده بر روی زبری سطح، برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد. بدین ترتیب ۲۷ آزمایش تعیین شده است. در جدول ۲ پارامترها و سطوح آن‌ها آورده شده است. همچنین، در جدول ۳ شرایط حاکم بر آزمایش‌ها ارائه شده است. با انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج در هر مورد از سطح نمونه از چند نقطه مختلف اندازه‌گیری و مقدار متوسط آن‌ها به عنوان زبری سطح ثبت شد. سپس به کمک معادله (۳) درصد تغییرات زبری سطح با در نظر گرفتن زبری اولیه<sup>۲</sup> ( $R_{a,I}$ ) و نهائی<sup>۳</sup> ( $R_{a,F}$ )، محاسبه گردید. در نهایت داده‌های تجربی که در جدول ۴ آورده شده است، با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی‌تب ۱۸ تجزیه و تحلیل شده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی پودرها (الف) ذرات ساینده کاربید سیلیسیم با بزرگنمایی ۱۱۰۰ و متوسط اندازه دانه ۵/۵ میکرومتر، (ب) ذرات ساینده اکسید آلومینیوم با بزرگنمایی ۲۳۶ و متوسط اندازه دانه ۱۸ میکرومتر، (ج) ذرات آهن با بزرگنمایی ۲۰۰ و متوسط اندازه دانه ۱۵۰ میکرومتر

Fig. 4. Microscopy images form powders (a) silicon carbide abrasive particles with a magnification of 1100 and the average grain size of 5.5 μm (b) aluminum oxide abrasive particles with a magnification of 236 and the average grain size of 18 μm (c) iron particles with a magnification of 200 and the average grain size of 150 μm

1 Full Factorial Design  
2 Initial Surface Roughness  
3 Final Surface Roughness

Table 2. Finishing parameters and their values

جدول ۲: پارامترهای پرداخت کاری و مقادیر آنها

مقادیر سطوح			پارامترها
۳	۲	۱	گپ کاری، A (mm)
۵۰۰	۳۵۵	۲۵۰	سرعت دورانی قطعه کار، B (rpm)
زل الماس (c)	دوغاب ساینده اکسید آلومینیوم	دوغاب ساینده کاربید	نوع ساینده، C

Table 3. The Condition of Experimental Tests

جدول ۳: شرایط آزمایش‌های تجربی

مشخصات	پارامتر
AISI ۴۴۰C نزن فولاد زنگ ابعاد: Ø۲۰mm×150mm میزان سختی: ۵۰ HRC زبری سطح اولیه: 0.418 µm طول نمونه برداری دستگاه: ۰/۸	قطعه کار
ND-Fe-B آهنربا دائم نوع ابعاد: Ø۲۵mm×۲۵mm شدت شار مغناطیسی: ۱/۴ T	آهنربا
ذرات آهن: ۴ گرم، متوسط اندازه دانه ۱۵۰ میکرومتر ساینده کاربید سیلیسیم: ۱ گرم، متوسط اندازه دانه ۵/۵ میکرومتر روانکار: ۰/۶ گرم روغن SAE۴۰	نوع مخلوط ساینده مغناطیسی
نسبت مخلوط دوغاب ساینده؛ آب: کاربید سیلیسیم: ۱:۲۰ (توسط درصد وزنی) نرخ جریان دوغاب ساینده: ۳/۵ سی سی بر دقیقه	دوغاب ساینده کاربید سیلیسیم
ذرات آهن: ۴ گرم، متوسط اندازه دانه ۱۵۰ میکرومتر ساینده اکسید آلومینیوم: ۱ گرم، متوسط اندازه دانه ۱۸ میکرومتر روانکار: ۰/۶ گرم روغن SAE۴۰	نوع مخلوط ساینده مغناطیسی
نسبت مخلوط دوغاب ساینده؛ آب: اکسید آلومینیوم: ۱:۲۰ (توسط درصد وزنی) نرخ جریان دوغاب ساینده: ۳/۵ سی سی بر دقیقه	دوغاب ساینده اکسید آلومینیوم
ذرات آهن: ۳ گرم، متوسط اندازه دانه ۱۵۰ میکرومتر زل الماس: ۲ گرم، متوسط اندازه دانه ۲ میکرومتر روانکار: ۰/۶ گرم روغن SAE۴۰	نوع مخلوط ساینده مغناطیسی
طول پرداخت کاری ۲۵ میلی متر زمان پرداخت کاری ۳۰ دقیقه	طول پرداخت کاری زمان پرداخت کاری

$$\Delta R_a = \left( \frac{R_{a,I} - R_{a,F}}{R_{a,i}} \right) \times 100 \quad (3)$$

## ۲-۵- روش مدل سازی و بهینه سازی

امروزه، بسیاری از محققین [۱۸ و ۱۹] در علوم مختلف برای مدل سازی و یا بهینه سازی داده‌های تجربی از روش رویه پاسخ استفاده می‌کنند. در واقع، از اهداف روش رویه پاسخ می‌توان به بهبود فرآیند با پیدا کردن ورودی‌های بهینه برای به دست آوردن بهترین خروجی، رفع مشکلات و نقاط ضعف فرآیند و غیره اشاره کرد. بنابراین در این مقاله، برای مدل سازی و بهینه سازی بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند از روش رویه پاسخ استفاده شده است. روش رویه پاسخ، یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که برای توسعه، بهبود و بهینه سازی فرآیندها مفید می‌باشد. در این روش، رابطه بین تابع پاسخ و متغیرهای مستقل را نمی‌توان به طور دقیق مشخص کرد. بنابراین، اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط دادن تابع پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. در صورت وجود خمیدگی در پاسخ یا تأثیر متقابل پارامترها بر یکدیگر، مناسب‌ترین گزینه برای تقریب زدن، مدل مرتبه دوم می‌باشد. مدل مرتبه دوم، یک مدل کاربردی است که اغلب در طرح‌های تجربی بیشترین مطابقت را دارد. بنابراین، در این مقاله از مدل مرتبه دوم استفاده شده است که فرم کلی آن به صورت معادله (۴)، نشان داده شده است:

کمترین زبری سطح از روش تابع مطلوبیت<sup>۱</sup> استفاده شده است.

Table 4. Results of experimental tests

جدول ۴: نتایج آزمون‌های تجربی

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			مقادیر پاسخ خروجی %ΔRa (μm)
	C	B(rpm)	A(mm)	
۱	a	۲۵۰	۱	۲۴/۱۶
۲	b	۲۵۰	۱	۲۳/۲۰
۳	c	۲۵۰	۱	۳۸/۰۳
۴	a	۳۵۵	۱	۲۶/۰۷
۵	b	۳۵۵	۱	۱۷/۲۲
۶	c	۳۵۵	۱	۴۳/۰۶
۷	a	۵۰۰	۱	۲۲/۷۲
۸	b	۵۰۰	۱	۱۸/۶۶
۹	c	۵۰۰	۱	۳۴/۲۱
۱۰	a	۲۵۰	۲	۲۳/۲۰
۱۱	b	۲۵۰	۲	۸/۳۷
۱۲	c	۲۵۰	۲	۴۵/۲۱
۱۳	a	۳۵۵	۲	۲۹/۱۸
۱۴	b	۳۵۵	۲	۲۰/۵۷
۱۵	c	۳۵۵	۲	۵۰/۴۷
۱۶	a	۵۰۰	۲	۲۰/۰۹
۱۷	b	۵۰۰	۲	۱۶/۰۲
۱۸	c	۵۰۰	۲	۴۲/۱۰
۱۹	a	۲۵۰	۳	۱۹/۱۳
۲۰	b	۲۵۰	۳	۶/۹۳
۲۱	c	۲۵۰	۳	۳۱/۱۰
۲۲	a	۳۵۵	۳	۲۴/۶۴
۲۳	b	۳۵۵	۳	۱۰/۲۸
۲۴	c	۳۵۵	۳	۴۷/۱۲
۲۵	a	۵۰۰	۳	۲۵/۱۱
۲۶	b	۵۰۰	۳	۱۱/۰۰

### ۳- نتایج و بحث

۳-۱- تفسیر، تحلیل داده‌ها و نتایج آزمایش‌ها

۳-۱-۱- آنالیز واریانس روش طراحی آزمایش کامل

نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این جدول‌ها، به منظور بررسی معنادار بودن مدل و کیفیت آن از مهم‌ترین مشخصه‌ها نظیر مقدار-اف<sup>۲</sup>، مقدار-پی<sup>۳</sup>، ضریب تعیین<sup>۴</sup> و ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۵</sup> استفاده شده است. مقادیر مشخصه‌های مقدار-اف، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده بزرگ‌تر و همچنین مقدار-پی کوچک‌تر نشان می‌دهد که مدل معنادار می‌باشد [۱۹]. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶، مقادیر مشخصه‌های

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) for surface roughness model developed based on the full factorial method

جدول ۵: آنالیز واریانس برای مدل زبری سطح توسعه‌یافته بر اساس روش فول فاکتوریل

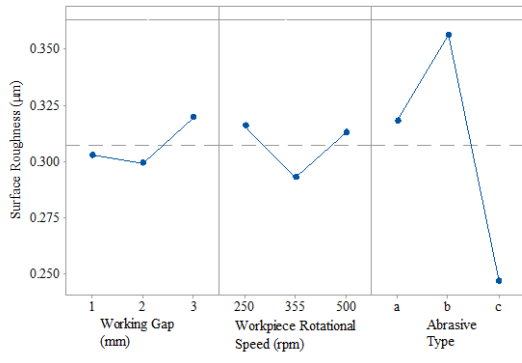
مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	df	ترم
۰/۰۰۰	۲۰/۳۶	۰/۰۰۳۶۳۹	۰/۰۶۵۵۰۳	۱۸	مدل
۰/۰۰۰	۵۶/۱۴	۰/۰۱۰۰۳۴	۰/۰۶۰۲۰۴	۶	ترم‌های خطی
۰/۰۲۶	۵/۹۱	۰/۰۰۱۰۵۷	۰/۰۰۲۱۱۴	۲	A
۰/۰۱۳	۷/۷۶	۰/۰۰۱۳۸۷	۰/۰۰۲۷۷۴	۲	B
۰/۰۰۰	۱۵/۷۵	۰/۰۰۲۷۶۵۸	۰/۰۵۵۳۱۶	۲	C
	۴				
۰/۱۰۳	۲/۴۷	۰/۰۰۰۴۴۲	۰/۰۰۵۲۹۸	۱۲	ترم‌های اثر متقابل
۰/۱۷۷	۲/۰۷	۰/۰۰۰۳۷۰	۰/۰۰۱۴۸۰	۴	A×B
۰/۰۴۹	۳/۸۸	۰/۰۰۰۶۹۴	۰/۰۰۲۷۷۴	۴	A×C
۰/۳۰۰	۱/۴۶	۰/۰۰۰۲۶۱	۰/۰۰۱۰۴۴	۴	B×C
-	-	۰/۰۰۰۱۷۹	۰/۰۰۱۴۳۰	۸	خطا
-	-	-	۰/۰۶۶۹۳۳	۲۶	کل

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

در این معادله  $y$  تابع تخمین پاسخ (زبری سطح)،  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل،  $\varepsilon$  خطای آماری،  $\beta_{ij}$  و  $\beta_{ii}$ ،  $\beta_i$ ،  $\beta_0$  ضرایب ثابت مجهول هستند که از تحلیل به دست می‌آیند. بعد از مدل‌سازی فرآیند، برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای گپ‌کاری و سرعت دورانی قطعه‌کار برای رسیدن به

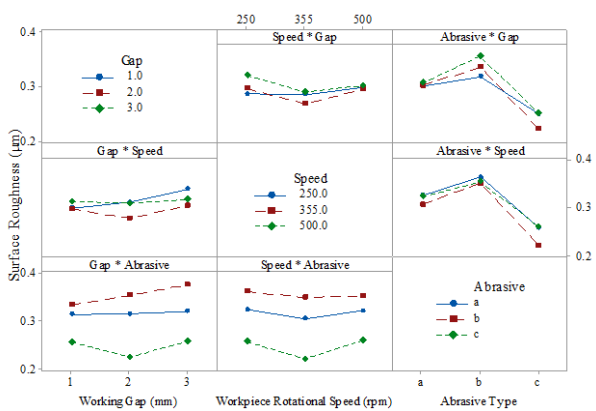
- 1 Desirability Function Method
- 2 F-Value
- 3 P-Value
- 4 R<sup>2</sup>
- 5 Adjusted R<sup>2</sup>





شکل ۶: تأثیر اصلی پارامترها بر زبری سطح

Fig. 6. Parameters main effects on the surface roughness



شکل ۷: تأثیر متقابل پارامترها بر زبری سطح

Fig. 7. Interaction of parameters on the surface roughness

### ۳-۱-۳- اثر گپ کاری بر روی زبری سطح

زبری سطح و عملکرد فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی به مقدار بسیار زیادی تحت تأثیر استحکام برس ساینده مغناطیسی انعطاف پذیر می باشد. در حقیقت، در این فرآیند، ابزار ماشین کاری، برس ساینده مغناطیسی انعطاف پذیر می باشد که از چهار بخش اصلی نظیر میدان مغناطیسی، ذرات آهن، ذرات ساینده و مقدار راونکار مانند روغن تشکیل شده است.

همان طور که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است، با کاهش گپ کاری تا مقدار ۲ میلی متر، زبری سطح افزایش می یابد. در واقع، منظور از گپ کاری فاصله بین سطح قطعه کار تا سطح آهنربا می باشد. زمانی که گپ کاری کاهش می یابد، نیروی میدان مغناطیسی افزایش می یابد که نتیجه آن افزایش استحکام برس ساینده مغناطیسی انعطاف پذیر می باشد. این امر سبب می شود ذرات آهن، ذرات ساینده را با شدت بیشتری نگهداری کنند

Table 6. Summary of Developed Model based on full factorial

جدول ۶: خلاصه مدل روش طراحی آزمایش کامل

ضریب تعیین پیش بینی شده (درصد)	ضریب تعیین تعدیل شده (درصد)	ضریب تعیین انحراف معیار (درصد)
۷۵/۶۷	۹۳/۰۶	۹۷/۸۶
۰/۱۳۳۶۸۷		

مقدار-اف، مقدار-پی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده به ترتیب ۲۰/۳۶، <۰/۰۰۰، ۹۷/۸۶ درصد و ۹۳/۰۶ درصد می باشد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که مدل به میزان قابل توجهی معنادار می باشد.

علاوه بر این، با توجه به مقدار-پی پارامترهای گپ کاری، سرعت دورانی قطعه کار، نوع ساینده و اثر متقابل گپ کاری و نوع ساینده کمتر از سطح اطمینان (کمتر از ۰/۰۵) می باشند. بنابراین، مشاهدات حاکی از آن است که هر سه پارامتر ورودی فرآیند بر روی زبری سطح تأثیر معناداری دارند و همچنین تأثیر گذارترین پارامتر بر روی زبری سطح، نوع ساینده ژل الماس می باشد.

### ۳-۱-۲- تأثیر اصلی و متقابل پارامترها

در شکل ۶ اثرات اصلی پارامترها بر زبری سطح نشان داده شده است. می توان رفتار این پارامترها را به این گونه تفسیر نمود که مؤثرترین پارامتر که باعث افزایش درصد بهبود زبری سطح می شود، ژل الماس خواهد بود. همچنین بهترین مقدار صافی سطح در گپ کاری ۲ میلی متر به دست آمده است. از این مقدار به بعد افزایش گپ کاری سبب کاهش صافی سطح می شود و افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا ۳۵۵ دور بر دقیقه، زبری سطح کاهش می یابد؛ اما با افزایش بیش از این مقدار، زبری سطح افزایش می یابد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، نوع ساینده ژل الماس در مقایسه با گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح دارد. همچنین، سرعت دورانی قطعه کار دومین عامل تأثیر گذار بر روی زبری سطح می باشد. به علاوه، شکل ۷ نشان می دهد که تعامل بین نوع ساینده و گپ کاری نیز تا حدودی مشاهده می شود و تعامل های دیگر خیلی مؤثر نمی باشند. بنابراین، از شکل ۷ چنین نتیجه می شود زمانی که از نوع ساینده به غیر از ژل الماس جهت گپ کاری استفاده می شود، تأثیر گپ کاری بر روی فرآیند کاهش می یابد.

غلبه می‌کند و سبب پرتاب شدن ذرات ساینده از ناحیه گپ‌کاری می‌شود. در نتیجه، برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر از هم پاشیده می‌شود و دیگر به خوبی روی ناهمواری‌های سطح قطعه کار به حرکت در نمی‌آید. از این رو، با افزایش دوران قطعه کار بیش از مقدار ۳۵۵ دور بر دقیقه، عملیات گپ‌کاری مختل می‌شود و زبری سطح افزایش می‌یابد.

### ۳-۱-۵- اثر نوع ساینده بر روی زبری سطح

به طور کلی در فرآیندهای پرداخت کاری به کمک ذرات ساینده به‌ویژه فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی عملکرد آن‌ها بستگی به نوع، اندازه، شکل و سختی ذرات ساینده دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، زبری سطح به‌دست آمده تحت شرایط تجربی؛ گپ‌کاری ۲ میلی‌متر، سرعت دورانی قطعه کار ۳۵۵ دور بر دقیقه و استفاده از تزریق دوغاب ساینده کاربید سیلیسیم، تزریق دوغاب ساینده اکسید آلومینیوم و ژل الماس به ترتیب به میزان تقریباً ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد بهبود یافته است. رفتار این پارامترها با ارائه موارد زیر قابل توجیه می‌باشد:

مورد اول؛ به‌طور کلی هر چه اندازه دانه ریزتر، زبری سطح کمتر می‌باشد و هر چه اندازه دانه درشت‌تر، زبری سطح بیشتر می‌باشد. در این تحقیق، از ساینده‌های کاربید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم و ژل الماس با متوسط اندازه دانه به ترتیب ۵/۵، ۱۸ و ۲ میکرومتر استفاده شده است. زمانی که از دانه ساینده درشت‌تر (اکسید آلومینیوم با متوسط اندازه دانه ۱۸ میکرومتر) استفاده می‌شود، نیروی مغناطیسی که عامل تحریک ذرات ساینده است در میان تعداد کمی از ذرات ساینده توزیع می‌شود. بنابراین، نیروی نفوذ به درون سطح قطعه کار بر روی هر دانه ساینده افزایش می‌یابد. در نتیجه، دانه ساینده درشت‌تر، عمق نفوذ بیشتری را به درون سطح قطعه کار تجربه می‌کند که نتیجه آن افزایش خراش‌ها و بی‌نظمی‌های عمیق‌تری روی بافت سطح قطعه کار می‌شود و یک سطح پرداخت نامناسبی به دست می‌آید. همچنین، زمانی که از دانه ساینده ریزتر (ژل الماس ۲ میکرومتر) استفاده می‌شود، نیروی مغناطیسی در میان تعداد بیشتری از ذرات ساینده توزیع می‌شود. بنابراین، نیروی نفوذ به درون سطح قطعه کار بر روی هر دانه ساینده کاهش می‌یابد. در نتیجه، دانه ساینده ریزتر، عمق نفوذ کمتری را به درون سطح قطعه کار تجربه می‌کند که یک سطح پرداخت فوق‌صیقل و یکنواختی به‌مانند یک آینه تا محدوده ۰/۲۰۷ میکرومتر به‌دست آمده است (شکل ۸-ب).

مورد دوم؛ یکی دیگر از عواملی که تأثیر شگرفی بر روی صافی سطح و عملکرد فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی دارد، نسبت اندازه

که موجب می‌شود دانه ساینده عمق نفوذ بیشتری را به درون سطح قطعه کار تجربه کند. بنابراین، نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد و سبب خراش‌های عمیقی روی بافت سطح قطعه کار می‌شود که نتیجه آن افزایش زبری سطح می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بهترین مقدار صافی سطح در گپ‌کاری ۲ میلی‌متر به‌دست آمده است. از این مقدار به بعد افزایش گپ‌کاری سبب کاهش صافی سطح می‌شود. زمانی که گپ‌کاری افزایش می‌یابد، قدرت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد و به دنبال آن نیروی مغناطیسی (عامل تحریک ذرات ساینده) وارد بر ذرات آهن کاهش می‌یابد. بنابراین، ذرات آهن توانایی نگهداری ذرات ساینده را ندارند، از این رو استحکام برس ساینده مغناطیسی کاهش می‌یابد. در چنین وضعیتی، دوران قطعه کار و همچنین مخلوط مکانیکی ذرات آهن با ذرات ساینده موجب می‌شود که بسیاری از ذرات ساینده در ناحیه ماشین‌کاری به بیرون پرتاب شوند. در نتیجه، در گپ‌کاری بالاتر از ۲ میلی‌متر، عملیات ماشین‌کاری مختل می‌شود و سطح پرداخت مناسبی به دست نمی‌آید.

### ۳-۱-۴- اثر سرعت دورانی قطعه کار بر روی زبری سطح

دوران قطعه کار در طی ماشین‌کاری، یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی میزان زبری سطح و عملکرد فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی می‌باشد. نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا ۳۵۵ دور بر دقیقه، زبری سطح کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیش از این مقدار، زبری سطح افزایش خواهد یافت. دلیل این امر را می‌توان به این‌گونه تفسیر نمود؛ به محض دوران قطعه کار، برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر روی ناهمواری‌های سطح قطعه کار شروع به دوران می‌کند. در چنین شرایطی، ناحیه تماس ذرات ساینده با ناهمواری‌های سطح قطعه کار به شکل قوس در می‌آید و شتاب ذرات ساینده افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به این که در برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر، ذرات ساینده با هندسه و لبه‌های برنده نامنظم وجود دارد. از این رو، با افزایش دوران قطعه کار، تعامل ذرات ساینده با ناهمواری‌های سطح قطعه کار افزایش می‌یابد و همچنین باعث افزایش جابجایی لبه‌های برنده در برخورد با ناهمواری‌های سطح قطعه کار می‌باشد. در نتیجه، برآیند این رفتارها، باعث افزایش نیروی برشی دانه ساینده می‌شود و به‌راحتی ناهمواری‌های سطح قطعه کار را از بین می‌برد و دنبال آن زبری سطح کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش بیش‌ازحد دوران قطعه کار، نیروی گریز از مرکز بر نیروی میدان مغناطیسی

ایجاد می‌کند. بنابراین، با توجه به شکل و اندازه دانه ساینده اکسید آلومینیوم و شرایط ماشین‌کاری، گپ‌کاری ۲ میلی‌متر و سرعت دورانی قطعه‌کار ۳۵۵ دور بر دقیقه زبری سطح به میزان تقریباً ۲۰ درصد بهبود یافته است.

مورد چهارم؛ در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی یکی از عواملی که تأثیر بسزایی بر روی صافی سطح و عملکرد آن دارد، نوع ساینده می‌باشد. ذرات ساینده الماس دارای سختی بسیار بالایی نسبت به ذرات ساینده کاربید سیلیسیم و ذرات ساینده اکسید آلومینیوم می‌باشد. همچنین، سختی ذرات ساینده کاربید سیلیسیم بیشتر از ذرات ساینده اکسید آلومینیوم می‌باشد. بنابراین، با توجه به سختی ذرات ساینده ژل الماس، کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم و همچنین شرایط ماشین‌کاری به ترتیب زبری سطح به میزان تقریباً ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد بهبود یافته است.

### ۳-۱-۶- مقایسه میکروسکوپی بافت سطح قطعه‌کار قبل و بعد از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بافت سطح قطعه‌کار قبل و بعد از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شکل ۸-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ از بافت سطح قطعه‌کار که با استفاده از سنگ‌زنی ماشین‌کاری شده است، را نشان می‌دهد. در این شکل، مقدار زبری سطح نمونه ۰/۴۱۸ میکرومتر ثبت گردیده است که در آن جهت و شیارهای سطح ناشی از فرآیند سنگ‌زنی روی بافت سطح قطعه‌کار به وضوح قابل مشاهده است.

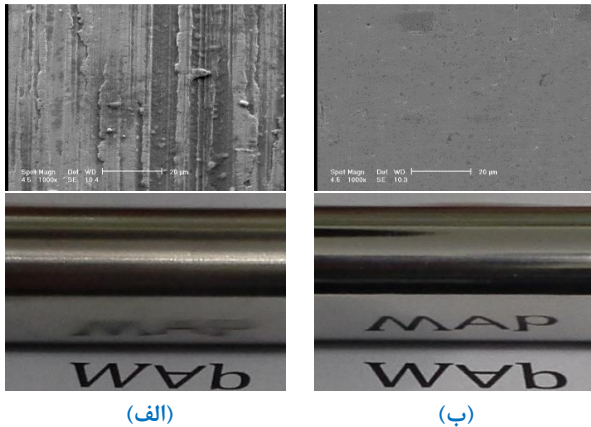
بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از نمونه مورد آزمایش شماره ۱۵ (جدول ۴)، به خوبی دیده می‌شود که فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی جهت و شیارهای ناشی از فرآیند سنگ‌زنی را به طور قابل توجهی از بین برده است و همچنین یک سطح پرداخت فوق صیقل و یکنواختی به مانند یک آینه تا محدوده ۰/۲۰۷ میکرومتر به دست آمده است (شکل ۸-ب).

علاوه بر این، برای درک بهتر نتایج حاصل از فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، مقایسه‌ای میکروسکوپی و نمای واقعی از بافت سطح قطعه‌کار قبل و بعد از پرداخت کاری انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، حروف انگلیسی روی بافت سطح قطعه‌کار منعکس نشده است، این نشان می‌دهد که روی بافت سطح قطعه‌کار ناهمواریهای بسیاری ناشی از فرآیند سنگ‌زنی وجود دارد که موجب عدم براقیت سطح شده است. از طرف دیگر،

ذرات فرومغناطیس به ذرات ساینده است. این نسبت، تعیین‌کننده فشار پرداخت کاری بر روی سطح قطعه‌کار و استحکام برس ساینده مغناطیسی می‌باشد. در این تحقیق، از پودر آهن با متوسط اندازه دانه ۱۵۰ میکرومتر به عنوان ذرات فرومغناطیس (شکل ۴-ج) استفاده شده است. بنابراین، دور از انتظار نیست که استفاده از ژل الماس با متوسط اندازه ۲ میکرومتر در میان تزریق دوغاب ساینده کاربید سیلیسیم (با متوسط اندازه دانه ۵/۵ میکرومتر) و تزریق دوغاب ساینده اکسید آلومینیوم (با متوسط اندازه دانه ۱۸ میکرومتر) بهترین صافی سطح به دست آمده است. دلیل این است که استفاده از ژل الماس با متوسط اندازه دانه ۲ میکرومتر فشار پرداخت کاری مناسبی روی سطح قطعه‌کار ایجاد کرده است و همچنین برس ساینده مغناطیسی انعطاف‌پذیر مستحکم‌تری تشکیل شده است که میزان زبری سطح به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

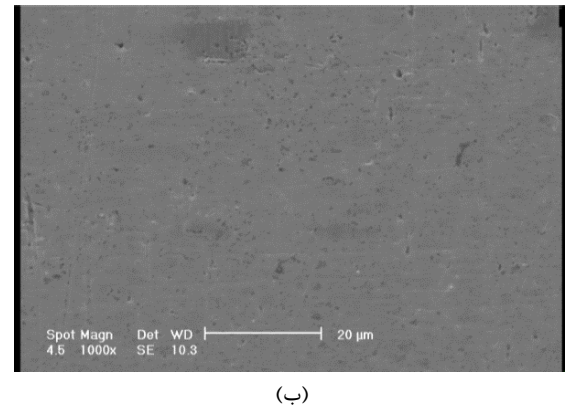
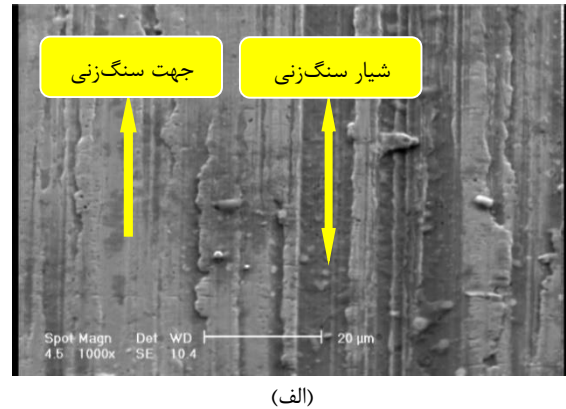
مورد سوم؛ شکل دانه ذرات ساینده در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا تعیین‌کننده هندسه و لبه برنده، ابزار ماشین‌کاری می‌باشد. در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم نشان داده شده است. در شکل ۴-الف، مشاهده می‌شود که شکل دانه ساینده کاربید سیلیسیم مانند یک جسم چندوجهی با هندسه و لبه‌های نامنظم می‌باشد. زمانی که این دانه ساینده با چنین هندسه و مشخصاتی با ناهمواری‌های سطح قطعه‌کار برخورد می‌کند مانند یک ابزار با چندین لبه برش رفتار می‌کند. از این رو، استفاده از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم با متوسط اندازه دانه ۵/۵ میکرومتر، تحت شرایط ماشین‌کاری گپ‌کاری ۲ میلی‌متر و سرعت دورانی قطعه‌کار ۳۵۵ دور بر دقیقه زبری سطح به میزان تقریباً ۳۰ درصد بهبود یافته است.

در شکل ۴-ب، مشاهده می‌شود که شکل ذرات ساینده اکسید آلومینیوم از لحاظ ظاهر و اندازه از قاعده خاصی پیروی نمی‌کنند، بیشتر شبیه کروی و جسم چندوجهی می‌باشند. در واقع، صافی سطح به دست آمده از دانه ساینده کروی نسبت به دانه ساینده چندوجهی، بهتر می‌باشد. در شکل ۴-ب، ترکیبی از شکل دانه کروی و جسم چندوجهی مشاهده می‌شود. بنابراین، زمانی که دانه ساینده کروی سطح را پرداخت می‌کند، بعد از دانه ساینده چندوجهی روی سطح خراش‌هایی را ایجاد می‌کند. از طرفی دیگر، در شکل ۴-ب دیده می‌شود که اندازه دانه‌ها نسبت به هم اختلاف زیادی دارند. این امر باعث می‌شود، زمانی که دانه ساینده ریزتر سطح را پرداخت می‌کند، بعد از آن دانه ساینده درشت‌تر خراش‌های عمیقی را روی بافت سطح قطعه‌کار



**شکل ۹:** تصاویر میکروسکوپی و نمای واقعی از بافت سطح قطعه کار (الف) قبل از فرآیند زبری سطح اولیه ۰/۴۱۸ میکرومتر و (ب) بعد از فرآیند زبری سطح ۰/۲۰۷ میکرومتر تحت شرایط ماشین کاری (گپ کاری ۲ میلی متر، سرعت دورانی قطعه کار ۳۵۵ دور بر دقیقه و استفاده از ژل الماس به عنوان ابزار ساینده با متوسط اندازه ذره ۲ میکرومتر)

**Fig. 9. Microscopic images and actual view from work piece surface texture (a) before finishing (initial surface roughness 0.418 μm) and (b) after finishing (final surface roughness 0.207 μm); Machining Conditions (working gap of 2 mm, work piece rotational speed 355 rpm and diamond paste with average particle size of 2 μm was used (as abrasive tool**



**شکل ۸:** تصاویر میکروسکوپی از بافت سطح قطعه کار (الف) پرداخت کاری با استفاده از سنگ زنی زبری سطح اولیه ۰/۴۱۸ میکرومتر، (ب) پرداخت کاری به کمک فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی با استفاده از ژل الماس (گپ کاری ۲ میلی متر و سرعت دورانی قطعه کار ۳۵۵ دور بر دقیقه) زبری سطح نهایی ۰/۲۰۷ میکرومتر

**Fig. 8. Microscopy images from work piece surface texture (a) finishing by grinding initial surface roughness 0.418 μm (b) finishing assisted magnetic abrasive finishing (MAF) process using diamond paste (working gap of 2 mm and the work piece rotational speed of 355 rpm) final surface roughness 0.207 μm**

تحلیل واریانس مشاهده شد که پارامترهای گپ کاری، سرعت دورانی قطعه کار و نوع ساینده ژل الماس از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان زبری سطح می باشند. از طرفی دیگر، پارامتر نوع ساینده یک پارامتر کیفی می باشد، بنابراین برای مدل سازی و بهینه سازی، پارامترهای گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار و نوع ساینده ژل الماس لحاظ گردیده است. از این رو، برای دستیابی به این مهم، تمامی داده های تجربی در جدول ۴، مربوط به نوع ساینده (تزریق دوغاب ساینده کاربرد سیلیسیم و اکسید آلومینیوم) از بخش داده ها حذف شده اند. در نتیجه، فقط داده های مربوط به نوع ساینده ژل الماس، یعنی شماره آزمایش های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴ و ۲۷ در جدول ۴ که بیش ترین تأثیر در بهبود زبری سطح دارد، باقی مانده است. سپس، در همان محیط کاری روش طراحی آزمایش کامل، طرح مجدد در روش رویه پاسخ تعریف شده است.

بنابراین، برای انجام مدل سازی و بهینه سازی در روش رویه پاسخ، ابتدا در نرم افزار مینی تب ۱۸، برای ترمها از درجه دوم کامل استفاده شده است. درجه دوم کامل، تمامی پارامترهای اصلی، درجه دومها و

در شکل ۹-ب به وضوح دیده می شود که این حروف روی بافت سطح قطعه کار به مانند یک آینه منعکس شده است و این نشان می دهد که فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی سبب سطح پرداخت فوق صیقل و یکنواختی شده است.

۳-۲- مدل سازی و بهینه سازی به کمک روش رویه پاسخ  
در این تحقیق برای مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار برای رسیدن به کمترین زبری سطح از روش رویه پاسخ استفاده شده است.  
همان طور که پیش تر بررسی شد، با توجه به یافته های تجربی و

**Table 8. Analysis of variance (ANOVA) for surface roughness model (developed based on the response surface method (RSM**

**جدول ۸:** آنالیز واریانس روش رویه پاسخ برای زبری سطح

مقدار <i>P</i>	مقدار <i>F</i>	میانگین مربعات	جمع مربعات	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$	ترم
۰/۰۴۹	۶/۴۷	۰/۰۰۱۲۳۷	۰/۰۰۴۹۴۹	۴	مدل
۰/۹۶۶	۰/۰۳	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۱۳	۲	ترم‌های خطی
۰/۹۱۲	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۳	۱	<i>A</i>
۰/۸۲۵	۰/۰۶	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۱۱	۱	<i>B</i>
۰/۰۱۸	۱۲/۷۶	۰/۰۰۲۴۴۰	۰/۰۰۴۸۸۰	۲	ترم‌های درجه دو
۰/۰۳۱	۱۰/۷۱	۰/۰۰۲۰۴۸	۰/۰۰۲۰۴۸	۱	<i>A</i> × <i>A</i>
۰/۰۱۸	۱۴/۸۱	۰/۰۰۲۸۳۲	۰/۰۰۲۸۳۲	۱	<i>B</i> × <i>B</i>
-	-	۰/۰۰۰۱۹۱	۰/۰۰۰۷۶۵	۴	خطا

**Table 9. Summary of Response Surface Model**

**جدول ۹:** خلاصه مدل روش رویه پاسخ

S	R <sup>2</sup>	adjusted R <sup>2</sup>	predicted R <sup>2</sup>
---	----------------	-------------------------	--------------------------

روش رویه پاسخ، مقادیر ضرایب غیرخطی به کمک روش رگرسیونی در نرم‌افزار مینی تب ۱۸ به دست آمدند. در نهایت، مدل پیش‌بینی برای زبری سطح بر حسب پارامترهای واقعی به صورت رابطه (۵) به دست آمده است:

$$R_a = 0.6716 - 0.1273A - 0.001851B + 0.03200A^2 + 0.000002B^2 \quad (5)$$

در مدل پیش‌بینی شده (رابطه ۵)، *A* و *B* به ترتیب پارامترهای واقعی گپ‌کاری و سرعت دورانی قطعه‌کار برای دستیابی به کمترین زبری سطح را نشان می‌دهند. برای بررسی کیفیت مدل پیش‌بینی شده

تعاملات بین آن‌ها را لحاظ می‌کند، در نتیجه ایده‌آل‌ترین حالت است که پیش‌فرض خود نرم‌افزار می‌باشد. در مرحله بعد، به منظور محاسبه ضرایب مدل، سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. سپس، برای ورود متغیرها در مدل رگرسیون، از روش گام‌به‌گام استفاده شده است. در این روش، متغیرها را یک‌به‌یک وارد مدل می‌کند، یعنی متغیری که بالاترین ضریب همبستگی را با متغیر وابسته دارد، وارد تحلیل می‌شود.

در نهایت، برای بهینه‌سازی پارامترها، محدوده‌ای از سیستم در نرم‌افزار مینی تب ۱۸، تعریف شد. در جدول ۷ خلاصه قیود به کاررفته، آورده شده است. هدف از بهینه‌سازی پارامترها، دستیابی به کمترین زبری است. بنابراین، برای محقق شدن این مهم، قیود به کار رفته در جدول ۷ برای نرم‌افزار تعریف شد. در این جدول، مقادیر وزن و درصد اهمیت طرح، ۱ در نظر گرفته شده است. این مقادیر، نشان می‌دهند که مقادیر هدف و مرز تعیین‌شده به یک اندازه برای طراح اهمیت دارند.

۱-۲-۳ آنالیز واریانس و مدل‌سازی روش رویه پاسخ

با توجه به جدول‌های ۸ و ۹، مقادیر مشخصه‌های مقدار-*F*، مقدار-*P*، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده به ترتیب ۶/۴۷، ۰/۰۴۹، ۸۶/۶۲ درصد و ۷۳/۲۴ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل به اندازه کافی معنادار می‌باشد.

با استفاده از داده‌های آزمایش مربوط نوع ساینده ژل الماس و

**Table 7. Definition the optimization range using response surface (method (RSM**

**جدول ۷:** تعیین محدوده بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ

زبری سطح	
هدف اصلی	کمترین زبری سطح
حد پایین	۰/۲۰۷
هدف مشخص شده	۰/۲۰۷
حد بالا	۰/۴۱۸
وزن	۱

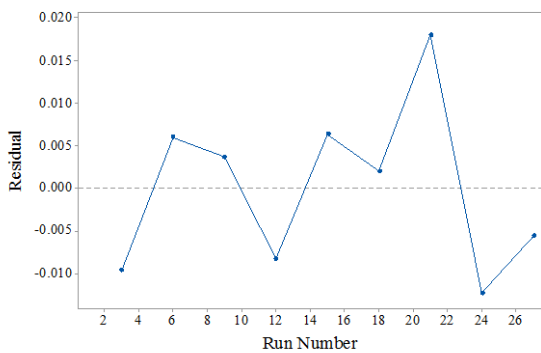
1 Stepwise

زبری سطح دارد، زیرا باقیمانده‌ها به صورت تصادفی پراکنده می‌باشند و از یک الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. بنابراین، از شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که مدل کیفیت مناسب را دارد و مدل‌سازی به روش رویه پاسخ به خوبی انجام شده است.

### ۳-۲-۲- نتایج بهینه‌سازی روش رویه پاسخ

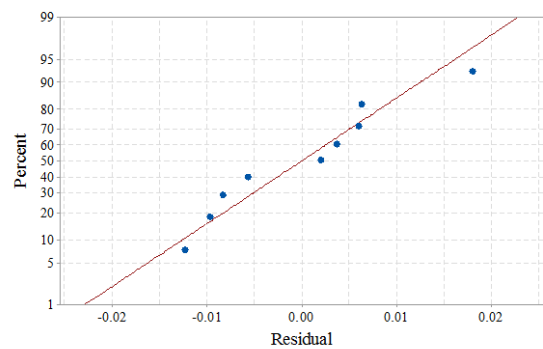
با مدل‌سازی قابل قبول تابع پاسخ برحسب پارامترهای گپ‌کاری و سرعت دورانی قطعه‌کار، مقادیر این پارامترها برای کمترین زبری سطح با روش تابع مطلوبیت بهینه‌سازی شد. نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نتیجه می‌شود که زبری سطح تحت شرایط بهینه‌سازی شده گپ‌کاری ۱/۹۸ میلی‌متر و سرعت دورانی قطعه‌کار ۳۷۳/۷۳

[۱۹]، از سه آزمون اصلی نمودار باقیمانده‌ها نظیر نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها، نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و نمودار باقیمانده‌ها در مقابل ترتیب انجام آزمایش‌ها انجام شده است. در شکل ۱۰ نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که فرض نرمال بودن توزیع خطاها برقرار است، زیرا داده‌ها بر روی یک خط راست قرار گرفته‌اند. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از یک مدل خاصی پیروی نمی‌کنند و نقاط به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. این رفتار، نشان‌دهنده ارضا شدن شرط مستقل بودن خطاها می‌باشد. علاوه بر این، شکل ۱۲ نمودار باقیمانده‌ها در مقابل ترتیب انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل، مشاهده می‌شود که مدل عددی پیشنهادی کفایت لازم را برای



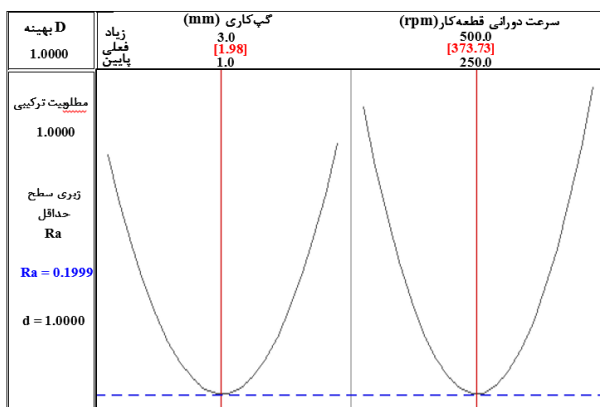
شکل ۱۲: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل ترتیب انجام آزمایش‌ها

Fig. 12. Plot of Residuals against the experimental run



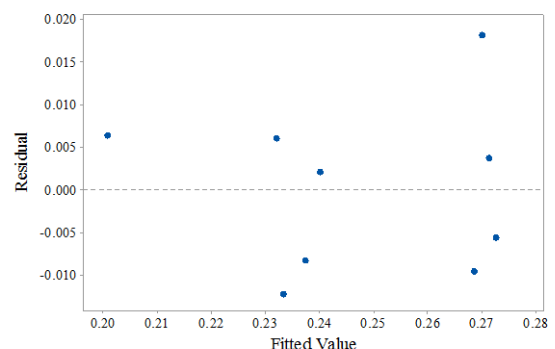
شکل ۱۰: نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها

Fig. 10. Residuals' normal probability plot



شکل ۱۳: نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ

Fig. 13. Optimization results from response surface method (RSM)



شکل ۱۱: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده

Fig. 11. Plot of Residuals against the predicted values

با استفاده از روش رویه پاسخ برای رسیدن به کمترین زبری سطح، مدل سازی و بهینه سازی شده است. بر اساس بررسی های انجام گرفته، نتایج زیر خلاصه می گردد:

بر اساس آنالیز واریانس روش طراحی آزمایش کامل، مقادیر مشخصه های مقدار-اف، مقدار-پی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده به ترتیب ۲۰/۳۶، ۰/۰۰۰، ۹۷/۸۶ درصد و ۹۳/۰۶ درصد می باشد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که مدل به میزان قابل توجهی معنادار می باشد و پارامترهای گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار تأثیر قابل توجهی بر روی زبری سطح دارند. همچنین، نوع ساینده ژل الماس بیشترین تأثیر را بر درصد بهبود زبری سطح داشته است.

با کاهش گپ کاری، زبری سطح افزایش می یابد. بهترین مقدار صافی سطح در گپ کاری ۲ میلی متر به دست آمده است و از این مقدار به بعد افزایش گپ کاری، صافی سطح کاهش می یابد. همچنین، با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا ۳۵۵ دور بر دقیقه، زبری سطح بهبود می یابد و از این مقدار به بعد صافی سطح کاهش می یابد.

زبری سطح به دست آمده با توجه به نوع، شکل، اندازه و سختی دانه ساینده و شرایط تجربی؛ گپ کاری ۲ میلی متر، سرعت دورانی قطعه کار ۳۵۵ دور بر دقیقه و استفاده از تزریق دوغاب ساینده اکسید آلومینیوم و کاربید سیلیسیم، ژل الماس به ترتیب به میزان ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد بهبود یافته است.

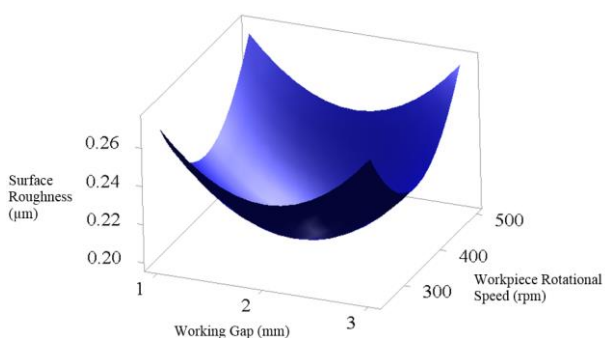
با توجه به آنالیز واریانس روش رویه پاسخ، مقادیر مشخصه های

دور بر دقیقه و استفاده از ژل الماس به عنوان ابزار ساینده به میزان ۰/۱۹۹۹ میکرومتر به دست آمده است. در حقیقت، زبری سطح تحت شرایط بهینه سازی شده به میزان ۵۲/۱۷ درصد بهبود یافته است. این نتایج، با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد (شماره آزمایش ۱۵ در جدول ۴). همچنین، بر اساس این شکل مشاهده می شود که درجه مطلوبیت نقطه به دست آمده ۱۰۰ درصد می باشد یعنی میزان مطلوبیت طرح برابر با ۱ برآورد شده است. بنابراین، می توان نقطه بهینه را به عنوان نقطه مورد قبول انتخاب کرد.

شکل های ۱۴ و ۱۵ نتایج بهینه سازی پارامترهای گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار بر زبری سطح با استفاده از روش رویه پاسخ را نشان می دهند. بر اساس این شکل ها مشاهده می شود که با کاهش گپ کاری، زبری سطح افزایش می یابد. بهترین مقدار صافی سطح در گپ کاری ۱/۹۸ میلی متر به دست آمده است. از این مقدار به بعد افزایش گپ کاری سبب کاهش صافی سطح می شود. همچنین، از شکل های ۱۴ و ۱۵ چنین استنباط می شود که با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا ۳۷۳/۳۷ دور بر دقیقه، زبری سطح کاهش می یابد اما با افزایش بیش از این مقدار زبری سطح افزایش می یابد.

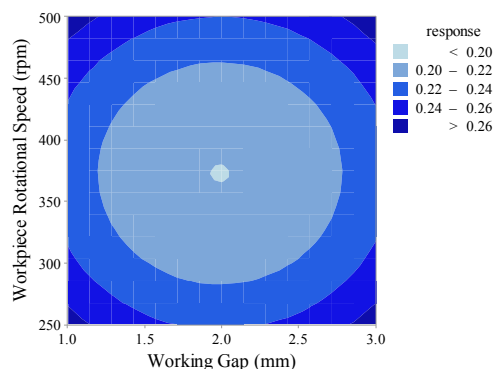
#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای گپ کاری، سرعت دورانی قطعه کار و نوع ساینده در فرآیند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی بر روی سطوح بیرونی قطعات استوانه ای از جنس فولاد زنگ نزن ۴۴۰ سی



شکل ۱۵: نمودار سه بعدی رویه پاسخ مربوط به تأثیر گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار بر زبری سطح

Fig. 15. 3D plot from the effect of working gap and work piece rotational speed on surface roughness



شکل ۱۴: نمودار دوبعدی رویه پاسخ مربوط به تأثیر گپ کاری و سرعت دورانی قطعه کار بر زبری سطح

Fig. 14. 2D contour plot from the effect of working gap and work piece rotational speed on surface roughness

- R. Chaudhari, H.-W. Hoffmeister, F. Kuster, Abrasive fine-finishing technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2(65) (2016) 597-620.
- [7] D.K. Singh, V. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process, *Journal of materials processing technology*, 149(1-3) (2004) 22-29.
- [8] B. Girma, S.S. Joshi, M. Raghuram, R. Balasubramaniam, An experimental analysis of magnetic abrasives finishing of plane surfaces, *Machining science and Technology*, 10(3) (2006) 323-340.
- [9] C.-T. Lin, L.-D. Yang, H.-M. Chow, Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(1-2) (2007) 122-130.
- [10] S. Kim, J. Kwak, Magnetic force improvement and parameter optimization for magnetic abrasive polishing of AZ31 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18 (2008) s369-s373.
- [11] R.S. Mulik, P.M. Pandey, Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5-8) (2011) 501-515.
- [12] P. Kala, P.M. Pandey, Comparison of finishing characteristics of two paramagnetic materials using double disc magnetic abrasive finishing, *Journal of Manufacturing processes*, 17 (2015) 63-77.
- [13] G.C. Verma, P. Kala, P.M. Pandey, Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5-8) (2017) 1657-1668.
- [14] K. Pandey, U. Pandey, P.M. Pandey, Statistical Modeling and Surface Texture Study of Polished Silicon Wafer Si مقدار-اف، مقدار-پی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده به ترتیب ۶/۴۷، ۰/۴۹، ۸۶/۶۲ درصد و ۷۳/۲۴ درصد می‌باشد. همچنین، بر اساس نمودار باقیمانده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت مدل پیش‌بینی به اندازه کافی مناسب می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ نشان می‌دهد که درصد بهبود زبری سطح به‌دست‌آمده تحت شرایط؛ گپ‌کاری ۱/۹۸ میلی‌متر، سرعت دورانی قطعه‌کار ۳۷۳/۷۳ دور بر دقیقه و استفاده از ژل الماس به‌عنوان ابزار ساینده به میزان ۵۲/۱۷ درصد افزایش یافته است. تصاویر میکروسکوپی بافت سطح نمونه‌ها، نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی جهت و شیارهای ناشی از فرآیند سنگ‌زنی را به‌طور قابل توجهی از بین برده است و همچنین یک سطح پرداخت فوق صیقل و یکنواختی به‌مانند یک آینه تا محدوده ۰/۲۰۷ میکرومتر به‌دست‌آمده است.
- ### منابع و مراجع
- [1] Y. Choopani, M. Razfar, P. Saraeian, M. Farahnakian, Experimental investigation of external surface finishing of AISI 440C stainless steel cylinders using the magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9-12) (2016) 1811-1821.
- [2] S. Abraham, Method of polishing wire-drawing dies and apparatus therefor, in, Google Patents, 1929.
- [3] H.P. Coats, Method of and apparatus for polishing containers, in, Google Patents, 1940.
- [4] T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, Study on magnetic abrasive finishing (1st report-on process principle and a few finishing characteristics), *J. of JSPE*, 52(5) (1986) 851-857. (In Japanese).
- [5] M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura, R. Komanduri, Magnetic abrasive finishing of rollers, *CIRP annals*, 43(1) (1994) 181-184.
- [6] F. Hashimoto, H. Yamaguchi, P. Krajnik, K. Wegener,



- machining process, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 23(1) (1989) 37-41.
- [18] V. Alimirzaloo, V. Modanloo, M.K. Takanlou, Modeling and optimization of the machining parameters effects on the tool wear and surface roughness by the response surface and desirability function method, Modares Mechanical Engineering, 15(20) (2016) 192-197.(In persian).
- [19] A. Heidarzadeh, R.T. Mousavian, R.A. Khosroshahi, Y.A. Afkham, H. Pouraliakbar, Empirical model to predict mass gain of cobalt electroless deposition on ceramic particles using response surface methodology, Rare Metals, 36(3) (2017) 209-219.
- (100) using Chemically Assisted Double Disk Magnetic Abrasive Finishing, Silicon, (2018) 1-19.
- [15] V.K. Jain, K.K. Saren, V. Raghuram, M.R. Sankar, Force analysis of magnetic abrasive nano-finishing of magnetic and non-magnetic materials, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 100(5-8) (2019) 1137-1147.
- [16] V. Kumar, R. Sharma, K. Dhakar, Y.K. Singla, K. Verma, Experimental evaluation of magnetic abrasive finishing process with diamond abrasive, International Journal of Materials and Product Technology, 58(1) (2019) 55-70.
- [17] T. Shinmura, T. Aizawa, Study on internal finishing of a non-ferromagnetic tubing by magnetic abrasive

