



# Experimental and Numerical Investigation of the Optimization of Internal and External Rotary Abrasive Polishing Process of Cylindrical Parts



## ARTICLE INFO

### Authors

Khoshanjam A.<sup>1\*</sup>,  
Samadi M.R.<sup>2</sup>  
Khoshanjam K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Phd student of mechanical engineering, Arak, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Master's student in Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Kermanshah.

### \* Correspondence

Address: Karaj, Taleghani St, Motahari St., Yekta Building  
Ali.khoshanjam@gmail.com

### How to cite this article

Khoshanjam A, Samadi M.R, Khoshanjam K. Experimental and Numerical Investigation of the Optimization of Internal and External Rotary Abrasive Polishing Process of Cylindrical Parts. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):195-201.

## ABSTRACT

One of the new and widely used polishing processes for the surfaces of cylindrical parts is the Magnetic Rotary Abrasive Polishing Process (MRAF). This process is done using magnetic force and rotational speed simultaneously and oppositely. In this process, the forces required for machining and surface polishing are applied to the surface of the workpiece through magnetic and rotational force. One of the capabilities of this process is the ability to finish the internal and external surfaces of various parts with a special geometric shape and axial symmetry. The purpose of this article is to investigate the mathematical model of the chip removal mechanism and surface roughness changes, as well as applied forces in the process, for an abrasive particle. In order to model and optimize process parameters, response surface method and analysis of variance have been used. Based on the presented mathematical model, it was observed that the parameters of rotation speed (S), working distance (w) and the dimensions of the abrasive particle (A) have a significant effect on the quality of the surface (Ra). Based on the surface response method, the lowest surface roughness value was obtained through a rotation speed of 700 rpm, a working distance of 1.5 mm and an abrasive particle with dimensions of 18 micrometers, which is equal to 43.64 nm and with the experimental value obtained from the tests, That is, 43 nm had an acceptable match and had a desirability level of 0.9959. The obtained results were in good agreement with each other in theoretical and experimental modes.

**Keywords** Abrasion Polishing, Surface Smoothness, Machining, Magnetic Force

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک، مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۹۵-۲۰۱



## بررسی تجربی و عددی بهینه سازی فرایند پرداختکاری ساینده چرخشی داخلی و خارجی قطعات استوانه ای



### چکیده

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

علی خوش انجام<sup>۱\*</sup>  
محمد رضا صمدی<sup>۲</sup>  
کیوان خوش انجام<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه

از فرایندهای نوین و پرکاربرد پرداختکاری سطوح قطعات استوانه ای، فرایند پرداختکاری مگنتی ساینده ی چرخشی می باشد (MRAF). این فرایند با استفاده از نیروی مغناطیسی و سرعت چرخشی به صورت همزمان و مخالف هم انجام می گیرد. در این فرایند نیروهای مورد نیاز برای ماشینکاری و پرداختکاری سطوح، از طریق نیروی مغناطیسی و چرخشی به سطح قطعه کار اعمال می شود. یکی از قابلیت های این فرایند توانایی پرداختکاری سطوح داخلی و خارجی قطعات مختلف با فرم هندسی خاص و متقارن محوری هستند. هدف از این مقاله بررسی مدل ریاضی مکانیزم براده برداری و تغییرات زبری سطح و نیز نیروهای اعمالی در فرایند، برای یک ذره ی ساینده می باشد. به منظور مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای فرایند از روش سطح پاسخ و آنالیز واریانس استفاده شده است. براساس مدل ریاضی ارائه شده مشاهده گردید پارامترهای سرعت چرخشی (S) فاصله کاری (w) و ابعاد ذره ی ساینده (A) تاثیر به سزایی بر کیفیت سطح (Ra) دارند. براساس روش پاسخ سطح، کمترین مقدار زبری سطح از طریق سرعت چرخشی ۷۰۰ دور بر دقیقه، فاصله کاری ۱/۵ میلیمتر و ذره ساینده با ابعاد ۱۸ میکرومتر بدست آمده که برابر با ۴۳/۶۴ نانومتر بوده و با مقدار تجربی بدست آمده از آزمایشها، یعنی ۴۳ نانومتر مطابقت قابل قبولی داشت و از میزان مطلوبیت ۰/۹۹۵۹ برخوردار بود. نتایج بدست آمده نیز در حالت های تئوری و تجربی مطابقت خوبی با هم داشتند.

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: کرج - خیابان طالقانی -  
خیابان مطهری، ساختمان یکتا  
Ali.khoshanjam@gmail.com

کلیدواژه‌ها پرداختکاری سایشی، صافی سطح، ماشینکاری، نیروی مغناطیسی

## ۱- مقدمه

در دنیای صنعتی امروز با پیشرفت تکنولوژی در صنایع مختلف، نیاز به قطعاتی با کیفیت سطح فوق دقیق و با هندسه پیچیده بیش از پیش احساس می شود. همچنین با توجه به تأثیراتی که کیفیت سطح یک قطعه بر کاربرد و طول عمر آن دارد، تقاضا برای پرداختکاری های فوق دقیق در حال افزایش است [1]. روش های سنتی پرداختکاری به دلیل عدم قابلیت پرداخت بالا خصوصا در قطعات با هندسه و شکل پیچیده، سبب بروز آسیب های سطحی و زیر سطحی بر قطعه کار می گردند. محققان روش های نوینی در جهت رفع معایب ذکر شده ابداع نمودند که نانوپر پرداختکاری یکی از روش هایی است که به منظور کنترل بهتر و دقیق تر نیروها در حین فرآیند، از ذرات ساینده به همراه مکانیزم های مختلفی استفاده می شود [2]. براساس موارد ذکر شده در خصوص روش های پرداختکاری، فرآیند MRAF یکی از جدیدترین روش های پرداختکاری محسوب می شود که ترکیبی از میدان مغناطیسی و دو سرعت چرخشی مخالف هم بوده که بصورت همزمان و از طریق همزن و قطعه کار فراهم می گردد. نیروی مورد نیاز این فرآیند از دو طریق اعمال می شود شارمغناطیسی و نیروی چرخش بین همزن و قطعه کار [3]. با توجه به قابلیت های ذکر شده ی این فرآیند، می توان سطوح مختلف داخلی و خارجی قطعات مختلف، به ویژه قطعات با هندسه پیچیده که دارای تقارن محوری هستند را بصورت دقیق پرداختکاری نمود [4-5]. در سالهای اخیر، محققان به منظور توسعه سایر فرایندها و همچنین درک مکانیزم براده برداری و زبری سطح آنها، تحقیقات فراوانی را، از نظر تئوریک و تجربی، بر روی این فرایندها انجام دادند.

به دلیل اینکه فرآیند پرداختکاری ساینده چرخشی (RAF) به عنوان یکی از جدیدترین روشهای میکرو/نانو پرداختکاری شناخته می-شود، بنابراین بررسی بیشتر و دقیقتر جوانب مختلف این فرآیند مورد نیاز است. لذا هدف از این مقاله ارائه تحلیل جدیدی برای درک بهتر زبری سطح در فرآیند RAF است. در این تحقیق مدل ریاضی جدیدی برای درک بهتر مکانیزم براده برداری و زبری سطح و نیز نیروهای اعمالی در فرآیند برای یک ذره ساینده ارائه شد. به منظور راستی آزمایی مدل تحلیلی ارائه شده، برخی پارامترهای موثر بر فرآیند و تاثیر آنها بر مقدار زبری سطح به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از روش سطح پاسخ (RSM) و آنالیز واریانس (ANOVA) به منظور مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای فرآیند بهره برده شد. در پایان، نتایج تحلیلی، مدل سازی و تجربی مورد مقایسه قرار گرفتند.

## ۲- شرح مسئله

## ۲-۱- تحلیل تئوری

در فرآیند RAF، سرعت نسبی بین ابزار (همزن) و قطعه کاری که توسط خمیر ساینده احاطه شده است، سبب تامین نیروهای مورد نیاز برای عملیات پرداختکاری می شود. حرکت ذرات ساینده موجود در خمیر ساینده بر سطح قطعه کار، سبب اعمال نیروهای گریز از مرکز (عمودی) و مماسی بر سطح قطعه کار می شود [6]. نیروی گریز از مرکز (عمودی) اعمالی بر ذره ساینده، وظیفه نفوذ در سطح قطعه کار را برعهده دارد. پس از نفوذ، ذره ساینده به صورت افقی بر روی سطح قطعه کار حرکت می کند که این امر سبب تشکیل براده در مقیاس میکرو و نانومتر می شود. مقدار براده برداشته شده از سطح برابر است با حجم کلی شیارهایی که توسط هر ذره ساینده موجود در خمیر ساینده، بر سطح قطعه کار ایجاد شده است. به منظور محاسبه حجم کل براده برداشته شده از سطح، نیاز است که تعداد و شکل ذرات فعال در فرآیند و نیز عمق شیارهای ایجاد شده بر سطح قطعه محاسبه شود.

## ۲-۲- فرضیات

با توجه به ماهیت تصادفی و پیچیده حرکت دانه ساینده و تعامل آن با قطعه کار در فرآیند RAF، مدل سازی آن بسیار سخت و تا حدودی غیر ممکن است. لذا جهت ساده سازی این موضوع، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود که عبارتند از:

- ۱- قطر، اندازه و شکل تمامی ذرات ساینده به صورت یکسان و کروی است.
- ۲- هر دانه ساینده، دارای یک لبه برشی فعال است.
- ۳- سطح قطعه کار دارای پروفیل زبری یک شکل و بدون توزیع آماری است که از زبری سطح برابر برخوردار هستند.
- ۴- نیروی اعمالی بر هر دانه ساینده، ثابت بوده و عمق نفوذ برای هر ذره ساینده، یکسان است.

## ۲-۳- نیروها، عمق نفوذ و ناحیه تماس دانه ساینده

شکل ۱، مراحل شروع تا برخورد ذره ساینده با سطح قطعه کار را نشان می دهد. در فرآیند RAF، نیروهای دخیل در عملیات براده برداری عبارتند از، نیروی گریز از مرکز ( $F_{cen}$ )، نیروی عمودی ( $F_n$ )، نیروی مماسی ( $F_t$ )، نیروی پرداختکاری ( $F_f$ ). ابزار (همزن) که وظیفه به چرخش درآوردن خمیر ساینده به منظور نفوذ و سایش ذرات ساینده بر سطح قطعه کار را برعهده دارد. به دلیل اینکه ابزار (همزن) و سطح قطعه کار، هیچگونه تماسی با هم ندارند و در خلاف جهت هم، می چرخند، لذا نسبت به یکدیگر دارای حرکت نسبی هستند. در ابتدای حرکت، سرعت ذره ساینده ( $v_a$ )، برابر است با سرعت ابزار ( $v_s$ )، یعنی ( $v_a = v_s$ ). اما به دلیل حرکت نسبی بین ابزار و قطعه کار، سرعت ذره ساینده در هنگام برخورد با سطح قطعه، برابر است با سرعت نسبی ( $v_r$ ) بین ابزار و قطعه کار یعنی، ( $v_r = v_a - v_s$ ). چرخش ابزار (همزن) سبب ایجاد نیروی گریز از مرکز در خمیر ساینده می شود. بنابراین، در هنگام برخورد، نیروی

شکل ۳ تماس ذره ساینده با سطح قطعه کار در شکاف کاری را نشان می‌دهد. زمانیکه ذره ساینده، زبری‌های سطح را برش می‌دهد، رابطه طول تماس واقعی ( $L_i$ ) ذره ساینده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(5)$$

$$L_i = l_s$$

$$(6)$$

$$l_s = 4(R_a^0 - R_a^i) \tan \theta_s$$

طول مسیر طی شده ( $L_w$ ) توسط ذره ساینده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(7)$$

$$L_w = l_s + l_g$$

$$(8)$$

$$l_s + l_g = 4R_a^0 \tan \theta_s$$

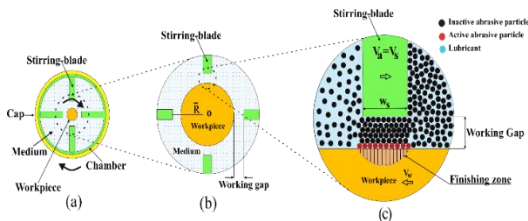
رابطه بین طول تماس واقعی ( $L_i$ ) بین ذره ساینده و طول مسیر طی شده ( $L_w$ ) توسط ذره ساینده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(9)$$

$$L_i = \left( \frac{l_s}{l_s + l_g} \right) L_w$$

با جایگذاری داریم:

$$L_i = \left( \frac{4(R_a^0 - R_a^i) \tan \theta_s}{4R_a^0 \tan \theta_s} \right) L_w \quad (10)$$



شکل ۳ (نمای بالای محفظه پرده‌دار (a)، نمای بزرگ شده محفظه پرده‌دار (b)، ناحیه تماس ذره ساینده با سطح قطعه در شکاف کاری (c)).

$$(11)$$

$$L_i = \left( 1 - \frac{R_a^i}{R_a^0} \right) L_w$$

شکل ۴ شماتیکی از زبری سطح را نشان می‌دهد. زمانیکه نیروی پرداختکاری ( $F_t$ ) بیشتر از نیروی مقاومت ( $R_{req}$ ) جسم شود، عملیات براده‌برداری از طریق حرکت ذره ساینده بر روی سطح جسم انجام می‌شود. حجم براده‌برداشته شده ( $V_a$ ) از سطح توسط یک ذره ساینده برابر است با مساحت سطح مقطع ( $A'$ ) ناحیه نفوذ ذره ساینده و طول تماس ( $L_i$ ) آن با سطح قطعه کار، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(12)$$

$$V_a = A' L_i$$

با جایگذاری داریم:

تورفتگی برابر است با نیروی گریز از مرکز اعمالی بر ذره ساینده. نیروی گریز از مرکز ( $F_{cen}$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

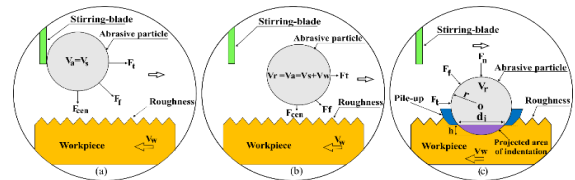
$$(1)$$

$$F_{cen} = m_a \frac{v_a^2}{R}$$

از طرفی جرم ذره ساینده برابر است با:

$$(2)$$

$$m_a = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a$$



شکل ۱ (مراحل شروع تا برخورد ذره ساینده با سطح قطعه کار: شروع (a)، قبل از برخورد (b)، برخورد (c)).

بنابراین، با جایگذاری رابطه (۲) در (۱)، و با توجه به اینکه به دلیل حرکت نسبی بین ابزار و قطعه کار، سرعت ذره ساینده در هنگام برخورد با سطح قطعه، برابر است با سرعت نسبی ( $v_r$ )، لذا نیروی گریز از مرکز ( $F_{cen}$ ) اعمالی بر ذره ساینده به صورت زیر تعریف می‌شود:

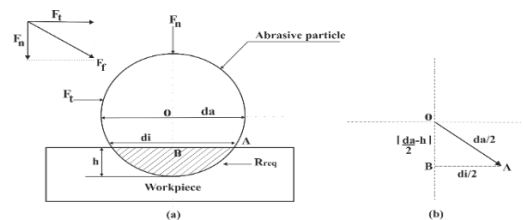
$$(3)$$

$$F_{cen} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a \frac{v_r^2}{R}$$

نیروی عمودی ( $F_n$ ) اعمالی بر ذره ساینده در هنگام برخورد که وظیفه نفوذ در سطح قطعه را به عهده دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(4)$$

$$F_n = F_{cen} \frac{\pi d_a^2}{4}$$



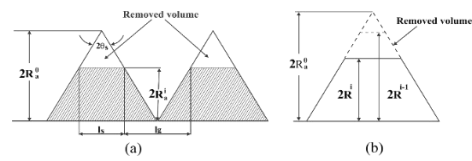
شکل ۲ (لحظه برخورد ذره ساینده با سطح قطعه (a)، مثلث OAB تشکیل شده ناشی از نفوذ ذره ساینده در سطح قطعه (b)).

عملیات براده‌برداری زمانی رخ می‌دهد که مجموع برآیند نیروی عمودی ( $F_n$ ) و نیروی مماسی ( $F_t$ )، که به عنوان نیروی پرداختکاری ( $F_t$ ) شناخته می‌شود، بیشتر از نیروی نیروی مقاومت ( $R_{req}$ ) جسم شود [7]. نیروی پرداختکاری ( $F_t$ ) ب

## ۲-۴ مکانیزم براده‌برداری و زبری سطح

(۱۳)

$$V_a = \left[ \frac{d_a^2}{4} \ln^{-1} \left( \frac{2\sqrt{h(d_a-h)}}{d_a} \right) - \sqrt{h(d_a-h)} \left( \frac{d_a}{2} - h \right) \right] \times \left( 1 - \frac{R_a}{R_0} \right) L_w$$



شکل ۴) شماتیک زبری سطح (a)، قله برش خورده پس از مراحل مختلف پرداختکاری (b).

عملیات براده برداری، ناشی از حرکت تعداد بسیاری از ذرات ساینده بر سطح قطعه کار است. ذرات ساینده‌ای که در عملیات براده برداری شرکت می‌کنند به عنوان ذرات ساینده فعال ( $N_a$ ) و ذرات ساینده-ای که مشارکت نمی‌کنند به عنوان ذرات ساینده غیرفعال شناخته می‌شوند. تعداد کلی ذرات ساینده ( $N_t$ ) که در هر بار چرخش همزن، در عملیات براده برداری مشارکت دارند به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۱۴)

$$N_t = 2\pi R_w N_a N_s W_s L_s \frac{R_s^2}{R_w^2}$$

بنابراین، حجم براده‌ای که در چرخش نام همزن از سطح قطعه کار برداشته می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۱۵)

$$V_t = A' L_t N_t$$

جدول ۱ مقادیر ثابت مورد استفاده در تحلیل تئوری را نشان می‌دهد.

جدول ۱) پارامترهای ورودی مورد استفاده در تحلیل تئوری

Parameters	Value
$\nu_p$	0.14
$\sigma_p$	170 (Mpa)
$\rho_w$	8000 (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_a$	3220 (Kg/m <sup>3</sup> )
$R_w$	5 (mm)
$W_s$	1 (mm)
$L_s$	10 (mm)
BHN	217

#### ۴- روش حل (راستی‌آزمایی عملی)

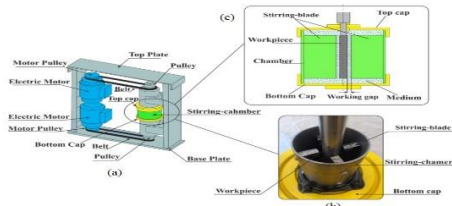
##### ۴-۱- دستگاه RAF

شکل ۵ شماتیک دستگاه RAF را نشان می‌دهد. مکانیزم فرایند RAF، براساس چرخش همزمان ابزار و قطعه کار در جهت مخالف هم استوار است. به منظور پرداختکاری سطح داخلی قطعه، ابزار (همزن)، در درون قطعه کار قرار داده می‌شود. همزن، نقش ابزار را ایفا می‌کند که وظیفه به چرخش در آوردن ذرات ساینده را برعهده دارد. بین پره‌های همزن و سطح قطعه، هیچگونه تماسی وجود ندارد که از آن به عنوان شکاف کاری یاد می‌شود و محل قرارگیری خمیر ساینده است. ابتدا قطعه کار در درون فیکسچری که در قسمت پایین میز تعبیه شده و به الکتروموتور پایین دستگاه متصل است، قرار داده می‌شود. قبل از قرارگیری قطعه در درون فیکسچر، قسمت پایینی قطعه با استفاده از یک درپوش،

آب‌بندی و بسته می‌شود. پس از قرارگیری قطعه کار، خمیر ساینده به درون قطعه ریخته می‌شود. سپس، ابزار، از طریق فیکسچری که در قسمت بالای میز تعبیه شده و به الکتروموتور بالایی دستگاه متصل است، در درون قطعه، قرار داده می‌شود. پس از جایگذاری ابزار در درون قطعه، با استفاده از یک درپوش دیگر، سطح بالایی قطعه، آب‌بندی و بسته می‌شود. درپوش‌ها، علاوه بر اینکه مانع از خروج خمیر ساینده از درون قطعه در حین فرایند می‌شوند، بلکه با فراهم آوردن یک محیط بسته ماشینکاری، سبب افزایش نیروی‌های اعمالی بر سطح و در نتیجه افزایش سرعت فرایند و متعاقب آن، کاهش زمان و هزینه‌های فرایند می‌شوند. با شروع فرایند، ابزار (همزن) شروع به چرخش نموده و در نتیجه سبب به چرخش در آوردن خمیر ساینده می‌شود. با چرخش خمیر ساینده و تماس و برخورد آن با سطح قطعه کاری که همزمان در جهت مخالف، در حال چرخش است، نیروهای مورد نیاز برای انجام عملیات براده برداری و پرداختکاری، بر سطح قطعه اعمال می‌شود. جدول ۲ پارامترها و شرایط آزمایشها را نشان می‌دهد.

جدول ۲) پارامترها و شرایط آزمایشها

Name of Parameters	Value
Velocity of stirring-blades (rpm)	300-450 - 600
Velocity of workpiece (rpm)	100
Working gap (mm)	1-1.5-2
Workpiece material	Stainless steel 316 L
Abrasive type	Silicon carbide (SiC)
Lubricant type	Naphthenic oil
Weight ratio of medium (SiC : Naphthenic oil)	(70:30)



شکل ۵) شماتیک دستگاه RAF (a)، نمای بزرگ‌شده محفظه پرده‌دار (b)، نمای مونتاژشده از محفظه پرده‌دار و قطعه کار (c).

##### ۴-۲- قطعه کار و خمیر ساینده

قطعه کار مورد استفاده در این پژوهش، فولاد ضد زنگ 316L بوده که دارای شکل استوانه‌ای است. به منظور دست آوردن زبری سطح اولیه قطعه، چند نقطه از سطح به صورت تصادفی اندازه‌گیری و میانگین آنها به عنوان زبری اولیه قطعه در نظر گرفته شد که مقدار آن ۳۰۳ نانومتر بود. در این تحقیق، از ساینده سیلیکون کارباید (SiC) با مدول یانگ ۴۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۱۴ به عنوان ساینده استفاده شد [8]. شکل ۶ تصاویر SEM این ذرات را نشان می‌دهد. به دلیل در دسترس بودن، غیر شیمیایی بودن، جریان‌پذیری و انعطاف‌پذیری مناسب و ارزان بودن، از آب به عنوان خنک‌کار استفاده شد. به منظور جلوگیری از تبخیر آب به دلیل تولید حرارت احتمالی در حین فرایند، زمان فرایند به سیکل‌های ۳ دقیقه‌ای تقسیم‌بندی شد.

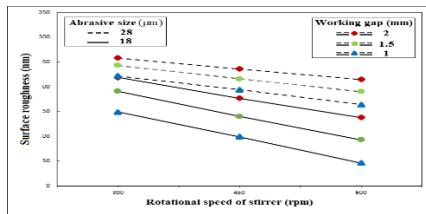
به منظور مدل سازی و مقایسه نتایج، سه پارامتر سرعت همزن (S)، شکاف کاری (W) و اندازه ذره ساینده (A) مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز واریانس (ANOVA) برای زبری سطح (Ra) بدست آمده از نتایج تجربی نشان می دهد. مقدار P برای اکثر پارامترها کمتر از ۰/۰۵ است که بیانگر معنادار بودن (Significant) مدل است. همچنین "lack of fit"، Insignificant بوده و مقدار آن 0.982 می باشد که بیانگر این است که مدل به خوبی معنادار است. از آنالیز ANOVA، مشاهده شد که هر سه پارامتر سرعت همزن (S)، شکاف کاری (W) و اندازه ذره ساینده (A) تاثیر چشمگیری بر Ra دارند. مدل quadratic برای Ra به صورت معادله زیر تعریف می شود.

$$Ra = 457 + 0.221 S + 404.1 W - 61.17 M - 0.000698 S^2 S - 77.8 W^2 W + 1.472 M^2 M - 0.0817 S^2 W + 0.01117 S^2 M - 2.80 W^2 M$$

۲-۵- نتایج تجربی

۲-۵-۱- اثر سرعت چرخشی ابزار (همزن) بر زبری سطح

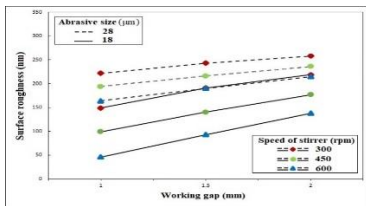
شکل ۸ تاثیر سرعت چرخشی همزن بر زبری سطح (Ra) را نشان می دهد. افزایش سرعت چرخشی ابزار، سبب کاهش مقدار تغییر زبری سطح (ΔR) می شود. نیروی عمودی (F<sub>n</sub>)، وظیفه نفوذ در قطعه را برعهده دارد و نیروی مماسی (F<sub>t</sub>) نیز سبب برداشته شدن براده از سطح قطعه می شود. با افزایش سرعت چرخشی ابزار (همزن)، مقدار براده برداری افزایش می یابد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار (v<sub>s</sub>)، سرعت نسبی (v<sub>r</sub>)، بین ابزار (و ذره ساینده) با قطعه کار بیشتر می شود.



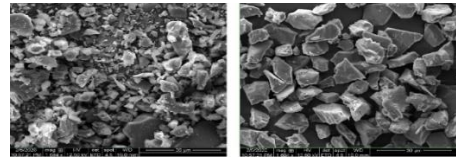
شکل ۸ اثر سرعت چرخشی همزن بر زبری سطح.

۲-۵-۲- اثرات شکاف کاری بر زبری سطح

شکل ۹ اثرات شکاف کاری بر زبری سطح (Ra) را نشان می دهد. افزایش شکاف کاری سبب کاهش مقدار تغییر زبری سطح (ΔR) می شود. افزایش شکاف کاری سبب می شود تعداد ذرات ساینده کمتری در فرایند پرداختکاری مشارکت نمایند، چرا که ذرات ساینده برای برخورد با سطح باید مسافت بیشتری را طی کنند (شکل 1b).



شکل ۹ اثرات سرعت شکاف کاری بر زبری سطح.



شکل ۶ تصویر SEM ذرات ساینده

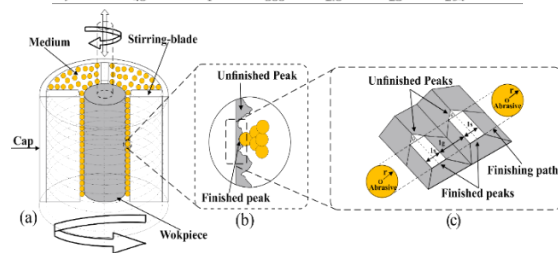
در این تحقیق، سه پارامتر سرعت چرخشی ابزار (همزن)، شکاف کاری و اندازه دانه ساینده بررسی شد. ابتدا ۱۸ آزمایش به روش فول فاکتوریل، طراحی و پاسخ ها بدست آمد (جدول ۳). سپس از نتایج بدست آمده برای مدل سازی و بهینه سازی پارامترها براساس روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد (جدول ۴). در ابتدا و انتهای هر آزمایش، زبری سطح با استفاده از زبری سنج MarSurf PS1 ثبت شد. زبری سطح هر مرحله، به عنوان زبری سطح اولیه مرحله بعد در نظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی بهتر و مقایسه نتایج قبل و بعد از فرایند، از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده شد. شکل ۷ تعامل ذره ساینده با زبری سطح را نشان می دهد.

جدول ۳ (آزمایشها به روش فول فاکتوریل)

StdOrder	RunOrder	PType	Blocks	S (rpm)	W (mm)	A (µm)
16	1	1	1	600	1.5	28
5	2	1	1	300	2.0	18
3	3	1	1	300	1.5	18
9	4	1	1	450	1.5	18
1	5	1	1	300	1.0	18
13	6	1	1	600	1.0	18
17	7	1	1	600	2.0	18
14	8	1	1	600	1.0	28
12	9	1	1	450	2.0	28
18	10	1	1	600	2.0	28
8	11	1	1	450	1.0	28
6	12	1	1	300	2.0	28
15	13	1	1	600	1.5	18
11	14	1	1	450	2.0	18
7	15	1	1	450	1.0	18
10	16	1	1	450	1.5	28
2	17	1	1	300	1.0	28
4	18	1	1	300	1.5	28

جدول ۴ پارامترها بر اساس روش سطح پاسخ

StdOrder	RunOrder	PType	S (rpm)	W (mm)	A (µm)	Final Ra (µm)
1	1	1	300	1.5	28	1.774
2	2	1	300	2.0	18	2.526
3	3	1	300	1.5	18	2.812
4	4	1	450	1.5	18	1.454
5	5	1	450	2.0	28	1.454
6	6	1	450	1.5	18	2.812
7	7	1	600	1.5	18	1.862
8	8	1	600	2.0	28	2.812
9	9	1	600	1.5	18	2.812
10	10	1	450	1.0	18	1.454
11	11	1	450	2.0	28	2.812
12	12	1	450	1.5	18	2.812
13	13	1	600	1.0	18	1.454
14	14	1	600	2.0	28	2.812
15	15	1	600	1.5	18	2.812
16	16	1	300	1.0	28	2.526
17	17	1	300	1.5	18	2.812
18	18	1	300	2.0	18	2.526



شکل ۷ تعامل ذره ساینده با زبری سطح.

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

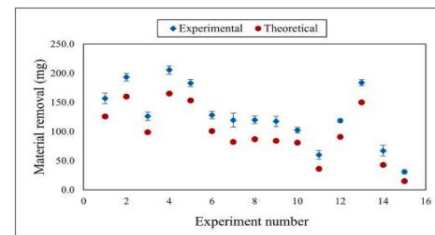
۵-۱- آنالیز واریانس و مدل سازی روش سطح پاسخ

### ۵-۳- مقایسه بهینه‌سازی روش سطح پاسخ با نتایج تجربی

براساس نتایج بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ، می‌توان نتیجه گرفت که تحت شرایط بهینه‌سازی شده سرعت چرخشی همزن ۶۰۰ دور بر دقیقه، شکاف کاری ۱ میلی‌متر و اندازه دانه ساینده ۱۸ میکرومتر، زبری سطح (Ra) به کمترین مقدار خود براساس سطوح تعیین شده دست پیدا می‌کند. مقدار بهینه Ra برابر ۴۶/۸۷ نانومتر است، که با مقدار تجربی بدست‌آمده از آزمایشات، یعنی ۴۶ نانومتر، مطابقت بسیار خوبی دارد. یعنی میزان مطلوبیت نقطه بدست آمده نزدیک به ۱، یعنی ۰/۹۹۵۹ است، بنابراین این نقطه بهینه را می‌توان به عنوان نقطه مورد قبول انتخاب نمود.

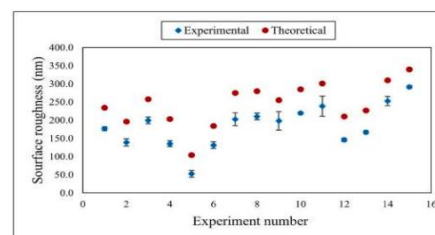
### ۵-۴- مقایسه نتایج مدل ریاضی با تجربی

شکل ۱۱ مقایسه بین نتایج تئوری و تجربی برای براده برداشته شده از سطح را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار براده برداشته شده از سطح در نتایج تجربی بیشتر از نتایج تئوری است. این موضوع را می‌توان به فرضیاتی که برای آنالیز تحلیلی در نظر گرفته شد و تفاوت آن با حالت واقعی مرتبط دانست.



شکل ۱۱) مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای براده برداشته شده از سطح

شکل ۱۲ مقایسه بین نتایج تئوری و تجربی برای زبری سطح را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود کاهش مقدار زبری سطح در نتایج تجربی، بیشتر از نتایج تئوری است.



شکل ۱۲) مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای زبری سطح

### ۶- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش ارائه مدل ریاضی جدیدی برای درک بهتر زبری سطح در فرایند RAF بود. آزمایش‌هایی به منظور راستی‌آزمایی مدل تئوری پیشنهاد شده، بر روی برخی پارامترهای موثر بر فرایند انجام شد. همچنین از روش سطح پاسخ (RSM) و آنالیز واریانس (ANOVA) به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند استفاده شد. یافته‌های مهم این تحقیق عبارتند از:

۱- براساس آنالیز واریانس و روش سطح پاسخ، هر سه پارامتر سرعت همزن (S)، شکاف کاری (W) و اندازه ذره ساینده (A) تاثیر چشمگیری بر Ra دارند. مقدار P برای اکثر پارامترها کمتر از ۰/۰۵ است که بیانگر معنی دار بودن بودن مدل است. همچنین "lack of fit"، Insignificant بوده و مقدار آن 0.982 می‌باشد که بیانگر این است که مدل به طور قابل توجهی معنادار است.

۲- افزایش سرعت چرخشی همزن سبب افزایش تعداد ذرات ساینده فعال ( $N_d$ ) در فرایند و نیز افزایش نیروهای  $F_t$  و  $F_n$  می‌شود که این امر کاهش زبری سطح را به دنبال دارد. بیشترین کاهش زبری سطح از مقدار اولیه ۱۶۴ نانومتر به مقدار نهایی ۴۶ نانومتر کاهش یافت.

۳- افزایش شکاف کاری سبب کاهش نیروهای اعمالی بر سطح قطعه می‌شود که این امر کاهش مقدار تغییر زبری سطح را به دنبال دارد. بیشترین مقدار تغییر زبری سطح ( $\Delta R$ ) برابر با ۱۶۲ نانومتر بود و زمانی بدست آمد که سرعت چرخشی ۶۰۰، شکاف کاری ۱/۵ میلی‌متر و اندازه دانه ساینده ۲۳ میکرومتر بود.

۴- در مقایسه با ذرات ساینده با اندازه کوچکتر، ذرات ساینده بزرگتر، دارای لبه‌های برشی بیشتری می‌باشند که این امر افزایش قدرت برشی ذره ساینده در برخورد با زبری‌های سطح را به دنبال داشته و افزایش مقدار براده‌برداری و کاهش زبری سطح را سبب می‌شود. بیشترین مقدار براده برداشته شده از سطح برابر با ۱۹۸/۶۰ میلی‌متر بود که با استفاده از دانه با اندازه ۲۳ میکرومتر بدست آمد.

۵- براساس روش سطح پاسخ، کمترین مقدار Ra بهینه‌سازی شده، از طریق سرعت چرخشی همزن ۶۰۰ دور بر دقیقه، شکاف کاری ۱ میلی‌متر و اندازه دانه ساینده ۱۸ میکرومتر بدست آمد که برابر با ۴۶/۸۷ نانومتر بود و با مقدار تجربی بدست‌آمده از آزمایشات، یعنی ۴۶ نانومتر، مطابقت بسیار خوبی داشت و از میزان مطلوبیت نزدیک به ۱ برخوردار بود.

۶- مدل تئوریک به منظور پیش‌بینی مکانیزم زبری سطح ارائه شد. می‌توان اینگونه تفسیر نمود که تفاوت بین نتایج تئوری و تجربی ناشی از فرضیاتی است که برای ساده‌سازی آنالیز تحلیلی و تفاوت آن با حالت واقعی در نظر گرفته شد.

### مراجع

- 1- Hashimoto F, et al. Abrasive fine-finishing technology, CIRP Ann. - Manuf. Technol. 65 (2) (Jan. 2016) 597-620.
- 2- Rezayat M, Yazdi M.S, Zandi M.D, Azami A. Tribological and corrosion performance of electrodeposited Ni-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating. Results Surf. Interf. 2022.

- 3- Kumar M, Alok A, Kumar V, and Das M. Advanced Abrasive-Based Nano -Finishing Processes: Challenges, Principles and Recent Applications.2021;372-392.
- 4- Azami A, Salahshournejad Z, Shakouri E, Sharifi AR, Saraeian P. Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS<sub>2</sub> and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel. Feb. 2023. 209-220.
- 5- Jain RK, Jain VK, Dixit PM. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process, Int. 1999 ;1903-1923.
- 6- Miao Q, et al. Creep feed grinding induced gradient microstructures in the superficial layer of turbine blade root of single crystal nickel-based superalloy. 2021.
- 7- Cao Y, Zhu Z, Ding W, Qiu Y, Wang L, Xu J. Vibration coupling effects and machining behavior of ultrasonic vibration plate device for creep-feed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy. 2022;332-345.
- 8- Cao Y, Ding W, Zhao B, Wen X, Li S, Wang J. Effect of intermittent cutting behavior on the ultrasonic vibration-assisted grinding performance of Inconel718 nickel-based superalloy. 2022; 248-260.