



## بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری نوع مرطوب نانوذرات به کمک روش تاگوچی و الگوریتم ژنتیک (GA)

اصغر همتی – عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع – دانشگاه آزاد اسلامی - واحد ابهر E-mail: [Hemmatiasg@iaui-abhar.ac.ir](mailto:Hemmatiasg@iaui-abhar.ac.ir)  
مقتدی همتی – مدرس گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تاکستان

**چکیده:** نانوذرات به‌طور وسیع و موفقیت‌آمیزی در بسیاری از کاربردهای صنعتی به‌کار گرفته شده‌اند. فرآیند فرزکاری مکانیکی مرطوب، یکی از روش‌های رایج برای تولید نانوذرات می‌باشد. بنابراین، بهبود کیفیت فرآیند فرزکاری با استفاده از تنظیم پارامترهای بهینه فرزکاری بسیار مهم است. در این مطالعه، روش تاگوچی (RSM) و الگوریتم ژنتیک برای طراحی پارامترهای بهینه فرآیند فرزکاری نانوذره باهم به‌کار گرفته شده‌است. آزمایش بردار متعامد (OA) به‌منظور بررسی اقتصادی فرآیند، انجام شده‌است. تحلیل واریانس (ANOVA) و نمودار اثر اصلی برای تعیین پارامترهای مهم و تنظیم سطح بهینه هر پارامتر، مورد استفاده قرار گرفته است. سپس RSM برای ایجاد ارتباط میان پارامترهای ورودی و پاسخ‌های خروجی و نیز تابع برازش (fitness) برای اندازه‌گیری ارزش برازندگی روش GA، مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت GA برای پیدا کردن پارامترهای بهینه برای یک فرآیند فرزکاری نانو ذره، استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که رویکرد جمعی (جمع ۳ روش) واقعاً پارامترهای بهینه را پیدا می‌کند که نتیجه آن پاسخ خروجی بسیار خوب در فرآیند فرزکاری مرطوب نانوذرات است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، آرایه فتوولتائی، ریزش آب، توان نامی آرایه، ارتفاع معادل فشار سامانه پمپ.

## Optimization of Wet Type Milling Process Parameters for Nano Particles Using Taguchi method and genetic algorithm

A. Hemmati, Department of Indus. Eng., Abhar Islamic Azad University

M. Hemmati, the Faculty of Mech. Eng., Islamic Azad University, Branch of Takestan

**Abstract:** Nano-particles have been successfully and widely utilized in many industrial applications. The wet-type mechanical milling process is a popular method used to produce nano-particles. Therefore, it is very important to improve milling process capability and quality by setting the optimal milling parameters. In this research, the parameter design of the Taguchi method, response surface method (RSM) and genetic algorithm (GA) are integrated and applied to set the optimal parameters for a nanoparticlemilling process. The experimental results show that the integrated approach does indeed find the optimal parameters that result in very good output responses in the nano-particle wetmilling process.

Keywords: Nano-particle; Wet-type milling process; Taguchi method; RSM and GA

## ۱- مقدمه

بسیاری از ماشین‌های فرزکاری مکانیکی پیشرفته برای تولید نانو ذرات به سرعت ابداع و ساخته شده‌اند که می‌توان به ماشین فرز مخزن عمودی و افقی اشاره نمود که در این ماشین‌ها به منظور افزایش ظرفیت تولید نانوذرات، فناوری‌های زیادی از قبیل طراحی روتورها، سامانه‌های جداسازی، خنک‌کاری و تهویه و کنترل باهم جمع شده‌اند. جمع این روش‌ها فرآیند فرزکاری مکانیکی را پیچیده می‌کند. بنابراین کنترل متغیرهای مختلف برای دستیابی به کیفیت مطلوب تولید ضروری است.

مشخصات مورد نیاز فرآیند فرزکاری مرطوب این است که باید میانگین و واریانس ابعاد نانوذرات باید کوچک نگهداشته شوند. از پارامترهای تأثیرگذار بر روی این مشخصه فرزکاری مرطوب می‌توان به زمان فرزکاری، سرعت حرکتی سامانه دوار، سرعت چرخشی همزن، غلظت محلول کلوئیدی، نوع ماده، اندازه و نسبت پراکنندگی رسانه سایشی، شکل هندسی، جنس و اندازه فرز، دمای فرزکاری و نوع ماده پخش‌کننده اشاره نمود. با این حال اثر این پارامترها روی کیفیت خروجی در فرآیند فرزکاری نانوذرات ناشناخته باقی می‌ماند. بعلاوه پیدا کردن مقادیر بهینه این پارامترهای فرزکاری به منظور تولید نانوذرات با کیفیت بالا بسیار مهم است.

اخیراً، روش‌های هوشمند محاسباتی، همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک (GA) و روش‌های طراحی آزمایش آماری همانند روش تاگوچی و روش سطح پاسخ (RSM)، بطور وسیع در اغلب مسائل بهینه‌سازی مهندسی به کار گرفته شده‌است. روش ترکیبی تاگوچی با RSM ابزار طراحی قدرتمندی در بسیاری از کاربردهای مهندسی می‌باشد. با این روش نه تنها می‌توان صرفه‌جویی زیادی در زمان کرد، بلکه به کمک آن می‌توان به سرعت و با دقت زیادی الگوها را در یک طرح بهینه‌سازی ایجاد کرد. هدف این تحقیق، ترکیب طراحی

نانوذرات عموماً در ابعاد ۱ الی ۱۰۰ نانومتر، امروزه به طور وسیع در ساخت نانوکاتالیزورها، نانو سرامیک‌ها، نانوالیاف پارچه و نانو مواد ترکیبی به کار می‌روند. فناوری‌های تولید نانوذرات به دو شکل از پائین به بالا (Bottom-up) و از بالا به پائین (Top-down) تقسیم‌بندی می‌شوند. در فناوری نخست، مواد اولیه مورد نیاز در ابعاد میکرو به ذرات کوچکتری در ابعاد ۴۰ الی ۲۰۰ نانومتر تبدیل می‌شوند. فرزکاری ساچمه‌ای (Balling)، لایه‌نشانی (Sputtering)، حک‌کاری شیمیایی (Chemical etching) و سایش لیزری (Laser ablation) از جمله فناوری‌های رایج در این دسته می‌باشند. در فناوری‌های از پائین به بالا، نانوذرات از تجمع اتم‌ها یا مونتاژ نانوذرات از بلوک‌های ساختمانی نانو، تولید می‌شوند. در این فناوری‌ها که شامل متراکم‌سازی ذرات معلق ریز (aerosol)، سنتز شیمیایی، رسوب‌سازی شیمیایی بخار و ریزسازی گازی می‌باشند، نانوذرات را می‌توان در ابعاد دلخواهی تولید نمود. صرفنظر از نوع فناوری تولید، نانوذرات تحت تاثیر نیروی الکترواستاتیکی کولنی (Coulomb) و نیروی واندر والز (Vander Walls) در صورتیکه ابعاد آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌شود، تبدیل به توده شده و تحت این شرایط ذرات دیگر در اندازه نانو باقی نمی‌مانند. اخیراً ماشین فرزکاری نوع مرطوب برای تولید نانوذرات به منظور اجتناب از اثر تجمعی ذرات ابداع شده‌است که از نظر سادگی و قابلیت انجام آن برای مواد مختلف یک روش رایج و مناسب برای تولید نانو ذرات است. از سوی دیگر از رایج‌ترین روش‌های فرزکاری مکانیکی، فرزکاری ساچمه‌ای ضربه‌ای است که شامل یک همزن چرخشی به همراه رسانه سایشی ساچمه‌ای می‌باشد. فرآیند فرزکاری مکانیکی از انرژی جنبشی و برخورد ذرات در فرز ساچمه‌ای ضربه‌ای استفاده می‌کند که باعث ایجاد برخورد میان ساچمه‌های فرزکاری و ذرات شده که شکسته شدن مواد در ابعاد نانومتری را به دنبال خواهد داشت.

پارامتر روش تاگوچی، RSM و رویکرد GA برای بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری یک نانوذره می‌باشد. در این مطالعه با ترکیب طراحی پارامتر روش تاگوچی، RSM و رویکرد الگوریتم ژنتیک پارامترهای بهینه فرآیند فرزکاری نانوذرات تعیین می‌شوند.

## ۲- شرح دستگاه

در این تحقیق، یک ماشین فرزکاری مخزن عمودی که توسط مرکز توسعه و تحقیق ماشین آلات دقیق (PMC) توسعه داده شده، برای تولید نانوذرات اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ ) استفاده شده است. مطابق طرحواره شکل (۱)، این ماشین فرز عمودی شامل یک فرز به ظرفیت یک لیتر، یک همزن چرخان، سامانه‌های دوار، خنک‌کننده به ظرفیت  $24000 \text{ Btu/h}$  و جداسازی فیلتری، یک مخزن ذخیره با ظرفیت سه لیتر، یک موتور الکتریکی با قدرت  $5500$  وات و سرعت چرخشی  $2400 \text{ rpm}$  است. عملیات فرزکاری از نوع مرطوب و به حالت گردشی انجام می‌شود. برای این منظور، ابتدا ماده دی اکسید تیتانیوم، بوسیله حلال گلیکول (Glycol)، به یک محلول کلئیدی با غلظت مناسب تبدیل می‌شود. سپس این محلول کلئیدی جهت اختلاط با یک پخش‌کننده (فسفات) به یک مخزن همزن برای ریخته می‌شود. برای اندازه‌گیری ابعاد ذرات قبل از فرآیند فرزکاری نمونه‌گیری می‌شود. سپس محلول کلئیدی به همراه پخش‌کننده فسفات و رسانه ساچمه‌ای سایش، دی اکسید زیرکونیوم ( $ZrO_2$ )، در داخل ماشین فرز قرار داده می‌شوند. سپس، موتور محرک همزن روشن می‌شود که بواسطه آن در اثر برخورد میان رسانه ساچمه‌ای سایشی و ذرات باعث شکسته شدن  $TiO_2$  در اندازه نانومتر می‌شود. در مرحله بعد، چند ساعت بعد از انجام فرز کاری، برای اندازه‌گیری کیفیت سطح ذرات ( میانگین ابعاد ذرات و واریانس آنها)، نمونه‌هایی از محلول کلئیدی بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند. سرانجام، نانوذرات  $TiO_2$ ، با جداسازی محلول

$TiO_2$  و حلال گلیکول در ماشین دوار تولید می‌شوند.

## ۳- روش تاگوچی

روش تاگوچی که توسط Genechi Taguchi ارائه شده است، جهت طراحی سامانه، پارامترها و تolerانس آنها برای دستیابی به فرآیند و نتایج بهینه برای بهترین کیفیت محصول می‌باشد. هدف از روش طراحی سامانه، تعیین سطح مناسب از عوامل طراحی است. در روش طراحی پارامتر، عواملی که دارای بهترین عملکرد در تولید محصول یا فرآیند تحت مطالعه را دارند تعیین می‌شوند. روش طراحی تolerانس برای میزان‌سازی دقیق نتایج طراحی پارامتر با بستن حدود تolerانس آنها که تاثیر عمده‌ای روی محصول یا فرآیند دارند، به کار می‌رود. صرف‌نظر از مهندسی حین تولید یا خارج از خط تولید محصول، روش تاگوچی می‌تواند به‌طور وسیع اثر بخشی محصول یا فرآیند را با استفاده از تابع زیان (Loss) و دستیابی به کیفیت مطلوب محصول را در طراحی پارامتر، بهبود بخشد. عموماً طراحی پارامتر روش تاگوچی، از بردارهای متعامد (OA) برای به حداقل رساندن زمان و هزینه آزمایش‌ها در تجزیه و تحلیل تمام عوامل و از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای تحلیل داده‌های آزمایشی استفاده می‌کند و ترکیب بهینه پارامترها را پیدا می‌کند. علاوه بر این، تحلیل حدود تغییرات (ANOVA) برای تخمین حدود تغییرات خطا و تعیین پارامترهای مهم به کار گرفته می‌شود. طراحی پارامتر در روش تاگوچی بشرح مراحل ذیل انجام می‌شود:

- طرح آزمایش که این مرحله شامل تعیین عامل‌های کنترلی، نویزی و پاسخ‌های کیفی محصول یا فرآیند، تعیین سطح هر یک از عامل‌ها و انتخاب یک جدول بردار متعامد مناسب می‌باشد. جدول بردار متعامد OA به تعداد عوامل و اثر متقابل میان آنها و نیز تعداد سطح عوامل بستگی دارد. برای مثال یک بردار متعامد  $L_{27}(3^{13})$  دارای ۲۷ طرح آزمایشی،

و با خطاهای قابل اغماض قابل اندازه‌گیری باشند، سطح پاسخ می‌تواند به شکل  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  بیان شود. که  $n$  تعداد متغیرهاست. هدف بهینه‌سازی تابع پاسخ  $Y$  است بطوریکه تقریب‌های مناسبی میان متغیرهای مستقل و سطح پاسخ پیدا شود.

#### ۵- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک که توسط John Holland معرفی شد، روش جستجوی احتمالی بر مبنای رویکرد انتخاب با بهره‌گیری از علم ژنتیک طبیعی به تقلید از موجودات زنده است که برای حل مسائل بهینه‌سازی در پدیده‌های پیچیده و ساختار نامطلوب به-کار گرفته شده است [۲]. عبارت دیگر، رویکرد GA، یک ابزار چندمنظوره و قدرتمنی در زمینه بهینه‌سازی است که در طی فرآیندهای محاسباتی از نظریه تکاملی زیست‌شناسی تقلید می‌کند. این رویکرد به طور موفق در زمانبندی و برنامه‌ریزی تولید و بهینه‌سازی فرآیندها مورد استفاده قرار گرفته است. صرف‌نظر از روش‌های جستجوی صعودی و نزولی نقطه‌ای، الگوریتم GA از یک رشته جواب‌های تصادفی بنام جمعیت کار را آغاز می‌کند. هر جواب منفرد در جمعیت کروموزوم نامیده می‌شود. در هر نسل، GA عملیات ژنتیکی مانند تقاطع و جهش را روی کروموزوم‌های انتخابی اجرا می‌کند تا جواب‌های (بچه‌های) نسل بعد تولید شوند. در هر نسل کروموزوم‌ها، برازش بهتری را با به‌کارگیری عملیات تکاملی انتخاب، ایجاد می‌کنند. از نسلی به نسلی دیگر، سرانجام کروموزوم‌ها همگرا خواهند شد و در این تکامل بهترین کروموزوم پیدا می‌شود. عموماً مراحل اصلی رویکرد GA به شرح ذیل می‌باشد:

▪ نمایش متغیر مسئله در قالب یک کروموزوم با طول ثابت و انتخاب اندازه جمعیت کروموزوم‌ها، اندازه احتمال تقاطع و احتمال جهش.

۱۳ عامل در ستون‌ها و ۳ سطح عامل دارد.

- تبدیل داده‌های آزمایشی به یک نسبت سیگنال به نویز مناسب (S/N)
- انجام آزمایش‌ها
- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها که شامل تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین پارامترهای مهم، انجام تحلیل آنالیز نمودار اثر اصلی برای تعیین سطح بهینه عوامل کنترل، تحلیل نسبت مشارکتی عوامل و بالاخره تأیید نتایج آزمایش و طرح کاربردی آتی آنها.

#### ۴- روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ که در اواخر دهه ۱۹۵۰ ابداع شد، شامل یک رشته از روش‌های آماری و ریاضی است که برای الگوسازی و تحلیل کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. معمولاً در چنین مواردی پاسخ مطلوب، متأثر از چندین متغیر می‌باشد و هدف عبارت از یافتن متغیرهایی است که پاسخ را بهینه می‌کند. روش سطح پاسخ بطور وسیع در صنایع مختلف شیمیایی، الکترونیکی و نیمه‌رسانا، ماشین‌کاری و فرآیندهای برش فلزات به‌کار رفته است. این روش شامل مراحل ذیل می‌باشد:

- طراحی و اجرای یک رشته آزمایش‌ها برای تعیین مقیاس قابل اطمینان و مناسب از پاسخ مطلوب (برای مثال آزمایش بردار متعامد).
- توسعه الگوهای ریاضی از سطح پاسخ مرتبه اول و دوم با برازش بهینه.
- تعیین مجموعه بهینه‌ای از پارامترهای فرآیند که بیشینه و کمینه پاسخ را تولید می‌کند.
- نمایش اثرات متقابل و مستقیم پارامترهای فرآیند از طریق نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی.
- بافرض اینکه متغیرهای فرآیند مستقل، پیوسته و قابل کنترل باشند

قالب تابع برازندگی تعیین شده‌اند. نمودار جریان رویکرد تجمعی ارائه شده در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

#### ۷- طراحی پارامتر و روش سطح پاسخ (RSM)

بطوریکه در مقدمه اشاره شد، بهینه‌سازی فرآیند فرزکاری مکانیکی به‌لحاظ اینکه پارامترهای زیادی می‌توانند پاسخ‌های کیفی خروجی را تحت تاثیر قرار دهند، یک فرآیند پیچیده‌ای است. باوجود این، نتایج طرح آزمایش فرآیند فرزکاری نشان می‌دهد که برخی پارامترهای موثر در فرزکاری نانوذرات باید هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. برای مثال پارامترهای اندازه، نوع ماده و شکل هندسی فرز عموماً به طور هم‌زمان در طراحی فرز ملاحظه می‌شوند. به‌منظور اجتناب از پیچیدگی در فرآیند شبیه‌سازی، فرض می‌شود که پارامترهای فوق ثابت و به‌عنوان پارامترهای قابل کنترل در نظر گرفته نمی‌شوند. اندازه فرز در یک لیتر تنظیم شده، جنس ماده فرز فولاد ضدزنگ و شکل هندسی آن به‌شکل استوانه در نظر گرفته شده‌است.

همچنین دی‌اکسید زیرکونیوم ( $ZrO_2$ ) به‌عنوان ماده رسانای سایشی استفاده می‌شود و اندازه آن ۵۰۰ میکرون است. این دو پارامتر نیز ثابت و به‌عنوان پارامترهای قابل کنترل در نظر گرفته نمی‌شوند. بعلاوه به‌منظور حفظ اندازه ذرات در حد نانومتر در دمای اتاق، دمای فرزکاری در حدود  $25-20^\circ C$  تنظیم می‌شود و به‌عنوان متغیر کنترلی مورد ملاحظه قرار نمی‌گیرد. نوع ماده پخش‌کننده نیز فسفات در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه ۵ متغیر فرآیند قابل کنترل شامل؛ زمان فرزکاری، سرعت سامانه گردش، سرعت چرخشی محور همزن، غلظت حلال و نسبت پرکردن رسانه سایشی در نظر گرفته شده‌است. انتخاب سطح این پارامترها بر مبنای ویژگی فرآیند فرزکاری و محدودیت ماشین فرز مورد استفاده می‌باشد. برای پارامتر زمان، زمان فرزکاری باید در حد قابل قبولی قرار گیرد تا کارایی لازم فرزکاری تأمین شود و

- تعریف تابع برازندگی برای اندازه‌گیری برازش یک کروموزوم در محدوده مسئله.
- تولید تصادفی جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها
- محاسبه برازش هر کروموزوم
- انتخاب یک جفت از کروموزوم‌ها برای جفت‌گیری جمعیت فعلی. کروموزوم‌های والد با احتمالی متناسب با برازش آنها انتخاب می‌شوند. کروموزوم‌های با برازش بالا با احتمال بیشتری برای جفت‌گیری انتخاب می‌گردند. روش چرخه رولت معمولاً در انتخاب کروموزوم‌ها به‌کار گرفته می‌شود.
- ایجاد یک جفت از کروموزوم‌های فرزند با به‌کارگیری اپراتورهای ژنتیک (تقاطع و جهش).
- قرار دادن کروموزوم‌های زاده شده در نسل جاری.
- تکرار مرحله ۵ تا زمانی که اندازه جمعیت کروموزوم‌ها با اندازه جمعیت اولیه برابر شود.
- جایگزینی جمعیت کروموزوم‌های اولیه (والد) با جمعیت جدید (بچه‌ها).
- تکرار مراحل (۴) الی (۹) تا زمانی که معیار خاتمه ارضا شود.

#### ۶- روش تحقیق

در این مطالعه، یک روش تجمعی برای بررسی تأثیر پارامترهای متفاوت در فرآیند فرزکاری نانوذرات و نیز تعیین پارامترهای بهینه در این فرآیند، ارائه شده‌است. بدین مفهوم که روش تاگوچی طراحی پارامتر برای تعیین پارامترهای مهم و تنظیم حدود بهینه برای هر پارامتر بر مبنای نتایج تحلیل واریانس و نمودار اثر اصلی، مورد استفاده قرار گرفته‌است. سپس روش سطح پاسخ (RSM) برای ایجاد روابط چندمتغیری خطی و غیرخطی میان پارامترهای فرآیند فرزکاری نانوذرات و پاسخ‌های کیفی به‌کار گرفته شده‌است. سرانجام به‌وسیله رویکرد GA پارامترهای بهینه فرآیند با استفاده از تابع پاسخ مدل RSM در

این مطالعه، ۵ پارامتر فرآیند، هر یک با ۳ سطح و اثرات متقابل میان زمان فرزکاری (A) و سرعت چرخشی همزن (C) و تعداد ساچمه‌های سایش (E) بررسی شده‌اند. بنابراین تعداد درجه آزادی برای پارامترهای اصلی ۱۰  $(5 \times (3-1))$  و برای اثرات متقابل ۸  $(2 \times (3-1) \times (3-1))$  می‌باشد که در مجموع ۱۸ خواهد بود که باید یک بردار متعامد  $L_{18}$  انتخاب شود. چون تمام پارامترها دارای ۳ سطح می‌باشند، بردار متعامد باید یک مکعب ۳ بعدی بشکل  $(L_9, L_{18}, L_{27})$  و یا طرح بردار متعامد  $L_{27}(3^{13})$  مطابق جدول (۲) برای اجرای آزمایش‌ها در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۲) همچنین ۲ پاسخ خروجی برای هر بار آزمون نشان داده شده‌است.

روش RSM که با روش تاگوچی برای طراحی پارامتر ترکیب شده‌است، برای تعیین تقریبی از تابع پاسخ در مورد متغیرهای قابل پیش‌بینی به کار می‌رود. در این روش برای ایجاد رابطه میان پارامترهای ورودی و پاسخ خروجی از الگوهای خطی و نمایی استفاده شده‌است. این الگوها به صورت ذیل بیان می‌شوند: برای الگوی خطی (مرتبه اول):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_K x_K + \varepsilon \quad (2)$$

که K تعداد پارامترها و  $\varepsilon$  مقدار خطا می‌باشد.

برای الگوی نمایی (مرتبه دوم):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

#### ۸- رویکرد جمعی RSM و GA :

در این مطالعه، اجتماع GA و RSM برای یافتن پارامترهای بهینه فرآیند فرزکاری نانوذرات به کار رفته‌است. همانطوریکه اشاره رفت RSM برای ایجاد رابطه میان پارامترهای ورودی فرآیند و پاسخ‌های خروجی استفاده می‌شود. رویکرد GA، برای

درجه ناخالصی کاهش یابد. برطبق نتایج تجربی حد قابل قبول زمان فرزکاری ما بین ۲ الی ۸ ساعت می‌باشد [۲]، بنابراین حدود زمان فرزکاری در ۲، ۵ و ۸ تنظیم می‌شود. برای پارامتر سرعت سامانه گردشی، حدود عوامل بر مبنای اندازه فرز و مخزن ذخیره انتخاب می‌شود. در این مطالعه، اندازه فرز یک لیتر، اندازه مخزن ذخیره ۳ لیتر و بیشینه حجم محلول کلوئیدی ۴ لیتر می‌باشد. بنابراین سطح سرعت سامانه حرکتی در ۱، ۲ و ۳ (L/min) انتخاب می‌شود. برای پارامتر سرعت چرخشی همزن، حدود تغییرات بر مبنای حد موتور محرک و سایش همزن می‌باشد. در این مطالعه سرعت چرخشی موتور ۲۴۰۰ rpm می‌باشد، بنابراین سطوح در ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۰۰ تنظیم می‌شود. برای پارامتر غلظت حلال، حدود تغییرات بر مبنای نوع ماده پردازشی و حلال متناظر آن انتخاب می‌شود (برای مثال  $TiO_2$  و گلیکول). برطبق نتایج تجربی غلظت بسیار بالای محلول کلوئیدی موجب عدم عملکرد صحیح تجهیزات ماشین فرز می‌شود، بنابراین حدود تغییرات غلظت حلال در ۱، ۴ و ۷ تنظیم می‌شوند. برای پارامتر نسبت پرکردن رسانه سایشی حد تغییرات بر مبنای اندازه فرز انتخاب می‌شوند. به لحاظ اینکه اندازه فرز یک لیتر می‌باشد، پارامتر فوق باید در حد قابل قبول تنظیم شود. برطبق نتایج تجربی حدود تغییرات این پارامتر در ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد از حجم فرز تنظیم می‌شود. بنابراین ۵ پارامتر فرآیند، هر کدام با ۳ سطح و برخی اثرات متقابل میان آنها بررسی شده اند که نتایج در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

پاسخ‌های خروجی مورد نظر فرآیند فرزکاری نانوذرات، میانگین اندازه ذرات و واریانس آنها می‌باشد که هر دو باید در حد کمینه حفظ شوند. به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه، آزمایش بردار متعامد برای تعیین اندازه‌های پاسخ فرآیند فرزکاری نسبت به طرح آزمایش تک‌عاملی ترجیح داده شد. انتخاب OA باید با توجه به درجه آزادی عوامل و اثرات متقابل صورت گیرد. در

و  $y_2$  باشند، آنگاه تابع برازش نهایی با استفاده از دو راهبرد فوق به صورت ذیل بیان می‌شود:

$$\Phi_1 = y_1 + y_2 \quad (۴)$$

$$\Phi_2 = \frac{\text{variance}}{\text{mean}} = \frac{y_1}{y_2} \quad (۵)$$

که  $\Phi_1$  ,  $\Phi_2$  به ترتیب تابع برازش نهایی با استفاده از دو راهبرد فوق می‌باشند.

#### مرحله سوم: انتخاب

در این مرحله یک جفت از کروموزوم‌ها برای جفت‌گیری از جمعیت نسل جاری با استفاده از تقاطع و جهش انتخاب می‌شوند. کروموزوم‌های والد متناسب با مقدار برازش آنها انتخاب می‌شوند. کروموزوم‌ها با برازش بالا، احتمال انتخاب بیشتری را دارا می‌باشند. روش چرخه رولت برای انتخاب کروموزوم‌ها، به کار گرفته می‌شود.

#### مرحله چهارم: تقاطع

عملگر تقاطع برای زایش یک جفت از کروموزوم‌های فرزند (Offspring) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای هر جفت انتخاب شده، یک تقاطع دونقطه‌ای (دو نقطه برش) برای زایش یک بچه با احتمال تقاطع  $p_c$  به کار رفته است.

#### مرحله پنجم: جهش

عملگر جهش تک‌ژنی با احتمال  $p_m$  برای تولید کروموزوم‌های جدید به کار رفته است. در این مرحله با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش، جمعیت جدید،  $N_{pop}(\text{offspring})$ ، تولید می‌شود. جمعیت کروموزوم‌های اولیه را با جمعیت جدید جایگزین می‌شود و مراحل دوم تا پنجم را تا زمانیکه معیار توقف ارضا شود، تکرار می‌شود.

تعیین پارامترهای بهینه فرآیند، از الگوهای پاسخ RSM به‌عنوان تابع برازندگی برای اندازه‌گیری مقدار برازش پارامترهای فرآیند، بشرح ذیل استفاده می‌شود:

#### مرحله اول: رمزگذاری (Encoding) و تولید جمعیت اولیه

پارامترهای فرآیند برای ایجاد فضای جواب GA استفاده می‌شوند. حدود جستجو برای ۵ پارامتر در جدول (۱) نشان داده شده است. با نرمالیزه نمودن هر محدوده جستجو به ۱۰۰۰ بازه مساوی تقسیم می‌شود. نمایش رشته‌ای دوگانه برای فضای کدگذاری کروموزوم‌ها استفاده می‌شود بدین معنی که هر پارامتر ورودی با ۱۰ رقم دوگانه کدگذاری شده است. برای مثال،

$$x_1 = 0.010, x_2 = 0.036, x_3 = 0.064, x_4 = 0.256, x_5 = 0.065$$

آنگاه کروموزوم بصورت ذیل خواهد بود:

0000001010,0000100100,0001000000,0100000000,0001000001

در ادامه این مرحله،  $N_{pop}$ ، اندازه جمعیت کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود تا پارامترهای بهینه فرآیند تعیین شوند.

#### مرحله ۲: محاسبه ارزش برازندگی

توابع پاسخ RSM به‌عنوان تابع برازندگی در رویکرد GA به کار رفته‌اند. در این مطالعه، کیفیت مورد نیاز فرآیند فرزندکاری نانوذرزات، میانگین و واریانس اندازه ذرات می‌باشد که باید در حد کمینه حفظ شود. به عبارت دیگر کمینه نمودن میانگین اندازه ذرات و تغییرات قطری آنها که دو مسئله بهینه‌سازی را ایجاد می‌کند. به‌لحاظ اینکه این دو پاسخ خروجی باید کمینه شوند، می‌توان با استفاده از یک راهبرد مناسب تابع چندهدفی را به یک تابع تک‌هدفی، تبدیل کرد. یک راهبرد، ادغام این دو پاسخ به یک پاسخ با استفاده از یک عملگر اجتماع و راهبرد دیگر ترکیب آنها و تبدیل به یک پاسخ با استفاده از عملگر آماری ضریب واریانس می‌باشد. برای مثال، اگر پاسخ‌های خروجی به ترتیب  $y_1$

## ۹- بحث و نتیجه گیری

## نتایج آزمایش بردار متعامد و RSM

نتایج آزمایش بردار متعامد در جدول (۲) نشان داده شده است. میانگین و واریانس اندازه ذرات با استفاده از دستگاه Counter Multisizer اندازه گیری می شود. در هر آزمون یک نمونه از محلول کلوئیدی به طور تصادفی انتخاب و در داخل دستگاه قرار داده می شود تا میانگین و واریانس اندازه ذرات اندازه گیری شود. این آزمون برای ۵ نمونه محلول کلوئیدی درون دستگاه، تکرار می شود و سپس میانگین و واریانس نتایج این آزمون ها محاسبه می شود. به عنوان مثال میانگین و واریانس پاسخ خروجی آزمایش بردار متعامد (۲۱) که با استفاده از دستگاه فوق اندازه گیری شده است در شکل (۳) نشان داده شده است.

به علت صرفه جویی در هزینه ها برای هر آزمون یک اجرا انجام شده است و پس از آن تحلیل واریانس برای تعیین پارامترهای مهم به کار گرفته شده و برای تنظیم سطح بهینه هر پارامتر در فرآیند فرزکاری نانو ذرات از نمودار اثر اصلی استفاده شده است. برای تحلیل داده های آزمایشی از نرم افزار Minitab 13 استفاده شده است که نتایج در جدول (۳) بر مبنای میانگین اندازه ذرات درج شده است. از آنجا که  $F_{0.05}(2,8)=4.46$  و  $F_{0.05}(4,8)=3.84$  بدیهی است که زمان فرزکاری، A، سرعت سامانه چرخشی، B، سرعت چرخشی همزن، C، غلظت حلال، D، تعداد ساچمه های سایشی، E و اثرات متقابل میان زمان فرزکاری و تعداد ساچمه های سایشی،  $A \times E$  به طور عمده بر روی میانگین اندازه ذرات موثر می باشد، با فاصله اطمینان ۹۵٪. بر مبنای نمودار اثر اصلی سطح بهینه هر پارامتر با فاصله اطمینان ۹۵٪ در A3B3C3D3E3 برای پاسخ خروجی میانگین اندازه ذرات تنظیم شده که نتیجه در شکل (۴) نشان داده شده است.

به روش مشابه، نتایج تحلیل واریانس بر مبنای واریانس اندازه

ذرات در جدول (۴) نشان داده شده است. با بررسی این جدول ملاحظه می شود که سرعت سامانه گردشی، B، سرعت چرخشی همزن، C، غلظت حلال، D و تعداد ساچمه های سایشی، E، اثر مهمی بر روی پاسخ واریانس اندازه ذرات دارند. مطابق نمودار اثر اصلی، سطح بهینه هر پارامتر در A3B3C2D3E3 تنظیم شده که نتایج در شکل (۵) نشان داده شده است. علاوه بر این، روش RSM برای تعیین الگوهای برازش میان پارامترهای فرآیند و پاسخ های خروجی استفاده شده است. بدین منظور برای تعیین الگوهای مرتبه اول و دوم از نرم افزار Design Expert 6.0 استفاده شده که نتایج به صورت ذیل می باشد:

الف) برای میانگین اندازه ذرات الگوهای مرتبه اول و دوم عبارتند از:

$$y = 279.23 - 3.14x_1 - 17.58x_2 - 0.018x_3 - 2.11x_4 - 1.63x_5 \quad (6)$$

$$y = 380.99 - 7.15x_1 - 17.58x_2 - 0.12x_3 - 9.67x_4 - 1.63x_5 + 0.4x_1^2 + 0.91x_4^2 \quad (7)$$

ب) برای واریانس اندازه ذرات الگوهای مرتبه اول و دوم عبارتند از:

$$y_2 = 14.26 - 0.0046x_3 \quad (8)$$

$$y_2 = 36.25 - 1.8x_2 + 0.035x_3 + 3.66x_4 + 1.0x_5 - 0.5x_4^2 - 0.036x_5^2 \quad (9)$$

ملاحظه می شود که الگوهای مرتبه دوم  $R^2$  بزرگتری نسبت به الگوهای مرتبه اول در هر دو پاسخ دارا می باشند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ارتباط میان پارامترهای فرآیند و پاسخ های کیفی خروجی هم برای میانگین اندازه ذرات و هم برای واریانس آن، غیرخطی است و پاسخ های روابط (۷) و (۹)، به عنوان تابع برازندگی برای اندازه گیری مقادیر برازش در روش GA مورد استفاده قرار می گیرد. این روابط را همچنین می توان برای تعیین حساسیت پارامترهای فرآیند، به ترتیب برای میانگین



و واریانس اندازه ذرات به کار برد.

است. بنابراین، رویکرد ارائه شده، پارامترهای بهینه‌ای که پاسخ رضایت‌بخشی را برای فرآیند بدست می‌دهد، ارائه می‌کند. مقدار پارامتر A مابین سطح ۲ و ۳ قرار می‌گیرد. پارامتر B نزدیک به سطح ۳، پارامتر C برای تابع تبدیل راهبرد اول نزدیک به سطح ۲ و برای راهبرد دوم مابین سطح ۲ و ۳ قرار می‌گیرد. پارامتر D و E نزدیک به سطح ۳ هستند. بطوریکه از مقایسه جداول (۵) و (۴) ملاحظه می‌شود نتایج، مشابه نتایج نمودار اثر اصلی است ولی باوجود این رویکرد ارائه‌شده مقادیر دقیق‌تری را برای پارامترهای بهینه نسبت به نمودار اثر اصلی ارائه می‌دهد. بطوریکه از جدول (۵) ملاحظه می‌شود راهبردهای مختلف تابع برازش GA، جواب‌های مختلفی را بدست می‌دهد. استفاده از تابع برازش ضریب واریانس، جواب بهتری را برای میانگین اندازه ذرات نسبت به راهبرد تجمعی می‌دهد اما برعکس در این راهبرد تجمعی جواب بهتری برای واریانس اندازه ذرات نسبت به این راهبرد بدست می‌دهد. با اینکه پاسخ‌های خروجی فرآیند باید کمیته شوند، ولی در تضاد باهمدیگر هستند. برطبق نتایج تجربی، در تولید نانوذرات، پاسخ میانگین اندازه ذرات از واریانس آن مهمتر می‌باشد. بدین‌جهت پارامترهای بهینه فرآیند فرزکاری در راهبرد دوم به شرح ردیف (۳) جدول (۵) تنظیم می‌شوند:

#### ۱۰- نتیجه گیری

یکی از روش‌های رایج برای تولید نانوذرات استفاده از فرآیند فرزکاری مکانیکی است که کیفیت موردنیاز برای مواد مختلف در این روش میانگین ابعاد نانوذرات و واریانس آنها می‌باشد. تجارب نشان می‌دهد که این کیفیت به پارامترهای زیادی بستگی دارد. باوجود این تاکنون اثرات این پارامترها کاملاً در فرآیند فرزکاری مشخص نیست. از سوی دیگر بهبود قابلیت فرآیند فرزکاری و کیفیت آن با استفاده از تنظیم پارامترهای فرآیند، بسیار مهم می‌باشد.

#### تعیین پارامترهای بهینه با استفاده از روش تجمعی RSM و GA

برای توسعه روش تجمعی RSM و GA و تعیین پارامترهای بهینه در فرآیند فرزکاری نانوذرات از نرم افزار MATLAB 7.0 استفاده شده‌است. همانطوریکه اشاره رفت الگوهای مرتبه دوم (روابط ۷ و ۹) به‌عنوان تابع برازش برای اندازه‌گیری مقدار برازش در روش GA به کار رفته‌است. در این مطالعه، دو الگوی پاسخ‌ها، به یک الگوی تک‌هدفی تبدیل شده بدین معنی که با یک تبدیل دو الگوی فوق باهم جمع شده و تبدیل دیگر از ضریب واریانس استفاده می‌کند و در نتیجه توابع برازش جدید به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

تابع برازش اول که از تبدیل جمع دو الگو حاصل می‌شود:

$$F_1 = 417.24 - 7.15x_1 - 19.38x_2 - 0.085x_3 - 6.01x_4 - .63x_5 + 0.4x_1^2 - 0.41x_4^2 - 0.036x_5^2 \quad (10)$$

برای تابع برازش دوم که از تبدیل ضریب واریانس حاصل می‌شود:

$$F_2 = \frac{y_2}{y_1} \quad (11)$$

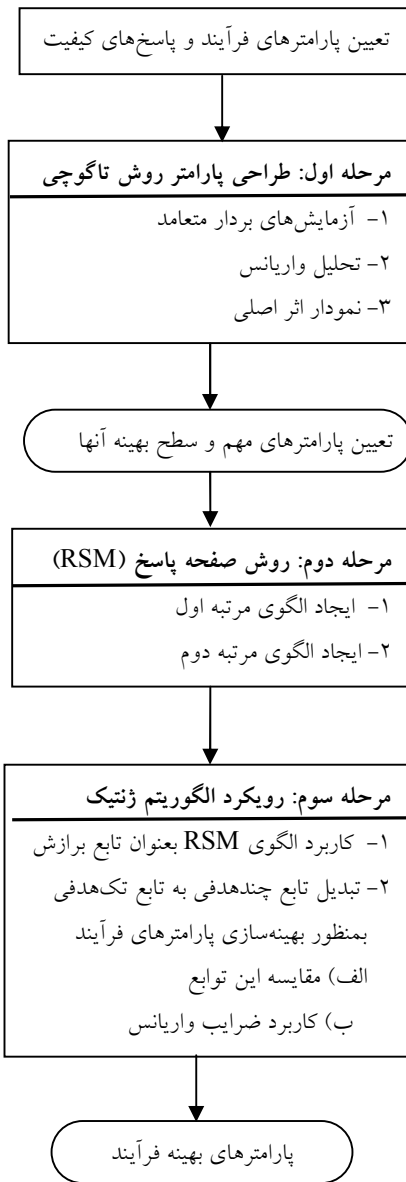
بوسیله دو تابع برازش فوق (روابط ۱۰ و ۱۱) مقدار برازش برای هر کروموزوم در روش GA اندازه‌گیری می‌شود. بدین‌منظور در ابتدا اندازه جمعیت در  $N_{pop}=30$  تنظیم می‌شود و تقاطع دوتقطه‌ای با احتمال تقاطع  $0.98$  با عملگر جهشی تک‌ژنی با احتمال  $p_m = 0.015$  و تعداد تکرار  $2000$  انتخاب می‌شود. تحت شرایط فوق، نتایج مقادیر بهینه ۵ پارامتر فرآیند و پاسخ خروجی متناظر دو تبدیل تابع برازش در جدول (۵) درج شده‌است. بطوریکه از این جدول ملاحظه می‌شود میانگین واریانس اندازه ذرات کوچکتر از مقادیر متناظر در جدول (۲) می‌باشد و همچنین میانگین اندازه ذرات نزدیک به  $100$  نانومتر

- [3] Problems and Opportunities”, *Nanostructured Materials* 9, pp 13–22.
- [4] Suryanarayana, C., 2001, *Mechanical Alloying and Milling*, *Progress in Materials Science* 46, pp 1–184.
- [5] Frances C., 2004, “On Modelling of Submicronic Wet Milling Processes in Bead Mills”, *Powder Technology*, 143, pp 253–263.
- [6] Mori, H., Mio, H., Kano, J. and Saito, F., 2004, “Ball Mill Simulation in Wet Grinding Using a Tumbling Mill and its Correlation to Grinding Rate”, *Powder Technology*, 143, pp 230–239.
- [7] Mende, S., Stenger, F., Peukert, W. and Schwedes, J., 2003, “Mechanical Production and Stabilization of Nanoparticles in Stirred Ball Mills”, *Powder Technology*, 132, pp 64–73.
- [8] Zhang, D.L., 2004, “Processing of Advanced Materials Using High-Energy Mechanical Milling”, *Progress in Materials Science*, 49, pp 537–560.
- [9] H. Sunada, Y. Bi, 2002, “Preparation, Evaluation and Optimization of Rapidly Disintegrating Tablets”, *Powder Technology*, 122, pp 188–198.
- [10] Reh, L. and Ye, H., 2000, “Neural Networks for On-line Prediction and Optimization of Circulating Fluidized Bed Process Steps”, *Powder Technology*, 111 pp 123–131.
- [11] Fan, S. K., 2000, “Quality Improvement of Chemical–Mechanical Wafer Planarization Process in Semiconductor Manufacturing Using a Combined Generalized Linear Modeling/ Non-linear Programming Approach, *Int. J. of Production Research* 38, pp 3011–3029.
- [12] DoniaVi A., Mileham, A. R and Newnes, L.B., 2000, “A Systems Approach to Photolithography Process Optimization in an Electronics Manufacturing Environment, *Int. J. of Production Research*, 38, pp 2515–2528.

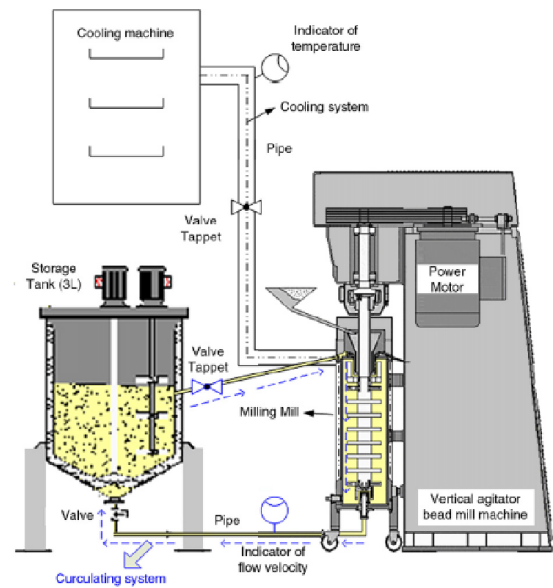
در این مطالعه، به منظور تعیین پارامترهای بهینه و اثر آنها در فرآیند فرزکاری نانوذرات از روش تجمعی طراحی پارامتر تاگوچی، RSM و رویکرد GA استفاده شده است. بدین معنی که آزمایش بردار متعامد برای تعیین اندازه‌های بهینه پاسخ خروجی انجام شده است. پس از آن تحلیل واریانس و نمودار اثر اصلی برای تعیین پارامترهای مهم و تنظیم سطح بهینه هر کدام از آنها به عمل آمده است. بالاخره با استفاده از روش RSM تابع برازش برای ایجاد ارتباط میان پارامترهای ورودی و پاسخ‌های خروجی فرآیند تعیین که برای اندازه‌گیری مقدار برازش در روش GA به کار رفته است. سرانجام با رویکرد GA، پارامترهای بهینه فرآیند تعیین گردیده است. این پارامترهای بهینه شامل زمان فرزکاری، سرعت سامانه چرخشی، سرعت چرخشی همزن، غلظت حلال، تعداد ساچمه‌های سایشی و اثرات متقابل میان زمان فرزکاری و تعداد ساچمه‌های سایشی می‌باشد. مقدار بهینه هر کدام از این پارامترها در فرآیند مورد مطالعه در جدول (۵) نشان داده شده است. در این مطالعه دو الگوی خطی و غیرخطی برای پاسخ‌های خروجی فرآیند پیدا شد که با تبدیل مناسبی این دو الگو به یک الگوی تک‌هدفی تبدیل شد. نتایج نشان می‌دهد که تبدیل فوق پارامترهای بهینه مشابهی را در فرآیند فرزکاری نانوذرات بدست می‌دهد. با وجود این، ممکن است که تضادی در پاسخ‌های خروجی، وجود داشته باشد، بدین معنی که پارامترهای بهینه فرآیند که میانگین اندازه ذرات کوچکتری را بدست می‌دهند، ممکن است منجر به واریانس بزرگتری شود. بنابراین، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفی برای حل این مسئله در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

#### ۱۱- مراجع

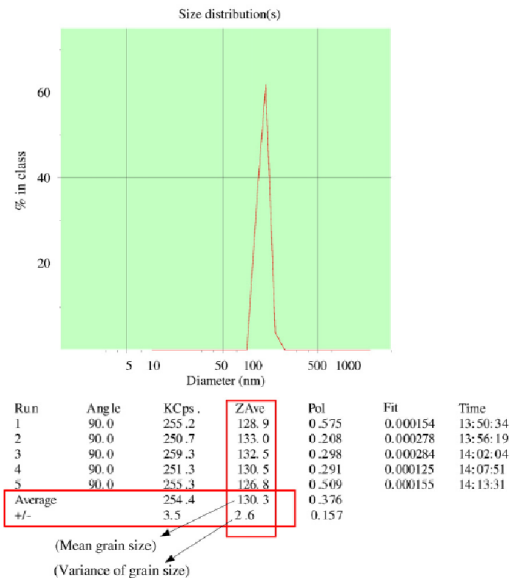
- [1] Ramanujan, R.V. *Nanostructured electronic and magnetic materials*, 2003, *Sadhana* 28, pp 81–96.
- [2] Koch, C.C., 1997, “Synthesis of Nanostructured Materials by Mechanical Milling:



شکل (۲): نمودار جریان روش تجمعی

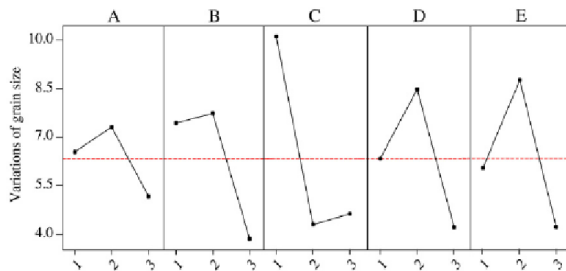


شکل (۱): طرحواره یک ماشین فرز با مخزن عمودی که توسط مرکز توسعه و تحقیق ماشین آلات دقیق (PMC) ابداع شده است [۲].

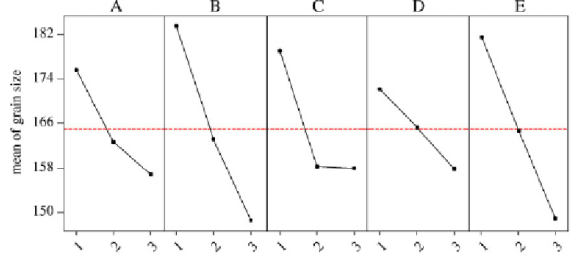


شکل (۳): نتایج اندازه‌گیری میانگین اندازه نانوذرات و واریانس آن

برای آرایه ۲۱ بردار متعامد (جدول ۲)



شکل (۵): نمودار اثر اصلی خروجی ۲



شکل (۴): نمودار اثر اصلی خروجی ۱

جدول (۱): پارامترهای موثر در فرآیند فرزکاری نانوذرات و حدود

تغییرات هرکدام از آنها

پارامترها	حدود تغییرات		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
زمان فرزکاری (ساعت)	۲	۵	۸
سرعت جریان سامانه گردشی (لیتر بر دقیقه)	۱	۲	۳
سرعت چرخشی همزن (دور بر دقیقه)	۱۲۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰۰
غلظت حلال (%)*	۱	۴	۷
میزان ریزش ماده سایشی (ZrO <sub>2</sub> )* (%)	۵	۱۵	۲۵

\* درصدی از حجم فرز

جدول (۴): تحلیل واریانس اندازه میانگین نانوذرات

پارامتر	مجموع مربعات	درجه آزادی	کمینه مربعات	F <sub>0</sub>
A	۲۱/۴۹	۲	۱۰/۷۴۵	۱/۶۴
B	۸۵/۰۶	۲	۴۲/۵۳	۶/۵۱
C	۱۹۳/۸۶	۲	۹۶/۹۳	۱۴/۸۴
D	۸۱/۹۲	۲	۴۰/۹۶	۶/۲۷
E	۹۴/۶۳	۲	۴۷/۳۱۵	۷/۲۴
A×C	۳۳/۲۲	۴	۸/۳۰۵	۱/۲۷
A×E	۲۷/۸۶	۴	۶/۹۶۵	۱/۰۷
خطا	۵۲/۲۶	۸	۶/۵۳۲	
مجموع	۵۹۰/۳	۲۶		

جدول (۳): تحلیل واریانس اندازه میانگین نانوذرات

پارامتر	مجموع مربعات	درجه آزادی	کمینه مربعات	F <sub>0</sub>
A	۱۶۷۰/۸	۲	۸۳۵/۴	۱۱۷/۰۰
B	۵۶۱۳/۲	۲	۲۸۰۶/۶	۳۹۳/۱۰
C	۲۶۵۰/۸	۲	۱۳۲۵/۴	۱۸۵/۷۰
D	۹۳۶/۴۳	۲	۴۶۸/۲	۶۵/۵۹
E	۴۷۸۰/۶	۲	۲۳۹۰/۳	۳۳۴/۸۰
A×C	۶۵/۲۱	۴	۱۶/۳	۲/۲۸
A×E	۱۴۳/۹۷	۴	۳۵/۹۹	۵/۰۴
خطا	۵۷/۱۱	۸	۷/۱۴	
مجموع	۱۵۹۱۸	۲۶		

جدول (۵): پارامترهای بهینه تعیین شده به روش تجمعی برای دو راهبرد مختلف

خروجی	پارامترها						راهبرد
	y <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	x <sub>5</sub> (E)	x <sub>4</sub> (D)	x <sub>3</sub> (C)	x <sub>2</sub> (B)	
راهبرد ۱	۰/۲۴	۱۰۹/۵۵	۲۴/۸۶	۶/۹۶	۱۷۹۳	۲/۹۷	۶/۴۲
راهبرد ۲	۰/۵۴	۱۰۸/۱۳	۲۴/۶۵	۵/۸۰	۱۹۶۸	۲/۹۶	۶/۲۷

جدول (۲): بردار متعامد  $L_{27} (3^3)$  و پاسخ‌های خروجی

پاسخ‌های خروجی		پارامترهای فرآیند														ردیف
اندازه ذرات		e	e	D	e	e	B	A×E	A×E	E	A×C	A×C	C	A		
واریانس	میانگین															
۸/۵	۲۳۲/۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
۲۱/۱	۱۸۲/۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲	
۵/۷	۱۵۴/۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۳	
۰/۸	۱۸۱/۰	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۴	
۱/۲	۱۵۹/۲	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۵	
۸/۴	۲۲۴/۸	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۶	
۵/۱	۱۶۹/۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۱	۷	
۵/۹	۱۷۱/۸	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۸	
۶/۶	۲۰۷/۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۹	
۱۵/۹	۲۱۷/۹	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۲	۱۰	
۱۶/۶	۱۷۴/۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۲	۱۱	
۱/۸	۱۳۳/۰	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۲	۱۲	
۶/۱	۱۶۴/۵	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۱۳	
۵/۷	۱۴۷/۶	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۲	۱۴	
۵/۲	۱۵۸/۸	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۲	۱۵	
۴/۲	۱۵۶/۷	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۲	۱۶	
۶/۵	۱۶۹/۱	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱۷	
۳/۸	۱۴۲/۶	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱۸	
۸/۳	۲۱۳/۲	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۳	۱۹	
۱۰/۶	۱۷۴/۴	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۳	۲۰	
۲/۶	۱۳۰/۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۲۱	
۲/۹	۱۵۱/۰	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۳	۲۲	
۵/۷	۱۳۸/۷	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۲۳	
۴/۷	۱۵۲/۳	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۳	۲۴	
۲/۵	۱۴۸/۱	۱	۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۳	۲۵	
۵/۶	۱۶۵/۷	۲	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۳	۲۶	
۳/۵	۱۳۸/۶	۳	۳	۱	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۳	۲۷	

