

پرداخت نانومتری سطوح لنزهای کروی به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی

مهرداد وحدتی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

سید عادل عاملی کلخوران

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

پرداخت سطوح به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی، یک روش ماشین کاری غیر سنتی یا نوین می باشد. اصول انجام این روش، بر رفتار مغناطیسی- هیدرودینامیکی سیال مغناطیسی بنا شده است. مهم ترین قطعاتی که به وسیله این روش تحت فرآیند پرداخت سطح قرار می گیرند، ساچمه های سرامیکی و لنزهای اپتیکی با کاربردهای نظامی هستند که باید تاحد امکان، کیفیت سطح بالایی داشته باشند. هدف این مقاله، مطالعه پرداخت سطوح لنزهای کروی به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی و بررسی عوامل موثر بر عملکرد آن، جهت بهینه نمودن فرآیند است. توسط این روش، می توان سطوحی با صافی سطح تا ۱۴ نانومتر ایجاد کرد که در ماشین کاری های سنتی، چنین دقتی قابل حصول نیست. در این پژوهش، دستگاهی به منظور پرداخت سطوح لنزهای کروی طراحی و ساخته شد و میزان اختلاط ذرات ساینده در سیال مغناطیسی، اندازه ذرات ساینده، سرعت دوران کله گی و زمان انجام ماشین کاری، بصورت تجربی و آماری مورد مطالعه قرار گرفته و اثر آن ها بر روی فرآیند بررسی شد. نتایج آماری نشان داد که افزایش صافی سطح با سرعت دوران ابزار همزن، ارتباط مستقیم دارد. همچنین افزایش میزان اختلاط ذرات ساینده با ذرات فرومغناطیس، سبب افزایش حداقل ۱۰ درصدی کیفیت سطح می گردد. در این پژوهش، صافی سطح بهبود می یابد. در انتها، پارامترهای مؤثر و معادله رگرسیون حاکم بر فرآیند استخراج گردید.

واژه های کلیدی: پرداخت نانومتری، ماشین کاری سایشی، سیال مغناطیسی، صافی سطح، لنزهای اپتیکی.

Nano-metric Polishing of Optical Lenses by Magnetic Float Polishing (MFP)

M. Vahdati

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

S. A. Ameli Kalkhoran

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Polishing of surfaces by Magnetic Float Polishing, is a non-traditional method of machining. This article aims to study polishing of spherical lenses by magnetic float polishing (MFP). Principle of this method is based on magneto- hydrodynamic behavior of magnetic fluid. Optical lenses which are used in military industry are the most important parts polished by MFP. Because of the Military Binoculars and military camera in the Drones it's important that optical lenses used in them, should have a high level of roughness possible. By this method, it is possible to polish such surfaces up to nanometer scales, which traditional methods can not satisfy such precision. Amount of mixing the abrasives in a magnetic fluid, abrasives size, spindle speed and process time are studied in this investigation. At this study, a device was designed and manufactured and transparency and the roughness obtained are two features of the process that has been studied. After designing and applying of MFP, the experiments carried out on it and its results have been analyzed. Finally, after analyzing and optimizing the factors in MFP process experimentally and statistically, a roughness of $R_z = 14\text{nm}$ has been obtained and it's found that by increasing of the spindle speed and amount of mixing the abrasives in a magnetic fluid and abrasives size, the roughness will be improved at least 10 percent. By Using the MFP for spherical lenses, polishing process is not related to their core radius and it makes the cost savings and speed to be paid. Effective parameters and the regression equations governing the process are also determined.

Keywords: Nano-metric Polishing, Abrasive Machining, Magnetic Fluid, Roughness, Optical Lenses.

۱- مقدمه

پرداخت به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی^۱ می باشد. در این فرآیند، عواملی چون جنس، اندازه و میزان ترکیب ذرات ساینده در سیال مغناطیسی، زمان انجام فرآیند، فاصله از میدان مغناطیسی و سرعت دوران کله گی، مورد مطالعه قرار می گیرند [۳].

خود تیز شوندگی، تطابق بسیار بالا، افزایش بسیار ناچیز دما در طی فرآیند نسبت به سایر روش های مشابه، کنترل مناسب بر میزان نیروهای وارده بر ذرات و عدم ایجاد میکرو ترک های سطحی، از جمله مزایایی است که باعث رشد به کارگیری این فرآیند شده است [۴].

لنزهای اپتیکی در صنایع مختلفی از جمله دوربین های عکاسی، دوربین پهبادها، دوربین رادارها، تلسکوپ ها، میکروسکوپ ها و عینک های طبی کاربرد فراوان دارد. از آخرین فرآیندهایی که بر روی قطعه کار صورت می گیرد، پرداخت کاری است. این فرآیند تأثیر چشم گیری بر کارایی و طول عمر محصول دارد. همچنین، رابطه بسیار نزدیکی مابین دقت ماشین کاری، زبری سطح و طول عمر محصولات وجود دارد [۱]. روش های پرداخت سنتی قادر به تولید سطحی با ویژگی های مورد نیاز نانو تکنولوژی نیستند. بنابراین روش های پرداخت دقیق، در بالاترین سطح از اهمیت قرار می گیرند [۲]. یکی از روش های نوین ماشین کاری،

¹ Magnetic Float Polishing
*Vahdati@kntu.ac.ir

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vahdati@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۳۹

همچنین از آنجا که لایه‌های انجماد مجدد^۱ ناشی از فرآیندهای تخلیه الکتریکی مکان بسیار مناسبی جهت ایجاد و رشد میکرو ترک‌ها می‌باشد، که با این روش می‌توان به سادگی این لایه را از سطوح قطعه‌کار حذف کرد. لازم به ذکر است، با توجه به نیروی بسیار کم وارده بر ذره ساینده (در حدود میکرو نیوتن و کمتر)، میزان عمق نفوذ ذره ساینده در حدود ۱ میکرومتر و کمتر می‌باشد، در نتیجه فرآیند مذکور، رواداری ابعادی و هندسی قطعه کار را دچار تغییر نمی‌کند[۵].

جیانگ و کوماندوری[۳] از روش پرداخت به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی برای پرداخت قطعات نیتريد سيليكون استفاده کردند. جيانگ، وود و کوماندوری[۶] به بررسی اثر جنس ذرات - ساینده مختلف در فرآیند پرداخت مکانیکی - شیمیایی پرداختند. مینگ جیانگ[۷] پژوهشی تحت عنوان پرداخت ساچمه‌های سرامیکی برای کاربرد در بلبرینگ پیشرفته، به وسیله فرآیند پرداخت سطوح توسط ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی شامل پرداخت شیمیایی - مکانیکی انجام داده است. چیلدز و همکارانش[۸] به مطالعه روی هزینه و استهلاک در روش پرداخت به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی پرداختند. یوان و همکارانش[۹] در مقاله‌ای به بررسی اثر ذرات ساینده مختلف روی پرداخت شیمیایی - مکانیکی ساچمه‌های سيليكون نيتريد پرداخته‌اند. ژانگ وناکاجیما[۱۰] با تحلیلی دینامیکی، اهمیت کروی بودن ساچمه‌های سيليكون نيتريد، که جهت استفاده در بیرینگ‌های فوق دقیق کاربرد دارند را به تفصیل بیان و این نکته را خاطر نشان کرده‌اند که با کمک فرآیند پرداخت به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی چگونه می‌توان کروییت ساچمه‌ها را ارتقا بخشید. لی، هوانگ و چپو[۱۱]، برای روش پرداخت سطوح توسط ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی آنالیز دینامیکی جدیدی ارائه کردند که مبتنی بر سرعت و نیرو است. هدف آنها رسیدن به صافی سطح یکنواخت و انجام فرآیند روی سطح ساچمه‌ها به صورت یکنواخت است. ماهالیک [۱۲] در کتابی با عنوان نانوتکنولوژی و تولید در مقیاس نانو، به معرفی انواع روش‌های ساخت که با مقیاس میکرو و نانو سر و کار دارند، پرداخته است. پشم‌فروش و رحیمی توسط روش پرداخت کاری سایشی - مغناطیسی^۲ به پرداخت شیشه‌های اپتیکی پرداختند. آنها پروفیل نهائی سطح را بر مبنای مکانیزم برداشت ماده و مقادیر عمق براده‌برداری مربوطه بدست آوردند[۱۳]. جین و همکاران جهت درک بهتر مکانیزم پرداخت توسط ماشین کاری سایشی - مغناطیسی، آزمایش‌هایی بر روی قطعه‌کارهایی از جنس شیشه پایه سیلیسی انجام دادند. آنها مکانیزمی عمومی برای برداشت ماده در این قبیل ماشین‌کاری‌ها پیشنهاد دادند[۱۴].

هدف این پژوهش، رسیدن به صافی سطح یکنواخت در حدود ۱۰۰ نانومتر و انجام فرآیند پرداخت به وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی، روی سطح لنزهای اپتیکی از جنس شیشه پایه سیلیسی است که کاربرد آن در دوربین‌های دید در شب نظامی، میکروسکوپ‌ها، دوربین‌های دیجیتالی عکس‌برداری و فیلم‌برداری و همچنین لنزهای قابل تعویض تجهیزات اپتیکی می‌باشد.

در این پژوهش یک دستگاه پرداخت کاری با سیال مغناطیسی طراحی و ساخته شده است؛ که در آن لنزهای اپتیکی بصورت شناور و

بدون اتصال به اسپیندل در درون محفظه‌ای با دوغاب ذرات ساینده قرار گرفته‌اند. این مکانیزم در مجاورت یک میدان مغناطیسی، سبب پرداخت دقیق سطح قطعه‌کار می‌گردد. در انجام آزمایش‌ها، از روش طراحی آزمایش‌ها بصورت فاکتوریل کامل استفاده شده است. جنس ذرات ساینده، میزان اختلاط ذرات ساینده با ذرات کربونیل آهن، سرعت دوران کلاگی و همچنین مدت زمان انجام آزمایش‌ها، پارامترهای در نظر گرفته شده در این مقاله بوده‌اند. سطوح پرداخت‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید و معادله رگرسیون با استفاده از تحلیل آماری بدست آمد.

۲- نحوه عملکرد فرآیند پرداخت سطوح به وسیله

ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی

در فرآیند مورد بحث، میدان مغناطیسی و ذرات ساینده، مهم‌ترین نقش را در پرداخت سطوح ایفا می‌کنند. سیال مغناطیسی، مخلوطی از سیال و ذرات ریز مغناطیسی است. به علت ابعاد کوچک این ذرات، یک سوسپانسیون کلوئیدی^۳ تشکیل می‌شود. این کلوئید، بصورت مخلوط نبوده و از نظر خصوصیات به محلول نزدیک‌تر است؛ لذا از ته‌نشین شدن ذرات ساینده در سیال جلوگیری می‌کند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، وقتی سیال مغناطیسی در مجاورت یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات مغناطیسی به سمت میدان مغناطیسی قویتر متمایل شده و حرکت می‌کند. این موضوع سبب وارد شدن نیرویی در خلاف جهت، به ذرات ساینده می‌شود.

ذرات ساینده یکی دیگر از اجزایی هستند که در فرآیند پرداخت به - وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی نقش مهمی را ایفا می - کنند. ذرات ساینده با اندازه‌های مختلفی می‌توانند در این فرآیند بکار برده شوند. هر کدام از آن‌ها، از نظر خصوصیات فیزیکی، ویژگی مخصوص خود را دارند. اکسید آلومینیوم^۴، اکسید زیرکونیوم^۵، اکسید کروم^۶، اکسید مس^۷، اکسید آهن^۸، کاربید سیلیسیم^۹، اکسید سیلیسیم^{۱۰}، اکسید استرانسیوم^{۱۱}، کاربید بور^{۱۲} از جمله موادی می‌باشند که به عنوان ذرات ساینده در این فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

نکته‌ای که در مورد ذرات ساینده حائز اهمیت است، دانه‌بندی یا اندازه قطر آن‌ها می‌باشد. هر چه قطر ذرات ساینده بزرگتر باشد، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد و هر چه قطر ذرات کمتر باشد، صافی سطح مناسب‌تری حاصل می‌شود. معمولاً برای پرداخت سطوح، این کار در چند مرحله انجام می‌شود. به قسمی که در مراحل اولیه از ذرات ساینده بزرگتر برای خشن کاری استفاده می‌شود و به تدریج، برای نیمه‌پرداخت - کاری و پرداخت نهائی، قطر ذرات کمتر می‌شود[۲].

در فرآیند پرداخت سطوح بوسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی، هنگامی که سیال مغناطیسی در مجاورت میدان مغناطیسی

³ colloid

⁴ Al₂O₃

⁵ ZrO₂

⁶ Cr₂O₃

⁷ Cu₂O

⁸ Fe₂O₃

⁹ SiC

¹⁰ SiO₂

¹¹ SrO₂

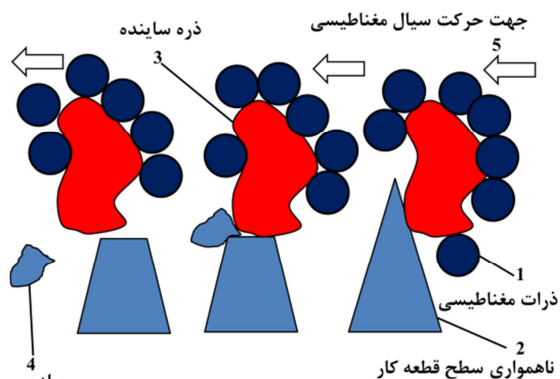
¹² B₄C

¹ recast layer

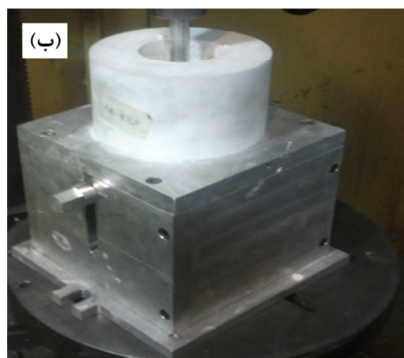
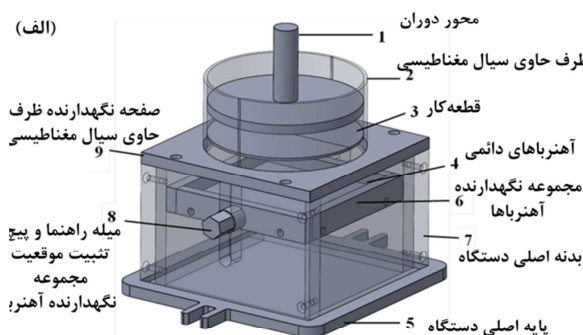
² Magnetic Abrasive Finishing (MAF)

۳- دستگاه طراحی شده در پرداخت سطوح لنزهای اپتیکی

به منظور پرداخت سطوح لنزهای اپتیکی با استفاده از ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی، دستگاهی طراحی و ساخته شد. شکل ۴ (الف)، تصویر CAD و قسمت (ب) این تصویر، دستگاه را در حالت انجام آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۳- مراحل براده برداری در فرآیند پرداخت سطوح به وسیله سیال مغناطیسی ۱- ذرات مغناطیسی ۲- ناهمواری سطح قطعه کار ۳- ذره ساینده ۴- براده ۵- جهت حرکت سیال مغناطیسی

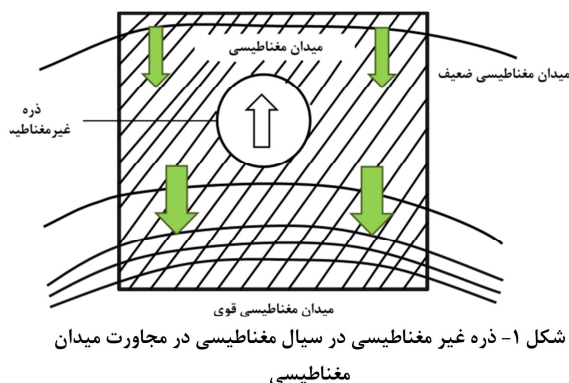


شکل ۴- (الف) فایل CAD دستگاه طراحی و ساخته شده برای پرداخت سطوح لنزهای اپتیکی، (ب) نمایی از دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایشات تجربی

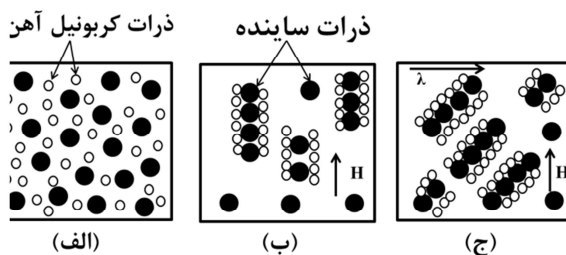
ایجاد شده توسط آهنربای دائم قرار می‌گیرد، ذرات مغناطیسی، تشکیل زنجیره‌هایی می‌دهند. در این بین، ذرات ساینده مابین ذرات مغناطیسی قرار می‌گیرند. با حرکت خطی و دورانی قطعه کار و سیال، این ذرات با سطح مورد نظر جهت پرداخت برخورد می‌کنند و بدین طریق براده برداری صورت می‌گیرد.

در شکل ۲ نحوه قرارگیری ذرات مغناطیسی و ذرات ساینده در سیال مغناطیسی نشان داده شده است. در قسمت (الف)، ذرات مغناطیسی و ذرات ساینده، بدون حضور میدان مغناطیسی ملاحظه می‌شوند. در قسمت (ب)، سیال مغناطیسی در مجاورت میدان مغناطیسی عمودی قرار گرفته است. همانطور که پیشتر نیز گفته شد، ذرات مغناطیسی تشکیل زنجیره‌هایی را می‌دهند و ذرات ساینده را بدین طریق احاطه می‌کنند. در قسمت (ج)، نیز زنجیره‌های تشکیل یافته در اثر میدان مغناطیسی، تحت تنش برشی افقی نشان داده شده است.

شکل ۳ مراحل براده برداری در فرآیند پرداخت سطوح به وسیله سیال مغناطیسی را نشان می‌دهد. در این شکل، ذرات مغناطیسی با شماره ۱ نشان داده شده که تحت میدان مغناطیسی، ذره ساینده را احاطه کرده است. ناهمواری سطح قطعه کار با شماره ۲ نشان داده شده است. در این شکل، جهت حرکت سیال مغناطیسی از راست به چپ می‌باشد و نهایتاً، پس از برخورد ذره ساینده به ناهمواری سطح قطعه کار، در صورت کافی بودن نیروی برخورد، براده برداری صورت می‌گیرد که در شکل، براده با شماره ۴ نشان داده شده است [۱۲].



شکل ۱- ذره غیر مغناطیسی در سیال مغناطیسی در مجاورت میدان مغناطیسی



شکل ۲- مخلوط سیال مغناطیسی. (الف) بدون حضور میدان مغناطیسی (ب) با حضور میدان مغناطیسی عمودی (ج) با حضور میدان مغناطیسی عمودی و تنش افقی به سیال [۷]

در این شکل، محور دوران با شماره ۱، ظرف حاوی سیال مغناطیسی با شماره ۲، قطعه کار با شماره ۳، آهنرباهای دائمی با شماره ۴، پایه اصلی دستگاه با شماره ۵، مجموعه نگهدارنده آهنرباها با شماره ۶، بدنه اصلی دستگاه با شماره ۷، میله راهنما و پیچ تثبیت موقعیت مجموعه نگهدارنده آهنربا با شماره ۸ و صفحه نگهدارنده ظرف حاوی سیال مغناطیسی با شماره ۹ نشان داده شده است.

۴- طراحی آزمایش‌ها

پارامترهای مبنا که می‌توانند در انجام فرآیند موثر باشند، عبارتند از: ۱- جنس ذرات ساینده ۲- سرعت دوران کله‌گی ۳- غلظت سیال مغناطیسی ۴- مقدار ذرات ساینده ۵- زمان انجام فرآیند. در آزمایش‌های صورت پذیرفته برای هر کدام از پارامترهای ذکر شده سطوحی در نظر گرفته می‌شود که در جدول ۱ نشان داده شده است. ۵ نوع ذره ساینده، ۳ سطح سرعت دوران کله‌گی، ۲ سطح مقدار ترکیب ذرات ساینده در سیال مغناطیسی و ۳ سطح زمان انجام فرآیند پیش‌بینی شده است.

ذرات ساینده، نانو کاربید سیلیسیم، نانو اکسید سیلیسیم، نانو اکسید استرانسیوم، نانو اکسید زیرکونیوم، نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد. اندازه ذرات ساینده بین ۱۰ تا ۳۵ نانومتر می‌باشد. سرعت دوران کله‌گی ۱۷۵۰ و ۲۲۰۰ و ۳۶۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده است. سیال مغناطیسی مورد استفاده نیز نوعی نانو کلئید آهن در آب می‌باشد که با روش انفجار الکتریکی سیم نازک در محیط سیال تولید شده است. این سیال با غلظت ۱۵۰۰ ppm تهیه و در آزمایش‌ها به کار گرفته شده است.

۵- نحوه انجام آزمایش‌ها

ابتدا لنز را در کف ظرف قرار داده و سطح مورد نظر به سمت میز دستگاه قرار می‌گیرد. جنس، مقدار ذرات ساینده و غلظت سیال با توجه به طراحی آزمایش‌ها معین می‌شود.

جدول ۱- پارامترهای موثر در فرآیند با سطوح در نظر گرفته شده

فاکتورهای بررسی شده					سطوح مورد بررسی
اختلاط ذرات ساینده (گرم/لیتر)					50 100
جنس ذرات ساینده					ZrO ₂ SiC SrO ₂ Al ₂ O ₃ SiO ₂
سرعت دوران کله-گی (rpm)					3600 2200 1750
زمان ماشین‌کاری (min)					75 60 45

به این‌صورت که پس از انجام آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار Minitab، سطوح بهینه انتخاب می‌شوند. در تمام آزمایش‌ها مقدار سیال ۴۰ سی‌سی است. اکنون با دوران محور دریل ستونی، محور دوران دستگاه پرداخت به‌وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی نیز شروع به دوران می‌نماید و سیال را به چرخش در می‌آورد. جنس ذرات ساینده، میزان اختلاط ذرات ساینده در سیال مغناطیسی، سرعت دوران کله‌گی و مدت زمان انجام فرآیند فاکتورهایی هستند که مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای انجام این آزمایش‌ها از روش‌های طراحی آزمایش^۱ استفاده شده است. طراحی که برای این پروژه در نظر گرفته شده، روش طراحی فاکتوریال کامل است.

در این پژوهش، طراحی آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار Minitab صورت گرفت. همچنین، برای جلوگیری از عوامل نامطلوب محیطی، آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شد.

۶- روش اندازه‌گیری

هدف از انجام فرآیند پرداخت سطوح به‌وسیله ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی، رسیدن به صافی سطح هر چه بهتر برای لنزهای اپتیکی است. هرچه کیفیت سطح لنزها افزایش یابد جهت کاربردهای صنعتی مناسب‌تر خواهد بود و شفافیت تصاویر حاصل از آن را افزایش می‌دهد.

اندازه‌گیری صافی سطح لنزهای اپتیکی به جهت فرم آن‌ها کمی مشکل است. ابتدا باید با استفاده از خمیرهای مخصوصی که جهت تثبیت قطعه کار، روی میز دستگاه اندازه‌گیری استفاده می‌شود، لنز روی میز تثبیت گردد. سپس، طولی برای اندازه‌گیری صافی سطح برای دستگاه مشخص می‌شود. در اینجا، از زبری‌سنج تماسی مدل Hommel Wave Tester بر روی مسیری به طول ۰/۸ میلی‌متر و بر اساس استاندارد ISO 11562(M1) استفاده شده است. سرعت حرکت سوزن زبری‌سنج روی سطح قطعه کار، برابر با ۰/۵ میلی‌متر در ثانیه تعیین گردید. زبری اولیه لنزهای مورد آزمایش، قبل از این فرآیند پرداخت-کاری بطور میانگین برابر با ۳۲۰ نانومتر بود.

در این پژوهش، با توجه به سطوح تعیین شده در جدول ۱ برای اختلاط ذرات ساینده، جنس ذرات ساینده، سرعت دوران کله‌گی و زمان ماشین‌کاری، مجموعاً ۹۰ آزمایش تجربی انجام یافت که نتایج حاصل در جدول ۲ جهت مقایسه آورده شده است. شایان ذکر است، جهت پیشگیری از خطاهای سیستماتیک، آزمایش‌های بصورت تصادفی انجام شده‌اند، که در جدول ۲ فقط به چیدمان استاندارد آنها اشاره شده است.

۷- نتایج و تحلیل آن‌ها

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که با افزایش زمان ماشین‌کاری از ۴۵ به ۶۰ دقیقه، صافی سطح بهبود می‌یابد، ولی این روند از ۶۰ به ۷۵ دقیقه بهبود قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نمی‌دهد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، فرآیند در ۶۰ دقیقه، تقریباً کامل شده است. از طرف دیگر، با افزایش اختلاط ذرات ساینده از ۵۰ به ۱۰۰ گرم در لیتر و همچنین سرعت دوران کله‌گی از ۱۷۵۰ به ۳۶۰۰ دور در دقیقه، صافی سطح بهبود یافته است.

آنالیز واریانس حاصل از این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Minitab در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که از این جدول پیداست، میزان غلظت ذرات ساینده، جنس ذرات ساینده، سرعت دوران کله‌گی و زمان انجام فرآیند در صافی سطح نهائی تاثیر دارند و همچنین این فاکتورها به صورت دو به دو فاقد تعامل اثر می‌باشند. بنابراین، با حذف پارامترهای غیرموثر، آنالیز واریانس، مجدداً انجام گردید و معادله رگرسیون به صورت معادله ۱ حاصل شد:

¹ Design of Experiment

26	100	45	1750	SiC	58
24	100	60	1750	SiC	59
23	100	75	1750	SiC	60
19	100	45	2200	SrO ₂	61
17	100	60	2200	SrO ₂	62
16	100	75	2200	SrO ₂	63
28	100	45	2200	ZrO ₂	64
26	100	60	2200	ZrO ₂	65
25	100	75	2200	ZrO ₂	66
29	100	45	2200	SiO ₂	67
27	100	60	2200	SiO ₂	68
26	100	75	2200	SiO ₂	69
31	100	45	2200	Al ₂ O ₃	70
29	100	60	2200	Al ₂ O ₃	71
28	100	75	2200	Al ₂ O ₃	72
25	100	45	2200	SiC	73
23	100	60	2200	SiC	74
23	100	75	2200	SiC	75
16	100	45	3600	SrO ₂	76
14	100	60	3600	SrO ₂	77
14	100	75	3600	SrO ₂	78
25	100	45	3600	ZrO ₂	79
23	100	60	3600	ZrO ₂	80
23	100	75	3600	ZrO ₂	81
28	100	45	3600	SiO ₂	82
26	100	60	3600	SiO ₂	83
24	100	75	3600	SiO ₂	84
30	100	45	3600	Al ₂ O ₃	85
28	100	60	3600	Al ₂ O ₃	86
28	100	75	3600	Al ₂ O ₃	87
24	100	45	3600	SiC	88
22	100	60	3600	SiC	89
22	100	75	3600	SiC	90

شکل ۵ (الف) میزان اختلاط ذرات ساینده در برابر صافی سطح را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، با افزایش غلظت ذرات ساینده، میانگین صافی سطح بهبود می‌یابد. تحت این شرایط، ذرات ساینده بیشتری شانس برخورد با سطح قطعه کار و در نتیجه براده‌برداری از آن را خواهند داشت.

شکل ۵ (ب) سرعت اسپیندل در برابر صافی سطح را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، با افزایش سرعت دوران اسپیندل، صافی سطح بهبود می‌یابد. در اینجا نیز در سرعت‌های بالاتر تعداد بیشتری از ذرات ساینده در واحد زمان با سطح قطعه کار برخورد کرده و براده‌برداری می‌کنند.

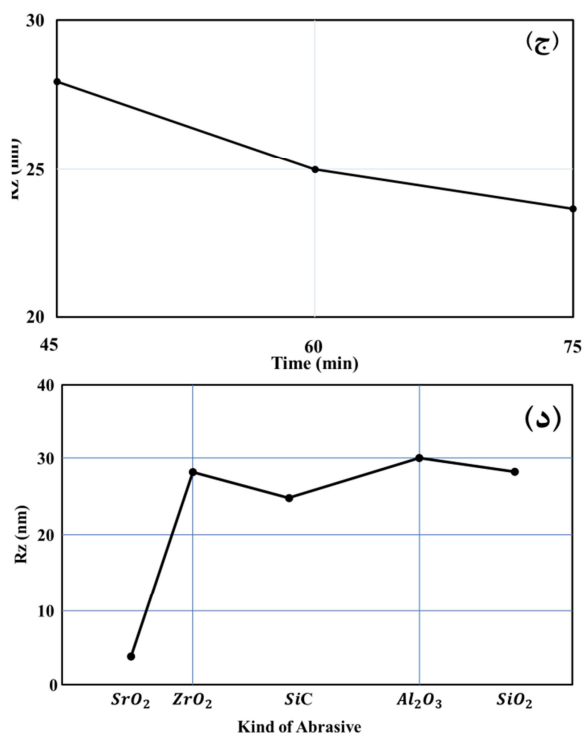
شکل ۵ (ج) صافی سطح را در برابر زمان انجام فرآیند نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، با افزایش زمان فرآیند از ۴۵ به ۶۰ دقیقه، صافی سطح بهبود می‌یابد، ولی با افزایش زمان از ۶۰ به ۷۵ دقیقه، تاثیر محسوسی در روند بهبود صافی سطح به جا نمی‌گذارد که این بدان معناست، فرآیند در ۶۰ دقیقه پایان می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند فرسوده شدن ذرات ساینده طی این مدت باشد، چون ذرات ساینده با یکدیگر نیز برخورد داشته و با گذشت زمان اندازه آن‌ها کوچک‌تر شده، در پرداخت سطح نمی‌توانند تاثیرگذار باشند.

پارامتر جنس ذرات ساینده (فاکتور B در جدول ۳) بیشترین تاثیر را بر صافی سطح به دست آمده دارد که به دلیل کوچک‌تر بودن P-value این فاکتور در آنالیز واریانس نسبت به سایر پارامترها می‌باشد. ابعاد ذرات ساینده در محدوده ۵۰-۲۰ نانومتر بودند؛ که کمترین آن مربوط به SrO₂ می‌باشد. این موضوع سبب کاهش نرخ براده‌برداری می‌گردد. از طرف دیگر، این ماده ساینده دارای کمترین سختی (۹۵ HRB) نیز می‌باشد. لذا در حین ماشین‌کاری آسیب کمتری بر سطح وارد می‌آید. این دو موضوع سبب نیل به بهترین صافی سطح در این شرایط می‌گردد. علاوه بر این، بزرگترین ابعاد ذرات ساینده در این تحقیق مربوط به Al₂O₃ می‌باشد. با توجه به بیشتر شدن نرخ براده‌برداری در این

$$\text{Roughness} = 34 - 2.07A + 0.256B - 1.70C - 1.22D \quad (۱)$$

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی برای زبری

شماره	جنس ذرات ساینده	سرعت دوران کله-گی (rpm)	زمان ماشین-کاری (min)	اختلاط ذرات ساینده (گرم / لیتر)	کیفیت سطح (nm)
1	SrO ₂	1750	45	50	22
2	SrO ₂	1750	60	50	20
3	SrO ₂	1750	75	50	20
4	ZrO ₂	1750	45	50	34
5	ZrO ₂	1750	60	50	32
6	ZrO ₂	1750	75	50	31
7	SiO ₂	1750	45	50	32
8	SiO ₂	1750	60	50	30
9	SiO ₂	1750	75	50	30
10	Al ₂ O ₃	1750	45	50	34
11	Al ₂ O ₃	1750	60	50	32
12	Al ₂ O ₃	1750	75	50	32
13	SiC	1750	45	50	28
14	SiC	1750	60	50	26
15	SiC	1750	75	50	26
16	SrO ₂	2200	45	50	21
17	SrO ₂	2200	60	50	19
18	SrO ₂	2200	75	50	18
19	ZrO ₂	2200	45	50	30
20	ZrO ₂	2200	60	50	28
21	ZrO ₂	2200	75	50	28
22	SiO ₂	2200	45	50	31
23	SiO ₂	2200	60	50	29
24	SiO ₂	2200	75	50	27
25	Al ₂ O ₃	2200	45	50	33
26	Al ₂ O ₃	2200	60	50	31
27	Al ₂ O ₃	2200	75	50	31
28	SiC	2200	45	50	27
29	SiC	2200	60	50	25
30	SiC	2200	75	50	25
31	SrO ₂	3600	45	50	18
32	SrO ₂	3600	60	50	16
33	SrO ₂	3600	75	50	16
34	ZrO ₂	3600	45	50	27
35	ZrO ₂	3600	60	50	25
36	ZrO ₂	3600	75	50	25
37	SrO ₂	3600	45	50	30
38	SrO ₂	3600	60	50	28
39	SiO ₂	3600	75	50	28
40	Al ₂ O ₃	3600	45	50	32
41	Al ₂ O ₃	3600	60	50	30
42	Al ₂ O ₃	3600	75	50	30
43	SiC	3600	45	50	26
44	SiC	3600	60	50	24
45	SiC	3600	75	50	23
46	SrO ₂	1750	45	100	20
47	SrO ₂	1750	60	100	18
48	SrO ₂	1750	75	100	18
49	ZrO ₂	1750	45	100	32
50	ZrO ₂	1750	60	100	30
51	ZrO ₂	1750	75	100	30
52	SrO ₂	1750	45	100	30
53	SrO ₂	1750	60	100	28
54	SrO ₂	1750	75	100	28
55	Al ₂ O ₃	1750	45	100	32
56	Al ₂ O ₃	1750	60	100	30
57	Al ₂ O ₃	1750	75	100	29



شکل ۵- (الف) تاثیر میزان غلظت ذرات ساینده بر صافی سطح Rz. (ب) تاثیر سرعت دوران اسپیندل بر برابر صافی سطح، (ج) تاثیر زمان ماشین کاری بر صافی سطح Rz، (د) نمودار میانگین صافی سطح در برابر جنس ذرات ساینده

شکل ۷ (الف) سطح قطعه کار را قبل از پرداخت کاری نشان می‌دهد. این تصویر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل شده است. شکل ۷ (ب) سطح قطعه کار را بعد از پرداخت کاری نشان می‌دهد. این تصویر نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل شده است. در مقایسه با قسمت (الف) این شکل، ملاحظه می‌شود صافی سطح قطعه کار بطور محسوسی بهبود یافته است.

شکل ۸ نمودارهای حاصل از نرم افزار Minitab را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، آزمایش‌ها از روند خاصی پیروی نمی‌کنند. همچنین نمودار هیستوگرام، شبیه توزیع نرمال می‌باشد.

در شکل ۹ (الف) تاثیر ترکیب ذرات ساینده و سرعت دوران کله‌گی در کیفیت سطح با نمودار مشخص گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت دوران کله‌گی و افزایش غلظت ذرات ساینده در سیال مغناطیسی، کیفیت سطح افزایش می‌یابد این نتایج با نظریه فرآیند تطبیق دارد. در شکل ۹ (ب)، نمودار تاثیر سرعت دوران کله‌گی و زمان انجام فرآیند در کیفیت سطح نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش زمان انجام فرآیند و افزایش سرعت دوران کله‌گی، کیفیت سطح افزایش می‌یابد. شکل ۹ (ج) تاثیر سرعت دوران اسپیندل و زمان انجام فرآیند را بر صافی سطح نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل پیداست، با افزایش سرعت دوران اسپیندل و زمان انجام فرآیند، صافی سطح بهبود می‌یابد.

افزایش میزان ذرات ساینده در سیال مغناطیسی سبب افزایش کیفیت سطح لنزها می‌گردد. همه نتایج فوق از نظر تئوری و مطابقت با

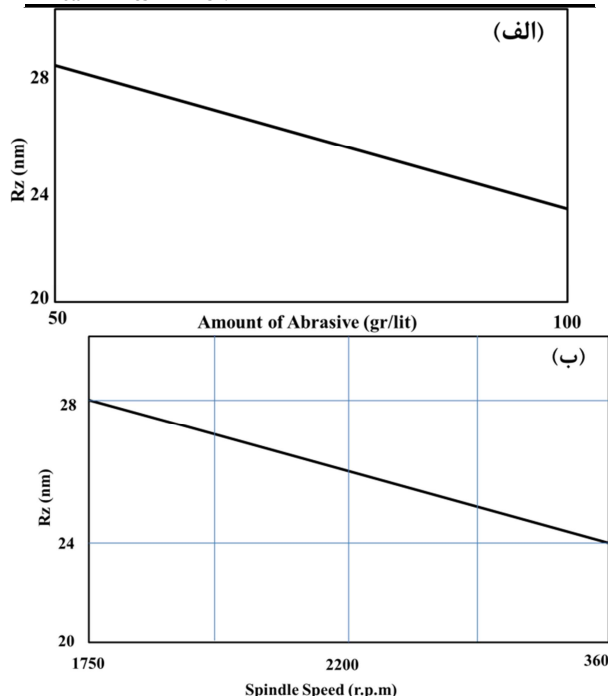
شرایط، می‌توان دلیل کیفیت کمتر سطح در این شرایط را توجیه نمود. با این استدلال، می‌توان از ذرات ساینده درشت‌تر در مرحله خشن کاری و از ذرات ساینده با اندازه کوچک‌تر در مراحل نیمه پرداخت و پرداخت استفاده کرد. این موضوع با نتایج مقاله یوآن مطابقت دارد [۹].

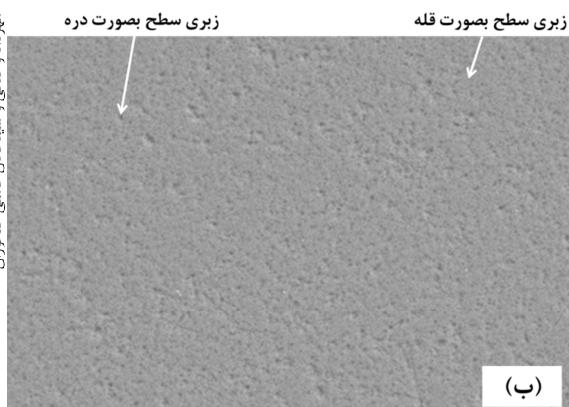
ابعاد ذرات ساینده در محدوده ۵۰-۲۰ نانومتر بودند؛ که کمترین آن مربوط به SrO₂ می‌باشد. این موضوع سبب کاهش نرخ براده برداری می‌گردد. از طرف دیگر، این ماده ساینده دارای کمترین سختی (۹۵ HRB) نیز می‌باشد. لذا در حین ماشین کاری آسیب کمتری بر سطح وارد می‌آید. این دو موضوع سبب نیل به بهترین صافی سطح در این شرایط می‌گردد (شکل ۵ د). علاوه بر این، بزرگترین ابعاد ذرات ساینده در این تحقیق مربوط به Al₂O₃ می‌باشد. با توجه به بیشتر شدن نرخ براده برداری تحت این شرایط، می‌توان دلیل کیفیت کمتر سطح در این حالت را توجیه نمود. با این استدلال، می‌توان از ذرات ساینده درشت‌تر در مرحله خشن کاری و از ذرات ساینده با اندازه کوچک‌تر در مراحل نیمه پرداخت و پرداخت استفاده کرد.

شکل ۶ قطعه کار را قبل و بعد پرداخت کاری نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، بعد از پولیش کاری، صافی سطح بهبود یافته است.

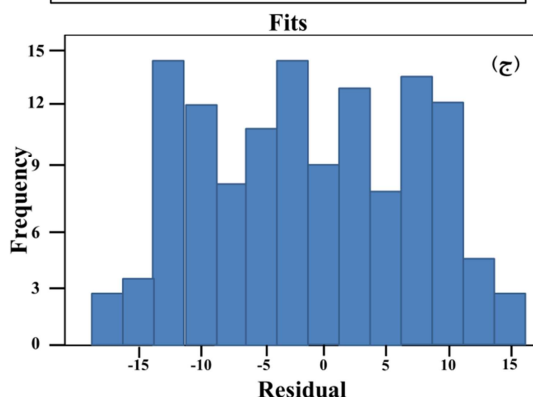
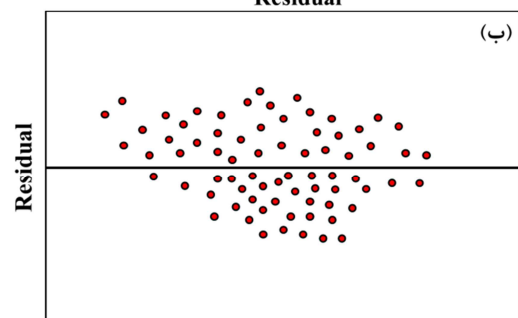
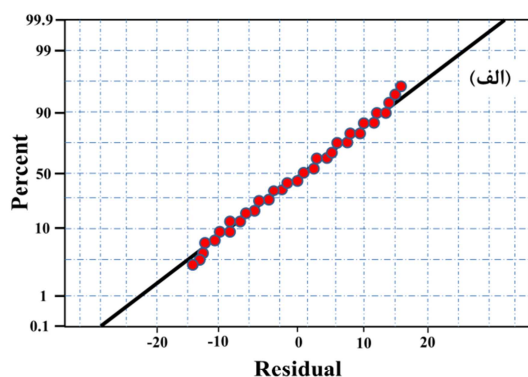
جدول ۳- آنالیز واریانس با استفاده از نرم‌افزار Minitab

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	96.10	88.10	88.10	5.08	0.028
B	3	768.15	768.15	256.05	14.76	0.000
C	2	173.42	164.15	82.08	4.73	0.013
D	2	101.09	90.48	45.24	2.61	0.082
A*B	3	0.15	0.15	0.05	0.00	1.000
A*C	2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.000
A*D	2	0.20	0.20	0.10	0.01	0.994
B*C	6	50.63	50.63	8.44	0.49	0.816
B*D	6	0.30	0.30	0.05	0.00	1.000
C*D	4	0.71	0.71	0.18	0.01	1.000
Error	58	1006.37	1006.37	17.35		
Total	89	2197.12				





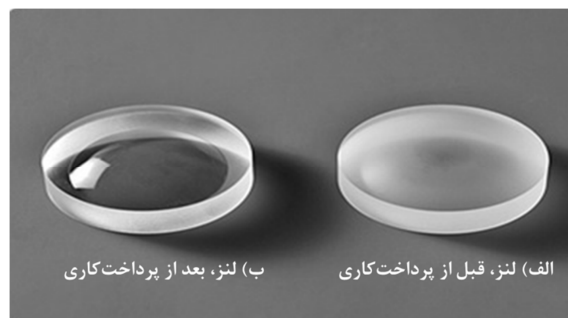
شکل ۷- (الف) تصویر قطعه کار قبل از پرداخت سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی. (ب) تصویر قطعه کار پس از پرداخت، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی



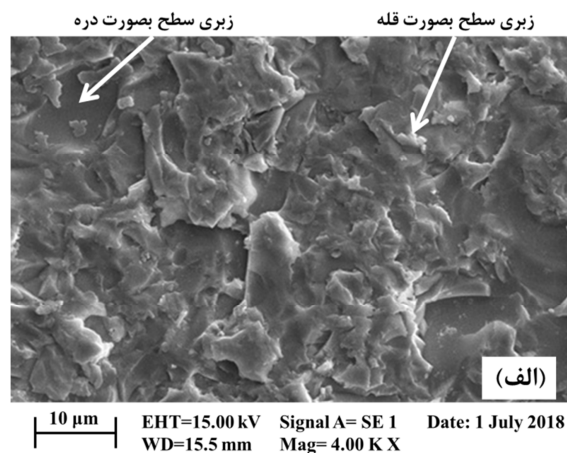
سایر مقاله‌های مربوط به موضوع فرآیند پرداخت سطح با کمک ذرات شناور در سیال مغناطیسی، منطقی و قابل اعتماد است [۳،۶]. پارامتر زمان انجام فرآیند، بعد از زمان ۶۰ دقیقه، تقریباً تاثیری در کیفیت سطح نمی‌گذارد. و با توجه به آزمایش‌های انجام شده این نکته نیز حائز اهمیت است که قبل از ۳۰ دقیقه هنوز فرآیند به طور کامل انجام نگرفته است و قطعات به علت عدم شفافیت کامل، با بازدید چشمی رد می‌شدند.

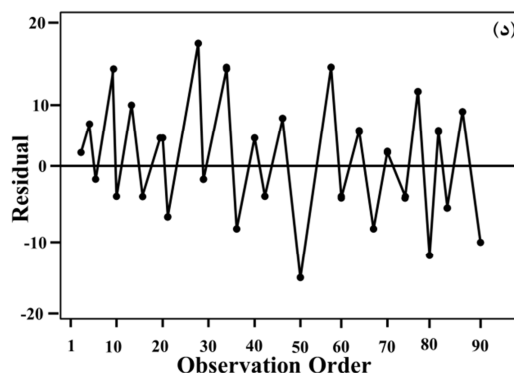
در مورد درصد ذرات ساینده در سیال مغناطیسی، به علت گرانیوی بالای سیال در مخلوط‌های غلیظ‌تر از ۱۰۰ گرم در لیتر، فرآیند به خوبی انجام نشده و بهبود قابل توجهی در کیفیت سطح بوجود نمی‌آید. با توجه به آنالیز واریانس صورت گرفته توسط نرم‌افزار Minitab، پس از جنس ذرات ساینده، فاکتورهای سرعت دوران کله‌گی، غلظت و زمان انجام فرآیند که در جدول ۳ به ترتیب با حروف A، C و D مشخص شده‌اند، بیشترین تاثیر را بر صافی سطح قطعه کار دارند.

سرعت دوران کله‌گی، دومین پارامتر موثر بر صافی سطح بوده، با افزایش سرعت دوران کله‌گی از ۱۷۵۰ به ۲۲۰۰ دور بر دقیقه و همچنین از ۲۲۰۰ به ۳۶۰۰ دور بر دقیقه، کیفیت سطح افزایش یافته و به عبارتی افزایش سرعت دوران، تاثیر مستقیمی بر روی کیفیت سطح حاصله دارد. ضمناً، این موضوع در مقاله راگوناندان نیز بررسی شده و رابطه‌ای مستقیم بین افزایش سرعت دوران اسپیندل و افزایش کیفیت سطح حاصل شده است [۷].



شکل ۶- قطعه کار ۱- قبل از پرداخت کاری ۲- بعد از پرداخت کاری





شکل ۸- نمودارهای حاصل از نرم افزار Minitab. (الف) درصد در برابر باقیمانده. (ب) باقیمانده در برابر پراکندگی (ج) هیستوگرام (د) باقیمانده در برابر شماره آزمایش‌ها

۸- نتیجه‌گیری

در انجام این پروژه دستگاه پرداخت سطوح لیزهای اپتیکی به وسیله ذرات شناور در سیال مغناطیسی، طراحی و ساخته شد. با انجام آزمایش و تحلیل نتایج، بهترین تنظیمات برای رسیدن به بهترین کیفیت سطح به دست آمد و تاثیر هر فاکتور بر فرآیند، مورد بررسی قرار گرفت. مهم-ترین نتایج حاصل شده به شرح ذیل می‌باشند:

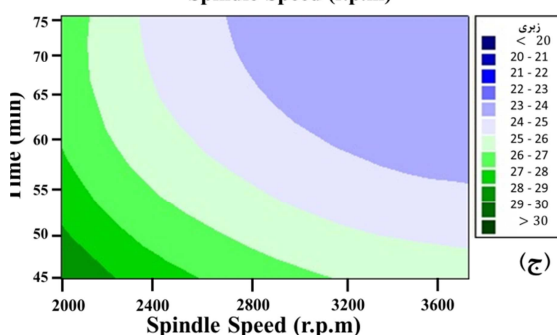
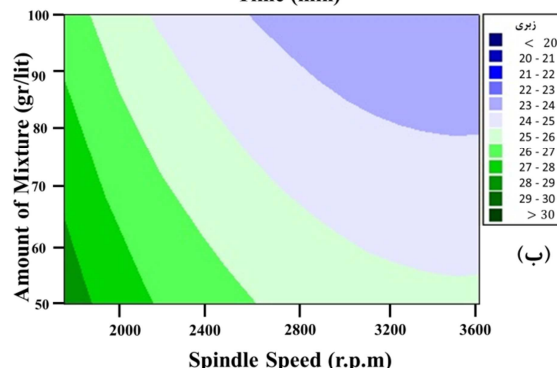
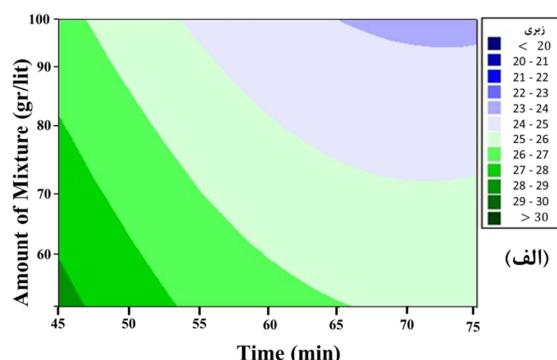
(۱) فاکتور جنس ذرات ساینده، بیشترین تاثیر را بر صافی سطح دارد. به ترتیب ذرات ساینده از جنس اکسید استرانسیوم، کاربید سیلیسیم، اکسید زیرکونیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم می‌توانند بهترین پرداخت سطح را حاصل نمایند. صافی سطح بدست آمده از این ساینده‌ها به ترتیب برابر با ۱۴، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۸ نانومتر حاصل شد.

(۲) سرعت دوران کله‌گی، دومین پارامتر موثر بر صافی سطح می‌باشد. با افزایش سرعت دوران کله‌گی از ۱۷۵۰ به ۲۲۰۰ و همچنین از ۲۲۰۰ به ۳۶۰۰ دور بر دقیقه، کیفیت سطح افزایش یافته، به عبارتی افزایش سرعت دوران، تاثیر مستقیمی بر روی کیفیت سطح حاصله دارد. (۳) غلظت، سومین پارامتر موثر بر کیفیت سطح می‌باشد و بهترین میزان ترکیب ذرات ساینده، ۱۰۰ گرم در لیتر می‌باشد.

(۴) چهارمین پارامتر موثر بر کیفیت سطح، زمان انجام فرآیند می‌باشد و زمان موثر انجام فرآیند در پرداخت کاری لنز با روش ذرات ساینده شناور در سیال مغناطیسی بین ۴۵ تا ۶۰ دقیقه است. افزایش زمان پرداخت از ۴۵ به ۶۰ دقیقه، بطور متوسط سبب بهبود ۱۰ درصدی کیفیت سطح می‌گردد.

(۵) بهترین صافی سطح به دست آمده برابر با ۱۴ نانومتر اندازه‌گیری شد. این نتایج با تنظیمات فاکتورها با دور ۳۶۰۰ دور در دقیقه و جنس ذرات ساینده از نانواکسید استرانسیوم با میزان اختلاط ذرات ساینده به میزان ۱۰۰ گرم در لیتر و زمان انجام فرآیند ۶۰ دقیقه به دست آمد.

دو فاکتور جنس ذرات ساینده، و سرعت دوران کله‌گی، موثرترین فاکتورهای فرآیند هستند. فاکتور بیانگر زمان انجام فرآیند، تقریباً پس از زمان ۳۰ دقیقه بی‌تاثیر می‌شود و در کیفیت سطح تاثیر آچنانی نمی‌گذارد.



شکل ۹- (الف) نمودار تاثیر میزان اختلاط ذرات ساینده و زمان در کیفیت سطح. (ب) نمودار تاثیر میزان مخلوط ذرات ساینده و سرعت دوران در کیفیت سطح. (ج) نمودار تاثیر سرعت و زمان دوران در کیفیت سطح

- [11] Lee R. T., Hwang Y. C., Chiou Y. C., Dynamic analysis and grinding tracks in the magnetic fluid grinding system, Sun Yat Sen University, Taiwan, *Precision Engineering*, Vol. 78, No. 33, pp. 81-90, 2009.
- [12] Mahalik N.P., *Micro-manufacturing and Nanotechnology*, pp. 305-320, New York: Springer, 2006.
- [13] Pashmforoush F., Rahimi A., Nano-finishing of BK7 optical glass using magnetic abrasive finishing process, *Applied Optics*, Vol. 98, No. 197, pp. 212-221, 2015.
- [14] Jain V. K., Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, No. 209, pp. 6022-6038, 2009.
- [15] Umehara N., Kirtane T., Gerlick R., Jain V.K., Komanduri R., a new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si_3N_4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP), Oklahoma State University, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 79, No. 46, pp. 151-169, 2006.
- [16] Wang L., Snidle R.W., Gu L., Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research, Mechanical Engineering department, Harbin Institute Technology, PR China, *Journal of wear*, Vol. 14, No. 246, PP. 270-310, 2000.

۹- فهرست علائم

میزان اختلاط یا غلظت ذرات ساینده (گرم در لیتر)	A
جنس ذرات ساینده	B
سرعت دوران کله‌گی (rpm)	C
زمان انجام فرآیند (min)	D
صافی سطح (nm)	Rz
زیرنویس‌ها	
Magnetic Float Polishing	MFP
Design of Experiment	DOE
لایه انجماد مجدد	Recast Layer
اکسید آلومینیوم	Al_2O_3
اکسید زیرکونیوم	ZrO_2
اکسید کروم	Cr_2O_3
اکسید مس	Cu_2O
اکسید آهن	Fe_2O_3
کاربید سیلیسیوم	SiC
اکسید سیلیسیوم	SiO_2
اکسید مس	CeO_2
کاربید بور	B_4C

۱۰- مراجع

- [1] Jain V., Magnetic field assisted abrasive based micro-/ nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 20, pp. 6022-6038, 2009.
- [2] Vahdati M., Rasouli S. A., Study of significant factors on magnetic abrasive finishing on freeform surfaces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2016. (in Persian)
- [3] Jiang M., Komanduri R., On the finishing of Si_3N_4 balls for bearing applications Oklahoma State University, *Wear*, Vol. 17, No. 215, pp. 267-278, 1998.
- [4] Singh D. K., Jain V., Raghuram V., Parametric study of magnetic abrasive finishing process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 149, No. 1, pp. 22-29, 2004.
- [5] Yan B. H., Chang G.W., Chang J. H., Hsu R.-T., Improving electrical discharge machined surfaces using magnetic abrasive. finishing, *Machining science and technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 103-118, 2004.
- [6] Jiang M., Wood N.O., Komanduri R., On Chemo-mechanical polishing (CMP) of silicon nitride (Si_3N_4) workmaterial with various abrasives, *wear*, Vol. 48, No. 220, pp 59-71, 1998.
- [7] Jiang M., *Finishing of advanced ceramic balls for bearing applications by Magnetic Float Polishing (MFP) involving fine polishing followed by Chemo-Mechanical Polishing (CMP)*, PhD Thesis, Oklahoma State University, U.S.A, 1998.
- [8] Childs T.H.C., Moss D.J., Wear and cost issues in magnetic fluid grinding, School of Mechanical Engineering, University of Leeds (UK), *Wear*, Vol. 68, No. 249, pp. 509-516, 2001.
- [9] Yuan J.L., Lu B.H., Lin X., Zhang L.B., Ji S.M., Research on abrasives in the chemical-mechanical polishing process silicon nitride balls, College of Mechanical and Electrical engineering, Zhejiang University of Technology, China, *Journal of Material Processing technology*, Vol. 55, No. 129, pp. 171-175, 2002.
- [10] Zhang B., Nakajima A., Dynamic of magnetic fluid support grinding of Si_3N_4 ceramic balls for ultra-precision bearings and its importance in spherical surface generation, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Saga University, Japan, *Precision Engineerin*, Vol. 12, No. 27, pp. 1-8, 2003.