مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر ۱۳۹۹، دوره ۷، شماره ۷، ص.ص. ۲۴- ۳۷

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی نیروی محوری، گشتاور برشی و زبری سطح قطعات متالورژی پودر بازیابی از براده‌ها و تفجوشی شده با استفاده از طراحی آزمایش‌ها همگام با آنالیز حساسیت

معین طاهری[۱*]، سیدحسن بطحائی[۲]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* اراک، صندوق پستی ۳۸۱۵۶۸۸۳۴۹، m-taheri@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۷ آبان ۱۳۹۸

داوری اولیه ۱۹ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۱ اسفند ۱۳۹۸

کلیدواژگان:

متالورژی پودر

تفجوشی

طراحی آزمایش‌ها

آنالیز حساسیت

روش آماری ای-فست

چکیده

بازیابی براده‌های ماشین‌کاری شده به صورت پودرهای قابل استفاده در صنعت متالورژی دارای مزیت اقتصادی بسیار مطلوبی است. به‌منظور بهینه‌سازی این فرایند و بهره‌وری هرچه بیشتر بازیابی براده‌های چدن خاکستری با استفاده از روش آسیاب پاششی از تکنیک طراحی آزمایش‌ها همگام با آنالیز حساسیت در این مقاله استفاده شده است. از طریق طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش رویه پاسخ چهار فاکتور اصلی به‌عنوان متغیرهای ورودی، شامل درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی استخراج شده است. این متغیرهای ورودی بر روی سه خروجی مهم از قابلیت‌های ماشین‌کاری شامل، نیروی محوری، گشتاور سوراخ‌کاری و زبری سطح بر پایه‌ی آنالیز حساسیت بررسی شده‌اند. روش آنالیز حساسیت مورد استفاده که بر پایه‌ی تحلیل واریانس پی‌ریزی شده است، ای-فست می‌باشد. آنالیز حساسیت روش آماری است، که منجر به توصیف تغییرات کمی و کیفی متغیرهای ورودی بر روی عوامل خروجی می‌شود. در بررسی‌های کمی درصد تأثیرگذاری هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی عوامل خروجی به‌صورت مجزا به‌دست آمده است. برای نیروی محوری اثر متغیرهای ورودی به ترتیب با ۳۷٪، ۳۱٪، ۲۷٪ و ۵٪ برای درصد پودر چدن، دمای تفجوشی، فشار تراکم و زمان تفجوشی به‌دست آمده است. همچنین برای گشتاور سوراخ‌کاری اثرگذاری پارامترها به ترتیب ۴۴٪ درصد پودر چدن، ۳۸٪ فشار تراکم، ۱۵٪ دمای تفجوشی و ۳٪ زمان تفجوشی می‌باشد. درصد پودر چدن، فشار تراکم، دما و زمان تفجوشی به ترتیب با ۲۶٪، ۴۹٪، ۱۹٪ و ۶٪ بر روی زبری سطح تأثیر داشته‌اند.

Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis

Moein Taheri[1*], Seyed Hasan Bathaee[2]

1. Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran
2. Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 8 October 2019
First Decision: 4 January 2020
Accepted: 17 February 2020

Keywords:
Powder metallurgy
Sintering
Design of experiments
Sensitivity analysis
E-fast statistical method

Abstract

Recovery of machined filings in the form of powder used in the metallurgy industry has a very favorable economic advantage. In order to optimize this process and maximize the efficiency of recovering gray cast iron filings by spray mill method, the experimental design techniques are used in conjunction with the sensitivity analysis in this paper. By Design of experiments based on the response procedure, four main factors were extracted as input variables including cast iron powder, compression pressure, sintering temperature and sintering time. These input variables are investigated on three important outputs of machining capabilities including axial force, drilling torque and surface roughness based on sensitivity analysis. The sensitivity analysis method, which is based on the analysis of variance, is E-fast. The sensitivity analysis is a statistical method results in describing the quantitative and qualitative changes of the input variables on the output factors. For the axial force, the effect of the input variables was obtained with 37%,31%,27%,5% for cast iron powder, sintering temperature, compression pressure and sintering time, respectively. Also for drill torque, parameter impressment is 44% cast iron powder, 38% compression pressure, 15% sintering temperature and 3% sintering time, respectively. Cast iron powder percentage, compression pressure, sintering temperature and time have impressed on surface roughness, respectively with 26 %, 49 %, 19%, 6%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Taheri, S. H. Bathaee, Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis, Vol. 7, No. 7, pp. 24- 37, 2020 (in Persian)

۱- مقدمه

روش‌های تولید پودر به دو دسته تقسیم می‌شوند، ۱- پودر تولید شده به عنوان محصول فرایندهای متالورژی پودر ۲- پودر تولید شده از ضایعات به روش‌های مختلف اعم از آسیاب پاششی و همچنین روش مهندسی ریزساختاری که برای تولید تیتانیوم به صورت متالورژی پودر بسیار مقرون به‌صرفه است[۱]. یکی از کاربردهای متالورژی پودر ساخت فولاد وانادیوم با سرعت بسیار بالا است[۲]. تولید فولاد از این طریق باعث افزایش مقاومت در برابر سایش و کاهش دمای اولیه می‌شود. همچنین موادی که به روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند از هدایت الکتریکی مطلوب تری برخوردار هستند[۳]. ساخت کامپوزیت‌هایی متشکل از آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی بر پایه روش متالورژی پودر باعث یکپارچگی ساختاری و پیوند فازی مطلوب بین آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی می‌شود، که در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی و چقرمگی شده است[۴]. پودرهای به دست آمده در صنعت متالورژی از روش بازیابی براده‌های ماشین‌کاری صرفه اقتصادی بسیار خوبی را دارا هستند. چدن خاکستری به‌دلیل داشتن مقدار بالای تولید، شکنندگی، اندازه کوچک براده، قیمت پایین و آلوده نکردن روانکار دارای قابلیت بسیار خوبی برای این انجام این فرایند است[۵].

اشباع و توزیع همگن نانومواد بر روی سطوح فلز همیشه یک چالش جدی برای پژوهشگران در دهه اخیر بوده است. در یک بررسی توسط شرما و همکارانش اشباع گرافن از طریق یک فرایند اصطکاکی بر مبنای متالورژی پودر مورد تحقیق قرار گرفته است. در این آزمایش که یک ترکیب آلومینیوم-گرافن از طریق متالورژی پودر ساخته شد با استفاده از پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترون روبشی مورد تست قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌هایی پایین چرخش توزیع همگن گرافن باعث بهینه شدن خواص مکانیکی شده است[۶]. ورما و همکارانش به ساخت یک نوع فولاد با استفاده از پودر فولاد نانوساختار با بهره‌گیری از ضایعات فولاد صنعتی متشکل از فولاد کم کربن بر پایه‌ی روش آسیاب پاششی دست یافته‌اند. این پودرها با استفاده از پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترون روبشی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند[۷].

سان و همکارانش در یک مطالعه و آزمایش بر روی کامپوزیت‌های منیزیوم تقویت شده با استفاده از متالورژی پودر همراه با فشار بسیار بالا و خشک کردن سریع به این نتیجه دست یافته‌اند که خواص مکانیکی و مقاومت به سایش بسیار بالا ایجاد شده است. همچنین آزمایش‌ها نشان داده است که سختی منیزیوم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است[۸]. سودهاکار در یک آزمایش سختی سنجی بر روی فولاد ساخته شده از متالورژی پودر آهن-نیکل در دمای اتاق میزان خستگی و استقامت آن را مورد تحقیق و بررسی قرار داده است. نتایج با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی نشان می‌دهد که ریزساختار بودن تأثیر بسیار زیادی بر میزان استقامت و خستگی داشته است[۹]. شن و همکارانش در یک آزمایش نشان داده‌اند که اکسیژن و نیتروژن اثر بسیار بالایی بر روی فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن گذاشته‌اند. در یک آزمایش تجربی نمونه‌هایی از فلز تیتانیوم با اکسیژن و محلول جامد نیتروژن بر پایه‌ی روش متالورژی پودر ترکیب شده است. نتایج نشان می‌دهد که هنگام حل شدن یک ترکیب غیریکنواخت توزیع می‌شود و ذرات نیتروژن به‌عنوان یک عضو تقویت‌کننده شناخته شده‌اند. همچنین انعطاف‌پذیری تیتانیوم از این روش بسیار بهبود یافته است[۱۰]. نویل و ربیعی یک سلول فلزی کامپوزیتی با استفاده از روش متالورژی پود را تولید کرده‌اند. بر این اساس فضای خالی بین ساختارها با پودر فولاد و پختن آن‌ها به صورت یک ساختار جامد از بین رفته است. این سلول برای دو نمونه از مواد با جنس فولاد کم‌کربنی و فولاد ضد زنگ مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته است. توانایی جذب انرژی در نمونه فولاد کم‌کربن بسیار بیش‌تر از فولاد ضدزنگ بوده است[۱۱]. تف‌جوشی[1]یکی از روش‌های متداول شکل‌دهی فلزات است. تف‌جوشی چسباندن یا چسبیدن ذرات یک یا چند ماده به یکدیگر از طریق ذوب سطحی بر اثر حرارت همراه با فشار یا بدون آن به صورتی که یک توده جامد تشکیل شود است. این فرایند که مبتنی بر کاهش انرژی آزاد سطحی ذرات در اثر چسبیدن به یکدیگر است[۱۲]. پودر چدن در تف جوشی عامل بسیار مهم و تأثیرگذاری به‌شمار می‌رود. برای مثال افزودن پودر چدن خاکستری به پودر آهن یک قطعه متالورژی پودر آلیاژی با کیفیت مقاومت به سایش بالا و خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب ایجاد می‌کند. همچنین این عمل باعث کاهش چشمگیر مصرف پودر آهن می‌شود که بسیار گران‌تر از چدن است[۱۳]. بررسی قابلیت‌های ماشین‌کاری قطعات تف‌جوشی شده متالورژی پودر پایه آهنی کم آلیاژ در عملیات سوراخ‌کاری توسط زامپا و همکارانش صورت گرفته است. آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل جنس ابزار برش و شرایط برش بر روی یکپارچگی لبه‌های سوراخ‌های ماشین‌کاری را بررسی کرده‌اند[۱۴]. برای تبدیل براده‌های ماشین‌کاری به پودرهای

[1] Sintering

قابل استفاده در صنعت متالورژی مکانیزم‌های مختلفی وجود دارد. برای تبدیل براده‌های چدن خاکستری به پودر، اغلب از روش‌های مکانیکی از قبیل آسیاب‌ها که انواع مختلفی اعم از آسیاب گلوله‌ای، آسیاب لرزشی، آسیاب چکشی استفاده می‌شود[۱۵]. تمامی این روش‌ها دو عیب عمده شامل زمان‌بر بودن و نیاز به عملیات ثانویه آنیلینگ بر روی پودرها را دارند. همچنین خواص مکانیکی پودرهای تولید شده با استفاده از این آسیاب‌ها ضعیف است[۱۶]. آسیاب پاششی یک روش نوین مکانیکی برای تبدیل براده‌های ماشین‌کاری به پودر است. در این روش دو عیب عمده، زمان‌بر بودن و نیاز به عملیات تکمیلی از جمله آنیلینگ حذف شده است و این روش با سرعت بسیار بالایی انجام می‌شود. اساس آن حرکت براده‌ها همراه با یک جریان سریع از هوا و برخورد به یک صفحه هدف چدنی است، که باعث متلاشی شدن براده‌ها می‌شود[۱۷].

عبداللهی و همکارانش به بررسی قابلیت ماشین‌کاری قطعات متالورژی پودر خام و تف‌جوشی آهن-چدن خاکستری بازیابی شده پرداخته‌اند. آن‌ها از تحلیل‌های رگرسیون و واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بهره‌گیری کرده‌اند. نتایج صحت معادلات رگرسیون استخراجی برای پیش‌بینی خواص ماشین‌کاری قطعات تف‌جوشی را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد افزودن پودر چدن خاکستری به دست آمده از روش مکانیکی آسیاب پاششی باعث بهبود قابلیت ماشین‌کاری قطعات متالورژی پودر پایه آهنی شده است[۱۸]. از روش‌های نوین در تحلیل حساسیت بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر فاکتورهای خروجی است. یکی از دقیق‌ترین روش‌های آنالیز حساسیت[1] روش سوبل است. طاهری با استفاده از روش سوبل به بررسی اثر پارامترهای ابعادی بر روی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن پرداخته است. نتایج این بررسی نشان داده است، که پارامترهای ضخامت تیرک و طول تیرک اثرگذارترین پارامترها بر نیروهای بحرانی و پارامترهای ارتفاع سوزن و ضخامت تیرک اثرگذارترین پارامترها بر زمان‌های بحرانی هستند[۱۹]. یکی از روش‌های دقیق و سریع در آنالیز حساسیت، روش آنالیز حساسیت ای-فست[2]می‌باشد. طاهری با استفاده از روش ای-فست به بررسی تأثیر شش فاکتور ابعادی شامل طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، شعاع ذره و شعاع نوک سوزن بر روی نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن نانوذرات پرداخته است. نتایج آنالیز حساسیت نشان داده است، فاکتور ضخامت تیرک اثرگذارترین فاکتور بر روی نیروی بحرانی و فاکتور ارتفاع سوزن بیشترین تأثیر را بر روی میزان زمان بحرانی منیپولیشن داشته است[۲۰]. تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته است، که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. استفاده صحیح از روش‌های طراحی آزمایش‌های آماری می‌تواند باعث سهولت در مراحل طراحی و تولید محصولات گردد. همچنین استفاده از این روش‌ها باعث ارتقاء سطح قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد محصولات تولید شده می‌گردد. روش طراحی آزمایش‌ها[3] یکی از روش‌های آماری بهبود کیفیت است که به‌وسیله‌ی آن می‌توان متغیرهای کلیدی که برمشخصه کیفی موردنظر فرایند اثر می‌گذارد را شناسایی نمود[۲۱].

با به‌کارگیری این روش می توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را به‌طور سیستماتیک تغییر داد و اثر آن‌ها را بروی پارامترهای محصول خروجی ارزیابی نمود[۲۲]. آنالیز حساسیت به مطالعه‌ی چگونگی عدم قطعیت در خروجی مدل (عددی و غیر عددی) ناشی از منابع مختلفی از عدم قطعیت در عامل‌های ورودی مدل گفته می‌شود[۲۳]. روش ای-فست یکی از روش‌های آنالیزحساسیت آماری و مستقل از مدل است، که بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل واریانس می‌باشد. از آن برای مدل‌های خطی و غیرخطی که تعداد نمونه‌های کمی برای تحلیل موجود دارند استفاده می‌شود[۲۴]. طراحی آزمایش‌ها یک ابزار ارزشمند و قدرتمند در شناسایی پارامترهای بحرانی، بهینه‌سازی فرایندهای شیمیایی و تشخیص مناطق کارآمد برای انجام عملیات حیاتی در فرایندها است[۲۵]. انتخاب پارامترها برای توسعه‌ی یک مدل آنالیز حساسیت مشکلی است که چندین دهه مورد مطالعه و بررسی محققان قرار گرفته است. اما هیچ روشی وجود ندارد که انتخاب صحیح و درست پارامترها را به صورت مطمئن تضمین کند. یک روش برای رفع این مشکل انتخاب یک تابع ارزیابی جدید به همراه یک شاخص حساسیت مرکب است که تصریح مجموعه‌ای از پارامترها با استفاده از روش آزمون و خطا انجام شده است[۲۶].

روش طراحی آزمایش‌ها یکی از روش‌های آماری بهبود کیفیت است. آنالیز حساسیت باعث افزایش صحت و دقت اعتبار سنجی، بهینه‌سازی و ریسک‌پذیری در تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی مدل‌ها می‌شود[۲۷].

[1] Sensitivity Analysis
[2] E-fast
[3] DOE: Design of Experiments

مدل‌سازی سریع و بهینه‌سازی فرایندها برای دستگاه و سیستم‌ها یک امر ضروری برای پشتیبانی از توسعه تکنولوژی و بهبود عملکرد آن است. بونیگ برای تحقق این امر یک نمونه و سیستم یکپارچه با عنوان بهینه سازی طراحی آزمایش‌ها برای انجام طراحی آزمایش‌ها معرفی کرده است. در این سیستم شبیه‌سازی با استفاده از یک ابزار آزمایشی که از طریق یک زبان برنامه‌نویسی تعبیه شده است، صورت می‌گیرد. نتایج خروجی سیستم در قالب مدل‌های رگرسیون استخراج شده است. بهینه‌سازی محدودیت‌های غیرخطی با استفاده از مدل‌های رگرسیون تا میزان قابل توجهی بهبود بخشیده شده است[۲۸].

یک روش جدید برای یافتن عیوب در ریخته‌گری ارائه شده است، که مبتنی بر تجزیه و تحلیل است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای رطوبت، میزان فشرده‌سازی و مقدار نفوذپذیری تأثیر بسزایی در صنعت ریخته‌گری می‌گذارند[۲۹].

روش‌های تجزیه و تحلیل به دو دسته‌ی کلاسیک و مدرن طبقه‌بندی شده‌اند. روش کلاسیک برای آزمایش‌ها غیرانعطاف پذیر بوده است، در روش مدرن بیش از ۱۰۰ فاکتور مهم فرایندها با استفاده از روش‌های غربالگری، نمونه‌برداری و طراحی آزمایش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد[۳۰].

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش نوین آنالیز حساسیت آماری ای-فست باکمک تکنیک طراحی آزمایش‌ها ۴ متغیر ورودی و تأثیرگذار، درصد پودرچدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی بر روی قابلیت ماشین‌کاری قطعاتی که از طریق بازیابی براده‌ها به صورت تفجوشی از طریق آسیاب پاششی به‌دست آمده‌اند، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در بخش مدل‌سازی به توضیح و تشریح تکنیک طراحی آزمایش‌ها مبنی بر روش رویه پاسخ پرداخته شده است، سپس در بخش بعدی شیوه‌ی نوین آنالیز حساسیت آماری ای-فست به همراه روابط و فرمولاسیون آن ذکر شده است. بخش شبیه‌سازی شامل دو بخش کلی در قالب نمودارهای پراکندگی جهت تحلیل کیفی و نمودارهای دایره‌ای جهت تحلیل کمی نمایش داده شده‌اند. از میان متغیرهای ورودی درصد پودر چدن و فشار تراکم بیشترین و زمان تفجوشی کمترین میزان تأثیر بر روی سه قابلیت ماشین‌کاری نیروی محوری، گشتاور سوراخ‌کاری و زبری سطح داشته‌اند. همچنین استفاده از آنالیز حساسیت ای-فست باعث شده است که میزان بهینه‌سازی آزمایش‌ها و تولید قطعات به بیشینه مقدار بهینه خود رسیده و درصد خطا به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد.

۲- مدل‌سازی

در این پژوهش مدل‌سازی از دو بخش تشکیل شده است

- طراحی آزمایش‌ها
- مدل آنالیز حساسیت شامل تشریح روش آماری ای-فست

۲-۱- طراحی و انجام آزمایش‌ها

یکی از مسائل مهم و پیچیده در طراحی قطعات و محصولات به‌خصوص در صنایع حساس و دقیق (مانند صنایع هوایی، فضایی و ...) انتخاب مقدار بهینه تلرانس برای اجزای تشکیل دهنده، می‌باشد. عموماً مهندسان طراحی تمایل دارند تلرانس ها را بسته در نظر گیرند تا محصول از لحاظ عملکردی و قابلیت اطمینان در سطح بالایی قرار گیرد و این در حالی است که مهندسین ساخت‌وتولید تمایل دارند تا از تلرانس‌های باز استفاده کنند تا فرایند تولید راحتتر، ارزان‌تر و عملیاتی‌تر باشد. در این مواقع مهم‌ترین مساله مطالعه توازنبین دو مقوله تلرانس و سایر عوامل متاثر از آن از قبیل کیفیت ، هزینه، تولید و .... می‌باشد. روش رویه پاسخ[1] به‌عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای ایجاد توابع ریاضی به منظور یافتن رابطه منطقی بین پارامترهای ورودی و خروجی و بهینه‌سازی فرایندهای تولید مختلف، از جمله متالورژی پودر به‌کار می‌رود[۳۳،۳۴]. متغیرهای ورودی فرایند در جدول ۱ آمده است[۱۸].

برای بررسی خواص قطعات تفجوشی شده، پارامترهای درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی به‌عنوان متغیرهای ورودی فرض شده‌اند. با توجه به چهار متغیر ورودی برای انجام و طراحی آزمایش‌ها شامل درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی از طریق تکنیک طراحی آزمایش‌ها برای بررسی نیروی محوری و نیروی گشتاوری به دست آمده است، که اثر هریک از این پارامترها در آن شرح داده شده است[۱۸].

جدول ۱ متغیرهای مستقل فرایند

Table 1 Process independent variables

متغیر	علامت	واحد	کمینه	بیشینه
درصد پودر چدن	CIP	[-]	۳۰	۷۰
فشار تراکم	P	[MPa]	۴۰۰	۸۰۰
دمای تفجوشی	STe	[°C]	۱۰۵۰	۱۱۷۰
زمان تفجوشی	STi	[min]	۲۰	۶۰

[1] Regression analysis

نیروی محوری ماشین‌کاری: متغیرهای ورودی درصد پودر چدن، فشار تراکم و دمای تف‌جوشی تقریباً به یک میزان بر روی نیروی محوری ماشین‌کاری مؤثر هستند، اما تأثیر زمان تف‌جوشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از تأثیر سایر متغیرهای ورودی است. با توجه به متغیرهای مؤثر و همچنین ضرایب به‌دست آمده از تحلیل آن‌ها، معادله رگرسیون برای پیش‌بینی نیروی محوری در عملیات سوراخ‌کاری به صورت معادله (۱) است:[۱۸].

$$F_{th} = 119.31 - 8.35CIP + 7.20P + 7.75STe + 2.89STi \quad (۱)$$

گشتاور سوراخ‌کاری: تمامی متغیرها شامل درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تف‌جوشی و زمان تف‌جوشی در میزان گشتاور سوراخ‌کاری مؤثر هستند. در این بخش درصد پودر چدن بیشترین تأثیر را بر روی گشتاور سوراخ‌کاری دارد. معادله‌ی رگرسیون برای پیش‌بینی گشتاور سوراخ‌کاری به شرح معادله (۲) است[۱۸].

$$T = 2.83 - 0.46CIP + 0.42P + 0.28STe + 0.12STi - 0.14CIP \times P \quad (۲)$$

زبری سطح: چهار پارامتر ورودی به‌دست آمده از طراحی آزمایش‌ها هر بر زبری سطح قطعات تأثیرگذار بوده‌اند. زبری سطح بر خلاف گشتاور سوراخ‌کاری به صورت عمده‌ای به درصد پودر چدن وابسته نبوده است و از معادله رگرسیون آن مشاهده می‌شود، که فاکتور اصلی تأثیرگذار بر آن فشار تراکم است[۱۸].

$$R_a = 2.64 - 0.29CIP + 0.43P + 0.28STe + 0.15STi - 0.06CIP + CIP + 0.06P \times P + 0.05ST_e \times ST_e - 0.12CIP \times P \quad (۳)$$

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی چدن خاکستری با استفاده از روبشگر الکترونیکی[1]نمایش داده شده است. در شکل ۱- الف براده‌های حاصل از چدن خاکستری که به‌منظور بازیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱- ب محصول نهایی تولید شده از بازیابی براده‌ها با استفاده از روش نوین آسیاب پاششی بر مبنای متالورژی پودر نمایان شده است.

در جدول ۲ ویژگی‌های عمومی چدن خاکستری بیان شده است. به‌طور کلی خواص چدن‌ها به‌شدت وابسته به این موضوع است که چه مقدار کربن به‌صورت آزاد و چه‌مقدار به‌صورت ترکیبی در ساختار آن‌ها یافت می‌شود. حتی نوع شکل گرافیت و زمینه چدن نیز روی ویژگی‌های آن‌ها تأثیرگذار است.

[1] SEM

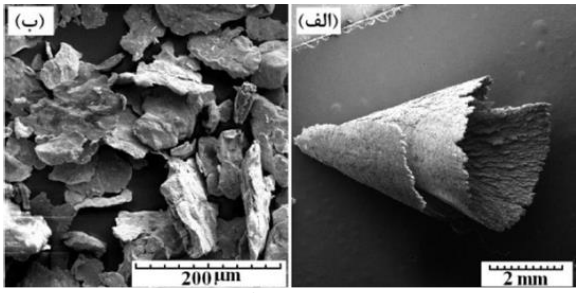


Fig. 1 Microscopic images of gray cast iron chips, A) image and Size of gray cast iron chips used to produce powder, B) Powders Final produced by spray mill method

شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی براده‌های چدن خاکستری[۱۸]،الف) شکل و اندازه براده‌های چدن خاکستری استفاده شده برای تولید پودر، ب) پودرهای نهایی تولید شده به روش آسیاب پاششی

جدول ۲ ویژگی‌های چدن خاکستری

Table 2 Gray cast iron features

شکل کربن در چدن	انواع زمینه فلزی موجود در چدن	رنگ مقطع شکست چدن در حالت ماکروسکوپی	ویژگی چدن
گرافیت ورقه‌ای	فریت، پرلیت پرلیت+فریت	خاکستری	قابلیت ماشین‌کاری- انتقال حرارتی مطلوب- جذب ارتعاش و صدا

۲-۲- بررسی روش آنالیز حساسیت ای-فست

آنالیز حساسیت به مطالعه‌ی چگونگی عدم قطعیت در خروجی مدل (عددی و غیر عددی) ناشی از منابع مختلفی از عدم قطعیت در عامل‌های ورودی مدل گفته می‌شود[۳۱]. هنگامی که یک سیستم مکانیکی یا ساختاری طراحی و مدل‌سازی می‌شود، فهم خصوصیات این سیستم حائز اهمیت می‌باشد. آنالیز حساسیت به محققان و طراحان، اطلاعات مفید و قانع کننده‌ای در مورد اصلاح، بهینه‌سازی و سایر موارد مشابه ارائه می‌دهد. در واقع آنالیز حساسیت مطالعه‌ی این موضوع است که چگونه عدم قطعیت در خروجی مدل (عددی و غیر عددی) می‌تواند به منابع مختلفی از عدم قطعیت در فاکتورهای ورودی مدل تقسیم‌بندی شود. بایستی به این نکته اشاره شود که در بحث آنالیز حساسیت، همواره دو رویکرد اصلی مد نظر است. مورد اول، تحقیق در مورد تأثیر تغییرات کوچکِ برخی یا همه‌ی مقادیر اولیه و تأثیر آن در جواب نهایی، که آنالیز اغتشاشات نام دارد. مورد دوم، تعریف بعضی از مشخصات ویژه در حل مسائل بهینه‌سازی (خطی) و تحقیق در مورد این که چه اندازه می‌توان مقادیر اولیه را تغییر داد، بدون این که تأثیر منفی روی مشخصات مورد نظر در خروجی بگذارد، که به آن محدوده‌ی پذیرش یا منطقه‌ی بحرانی گفته می‌شود.

عملکرد روش آنالیز حساسیت ای-فست که بر پایه‌ی واریانس

است، برای مدل‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد. همچنین تعداد نمونه‌هایی که برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود کم است. مزیت اصلی این روش دقت کمتر آن نسبت به سایر مدل‌های آنالیز حساسیت بر پایه‌ی واریانس است.

روش ای-فست فضای n بعدی فاکتورهای ورودی (K^n) را با استفاده از منحنی جست‌وجوی تعریف شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند. طبق رابطه‌ی (۴):

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\arcsin[\sin(\omega_i s + \varphi_i)] \qquad (۴)$$

که ω_i $(i = 1.2. \dots . n)$ فرکانس مربوط به فاکتور $s.x_i$ متغیری است که در بازه‌ی $-\pi$ تا π تغییر می‌کند و φ_i نقطه‌ی شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس مدل را می‌توان به واریانس عامل‌ها و عکس‌العمل‌های آن‌ها تقسیم کرد. طبق تئوری ویل[1] r مین‌گشتاور خروجی y در طول منحنی به صورت رابطه‌ی (۵) به‌دست می‌آید[۲۳].

$$\bar{Y}^{(r)} = \lim_{\tau\to\infty} \frac{1}{2\tau}\int_{-\tau}^{\tau} f[x_1(s).x_2(s). \dots x_n(s)]\, ds \qquad (۵)$$

تئوری ویل بر این دلالت دارد که:

$$< Y^{(r)} \cong \bar{Y}^{(r)} > \qquad (۶)$$

واریانس مدل برابر است با:

$$D = y^{(2)} - < y^{(1)} > \cong \bar{y}^2 - (\bar{y}^{(1)})^2 \qquad (۷)$$

ترم‌های معادله (۷) از معادله (۵) به دست می‌آیند. بنابراین عدد گویای محدود و مثبت مانند τ وجود دارد که $f(s+\tau) = f(s)$ از این‌رو منحنی در مسیر بسته تعریف می‌گردد. برای سادگی را به‌صورت $f(s)$ نشان می‌دهیم. با فرض $f(s)$ در بازه معادلات (۵) و (۶) به‌صورت معادلات (۸) و (۹) به دست می‌آیند.

$$\bar{y}^{(r)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f^r(s)\, ds \qquad (۸)$$

$$\hat{D} = \bar{y}^{(2)} - \left(\bar{y}^{(1)}\right)^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f^2(s)\, ds - [\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f^1(s) ds]^2 \qquad (۹)$$

$f(s)$ توسط سری فوریه بسط داده شده و رابطه‌ی (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$f(s) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \{A_j \cos js + B_j \sin js\} \qquad (۱۰)$$

ضرایب‌فوریه A_j و B_j به‌صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شوند:

$$A_j = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s) cosjs\, ds \qquad (۱۱)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s) sinjs\, ds \qquad (۱۲)$$

در محدوده‌ی عددی فرکانس‌ها $j \in Z = \{-\infty,\dots,0,\dots,\infty\}$ تعریف می‌شوند. طیف توسعه‌یافته سری فوریه به‌صورت $\Lambda = A_j^2 + B_j^2$ تعریف می‌شود. چون $f(s)$ یک تابع با مقادیر عددی حقیقی می‌باشد، A_j، B_j و Λ_j دارای خصوصیات ذکرشده در معادله (۱۳) می‌باشند:

$$A_{-j} = A_j\ ;\ \Lambda_{-j} = \Lambda_j\ ;\ B_{-j} = -B_j \qquad (۱۳)$$

با محاسبه ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتبه اول ورودی x_i را به دست آورد. طبق رابطه (۱۴):

$$D_i = \sum_{p\epsilon z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2\sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \qquad (۱۴)$$

با محاسبه‌ی شاخص حساسیت اصلی از نسبت واریانس جزئی مرتبه‌ی اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از معادله (۱۵) به‌دست می‌آید:

$$ST_i = 1 - \frac{D_{-i}}{D} \qquad (۱۵)$$

واریانس D_{-i} از تغییر همه‌ی پارامترها، به‌جز تغییر پارامتر x_i به‌دست می‌آید. روش ای-فست روشی ارزان برای محاسبه نسبت به شاخص‌های سوبل می‌باشد. چون در روش ای-فست یک نمونه درست می‌شود اما روش سوبل نیازمند ساخت چندین نمونه‌ی متفاوت است[۳۲].

در جدول ۳ به تشریح مشخصات و پارامترهای مدل آنالیز حساسیت آماری ای-فست پرداخته شده است. در شکل ۲ الگوریتم طراحی آزمایش‌ها و آنالیزحساسیت بازیابی براده‌ها نشان داده شده است.

۲-۳- بستر آزمایش و آماده‌سازی نمونه

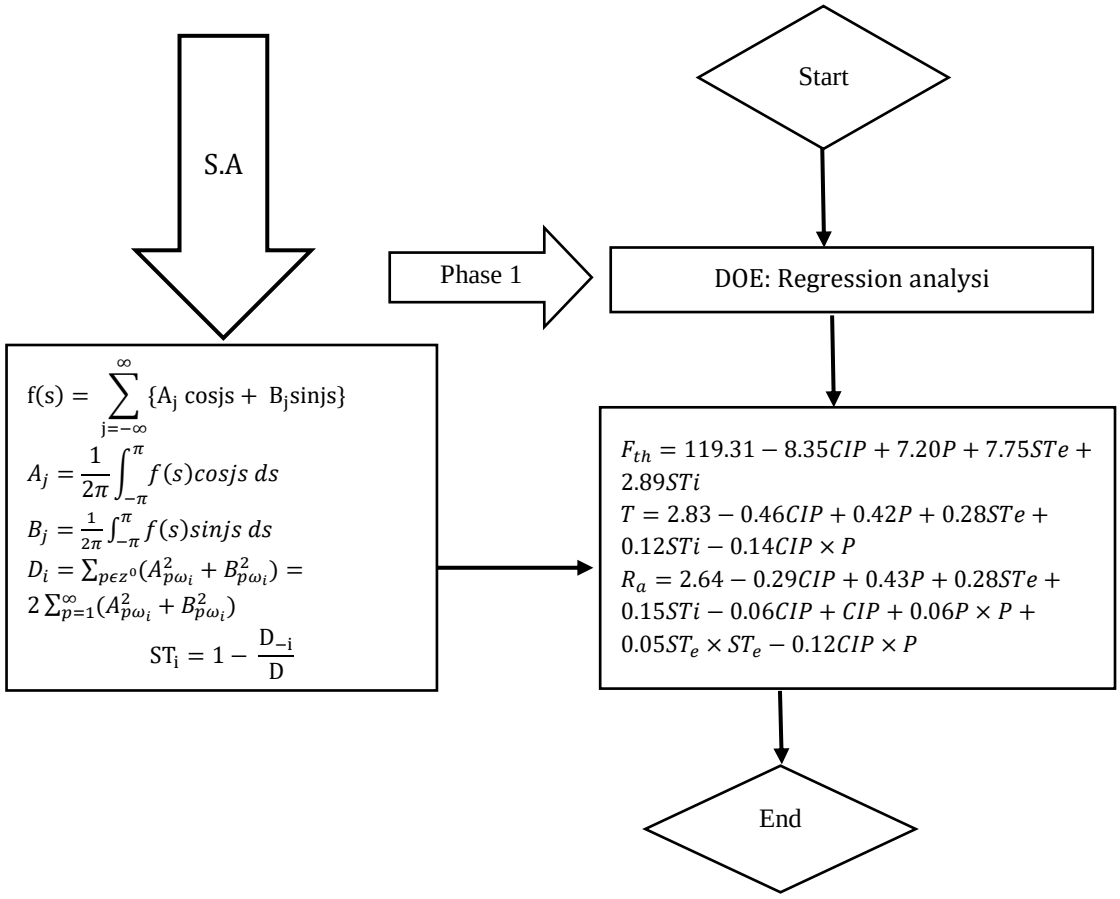
براده‌های چدن خاکستری از نوع پرلیتی لایه‌ای به‌دست آمده از تراشکاری خشک حاوی ٪۳/۵ کربن، و همچنین پودر آهن افشانشی تجاری خالص حاوی ٪۰/۰۲ کربن، به‌عنوان مواد اولیه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. شکل براده‌های اولیه در تصویر SEM در شکل ۱- الف نشان داده شده است.

جدول ۳ مشخصات روش آماری ای-فست

Table 3 Specifications of E-fast statistical method

نام روش	نوع روش	پایه تحلیل	مزایا	معایب
E-FAST (ای-فست)	آنالیز حساسیت آماری	تجزیه واریانس	برای مدل‌های خطی و غیر خطی کاربرد دارد. تعداد نمونه‌ها برای انجام تحلیل کم است.	دقت کمتری نسبت به مدل‌های دیگر برپایه‌ی واریانس دارد.

[1] Weyl



شکل ۲ الگوریتم مدل‌سازی طراحی آزمایش‌ها و آنالیز حساسیت

Fig. 2 Modeling Algorithm DOE and Sensitivity Analysis

براده‌ها توسط آسیاب پاششی و با استفاده از متغیرهای بهینه به‌دست آمده تبدیل به پودر شده‌اند. برای این منظور مقدار ۵ کیلوگرم از براده‌های اولیه در پنج چرخه تحت عملیات آسیاب پاششی قرار گرفتند. عملیات بهینه مورد استفاده عبارتنداز: نرخ تغذیه ۴۰g/s، زاویه‌ی برخورد ۹۰ درجه، فاصله نازل تا صفحه هدف ۸ سانتی‌متر و فشارهوای ۰/۶ مگاپاسکال در شکل ۱- ب نیز تصویر SEM پودرهای تولید شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، پودرها از نوع پولکی، گوشه‌دار و نامنظم و باسطوح زبر هستند. توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های فیزیکی پودر آهن افشانشی نیز مطابق با استاندارد ASTM B213-97 بوده است. نرخ جریان و چگالی ظاهری پودرها با استفاده از جریان سنج هال[1]و مطابق با استاندارهای به‌ترتیب ASTM B213-97 و ASTM B212-99 به‌دست آمده است. پس از آماده سازی پودرها، ترکیب‌های پودری آهن-چدن با درصدهای مختلف چدن تحت فشارهای تک محوری مختلف در داخل قالبی با حفره مستطیلی به ابعاد ۳۱/۷ میلی‌متر در ۱۲/۷ میلی‌متر فشرده شدند (با ضخامت بین ۶/۵ تا ۸ میلی‌متر وابسته به پارامترهای ساخت). روانکاری قالب با محلول ۱۰٪ استئریت روی و استاندارد ASTM B331-95 انجام شده است، سپس خشته‌های خام تحت دماها و زمان‌های مختلف و در اتمسفر آرگون تف‌جوشی شده و پس از هر مرحله تف‌جوشی در کوره تا دمای محیط سرد شدند. ماشین‌کاری نمونه‌های پرس‌شده در عملیات سوراخ‌کاری و تحت شرایط مختلف بررسی شد و در بخش تف‌جوشی شده نیز قابلیت ماشین‌کاری با دو معیار نیروهای ماشین‌کاری و زبری سطح پس از ماشین‌کاری سنجیده شد. برای این کار از ماشین فرز مدل FP4MK ماشین‌سازی تبریز و مته‌های مارپیچیHSS با پوشش TiN با قطر ۶ میلی‌متر، زاویه مارپیچ ۳۰ درجه و زاویه رأس مته ۱۲۰ درجه استفاده شده‌اند. در بخش خام سرعت پیشروی هر نمونه با سرعت پیشروی ثابت mm/min۲۰ و با دو سرعت برشی ۷/۵ و ۱۵ m/min مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای اندازه‌گیری قابلیت ماشین‌کاری قطعات تف‌جوشی شده در مرحله اول از دینامومتر سه مؤلفه‌ای KISTLER مدل 9257B استفاده شده است. در این بخش عملیات سرعت پیشروی ثابت mm/min۴۰

[1] Hall flowmeter

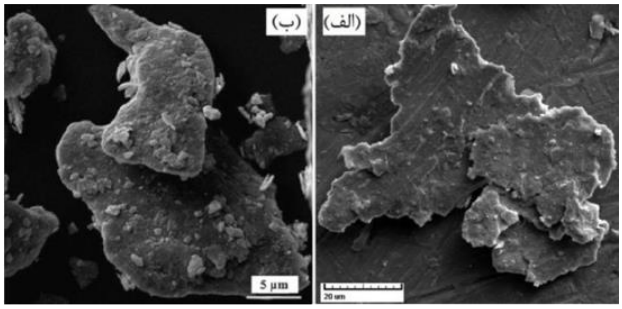
و سرعت برشی m/min۷/۵ انجام گرفت. دلیل انتخاب سرعت برشی نسبتاً پایین اسن است که عملیات سوراخ‌کاری با سرعت برش پایین در قطعات متالورژی پودر نسبت به تغییرات ریزساختاری حساسیت بیشتری دارد. همچنین پس از عملیات سوراخ‌کاری، نمونه‌ها از محل قطر سوراخ بریده شده و زبری سطح آن‌ها توسط دستگاه زبری سنج مار مدل Marsurf PS1 اندازه‌گیری شد. آزمایش زبری‌سنج با طول کورس ۱/۷۵ میلی‌متر بر روی سطح سوراخ شده نمونه و برای هر نمونه ۵بار در نقاط مختلف تکرار شده است و عدد دقیق زبری سطح (R_a) به‌صورت حاصل میانگین این اعداد تعیین شده است. شکل ۳ تفاوت بین پودرهای تولید شده با دو روش آسیاب پاششی و گلوله‌ای را نشان می‌دهند، پودرهای تولید شده به روش آسیاب پاششی دارای گوشه‌های تیز به‌همراه سطوح زبر و بدون ذرات آزاد گرافیت هستند. در حالی که پودرهای تولید شده به روش آسیاب گلوله‌ای به دلیل زمان‌های طولانی آسیاب‌کاری دارای گوشه‌های گرد و ساییده بودند و همچنین سطوح آن‌ها صاف و همراه با ذرات آزاد گرافیت است. علاوه‌براین، پودرهای تولید شده به روش آسیاب پاششی، برخلاف پودرهای تولید شده با سایر روش‌ها مانند آسیاب گلوله‌ای، بدون ایجاد کرنش سختی تولید می‌شوند[۱۸].

۳- شبیه سازی

در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت پرداخته شده و اثرات هر یک از متغیرهای ورودی جدول ۱ بر روی سه عامل نیروی محوری، گشتاور سوراخ‌کاری و زبری سطح تحقیق و بررسی شده است.

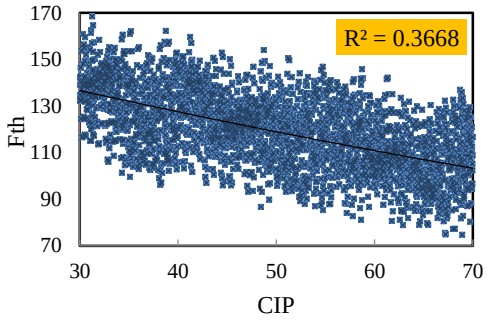
۳-۱- اثر متغیرهای ورودی بر روی نیروی محوری

شکل ۴ نشان می‌دهد، متغیرهای درصد پودر چدن، فشار تراکم و دمای تفجوشی تأثیر بسزایی بر روی مقدار نیروی محوری گذاشته‌اند و باعث کاهش یا افزایش آن شده‌اند.

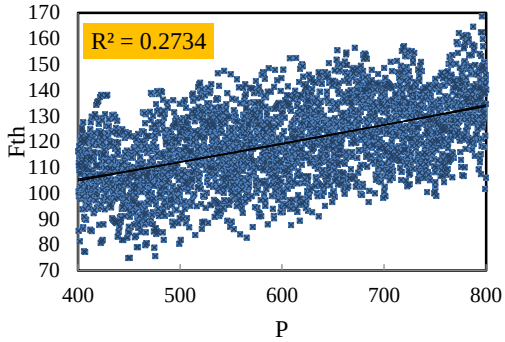


شکل ۳ پودرهای تولید شده با روش‌های: الف) آسیاب پاششی، ب) آسیاب گلوله‌ای[۱۸].

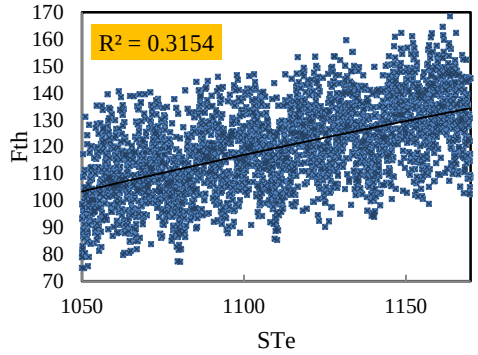
Fig. 3 Powders produced by: (a) spraying mill, (b) ball mill[18]



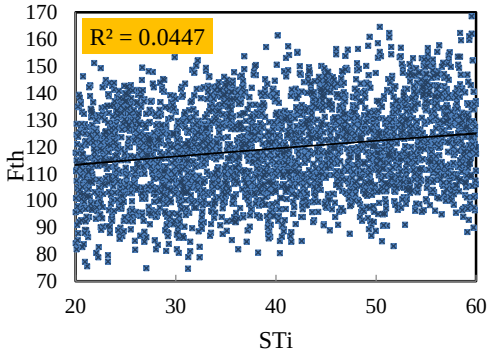
الف) اثر درصد پودر چدن
a) Effect of cast iron powder



ب) فشار تراکم
b) Effect of compression pressure



ج) دمای تفجوشی
c) Effect of sintering temperature



د) زمان تفجوشی
d) Effect of sintering time

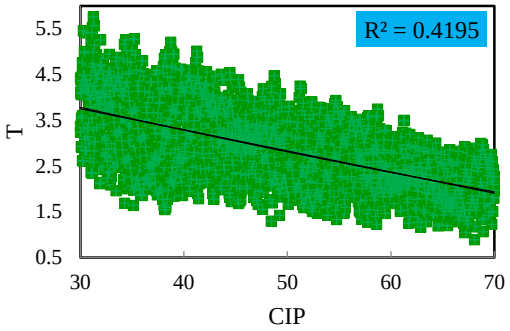
شکل ۴ اثر متغیرهای ورودی بر روی نیروی محوری

Fig. 4 The effect of input variables on axial force

شکل ۴- الف رابطه‌ی معکوس درصد پودر چدن بر روی نیروی محوری را به صورت واضحی نشان می‌دهد، اما در شکل‌های ۴- ب و ۴-ج بر خلاف درصد پودر چدن فاکتورهای فشار تراکم و دمای تف‌جوشی یک رابطه‌ی مستقیم با پارامتر خروجی نیروی محوری داشته‌اند و با افزایش متغیرهای ورودی عامل خروجی نیز به بیشینه مقدار خود رسیده است. اما تنها در شکل ۴- د اثر ثابت پارامتر زمان تف‌جوشی بر روی نیروی محوری نمایان شده است، که با افزایش یا کاهش آن تغییر محسوسی بر میزان نیروی محوری ایجاد نشده است. همچنین نوع برازش منحنی‌های به‌دست آمده چندجمله‌ای از درجه ۲ می‌باشد و میزان واریانس مدل در روی نمودارها نمایش داده شده است. میزان اثرگذاری کیفی پارامترها با استفاده از مقدار واریانس نشان داده شده بر روی نمودار قابل تشخیص است. اثر پودر چدن با ۰/۳۶ و دمای تف‌جوشی با ۰/۳۱ بیشترین میزان تأثیر را داشته‌اند، اما با این تفاوت که رابطه‌ی نیروی محوری با درصد پودر چدن به‌طور معکوس بوده و افزایش آن باعث کاهش میزان نیروی محوری می‌شود. رابطه‌ی دمای تف‌جوشی به‌صورت مستقیم بوده و افزایش آن اندازه نیروی محوری را افزایش داده است. فشار تراکم نیز همانند دمای تف‌جوشی بوده است اما با مقدار واریانس ۰/۲۷ و دمای تف‌جوشی از نظر رابطه‌ای تقریباً بی‌اثر بوده و میزان واریانس آن نیز ناچیز است.

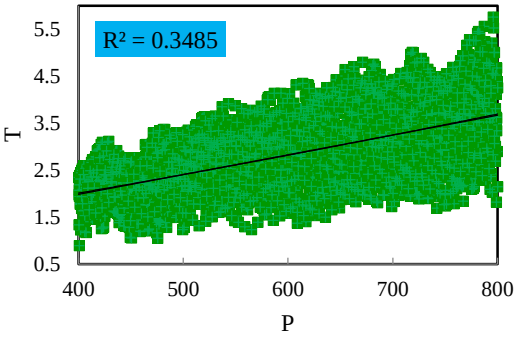
۲-۳- اثر متغیرهای ورودی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری

شکل ۵ روند اثرگذاری متغیرهای ورودی بر میزان تغییرات گشتاور سوراخ‌کاری را نشان داده است. برازش منحنی‌های گشتاور سوراخ‌کاری منحنی درجه ۲ درنظر گرفته شده است. واریانس که مبنای تحلیل حساسیت روش ای-فست است بر روی نمودارهای پراکندگی نمایش داده شده است. با توجه به معادله رگرسیون در شکل ۵- الف مشاهده می‌شود، که یک رابطه‌ی معکوس بین فاکتور ورودی پودر چدن و گشتاور سوراخ‌کاری وجود دارد که با افزایش میزان درصد پودر چدن مقدار گشتاور سوراخ‌کاری به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. اما در شکل ۵- ب برخلاف فاکتور درصد پودر چدن فشار تراکم باعث افزایش میزان گشتاور سوراخ‌کاری شده است و این خروجی را تا بیشینه مقدار رسانده است. شکل ۵- ج که اثر فاکتور دمای تف‌جوشی را نشان می‌دهد نیز باعث افزایش میزان گشتاور سوراخ‌کاری شده است و یک رابطه‌ی مستقیم بین این متغیر ورودی و عامل خارجی وجود دارد.



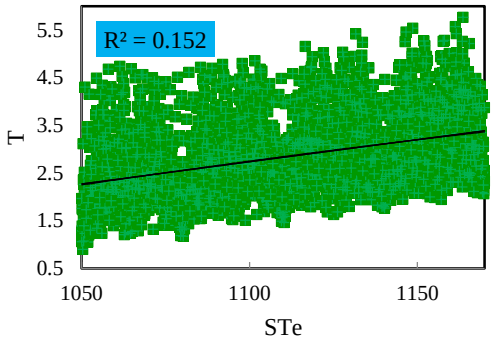
الف) اثر درصد پودر چدن

a) Effect of cast iron powder



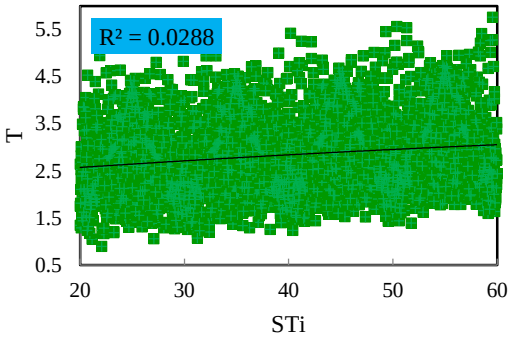
ب) فشار تراکم

b) Effect of compression pressure



ج) دمای تف‌جوشی

c) Effect of sintering temperature



د) زمان تف‌جوشی

d) Effect of sintering time

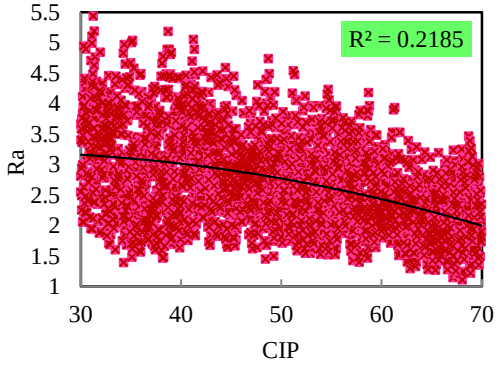
شکل ۵ اثر متغیرهای ورودی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری

Fig. 5 The effect of input variables on drilling torque

شکل ۵- ج نیز همانند شکل ۵- ب است اما با این تفاوت که شیب نمودار شکل ۵- ب بیشتر و در نتیجه میزان تغییرات آن نسبت به شکل ۵- ج بیشتر است، اما در مجموع این دو فاکتور ورودی باعث افزایش و به بیشینه رسیدن میزان گشتاور سوراخ‌کاری شده‌اند. در شکل ۵- د تغییرات پراکندگی فاکتور زمان تفجوشی نشان داده شده است که دارای یک رابطه‌ی تقریباً ثابت می‌باشد و تغییرات محسوسی بر روی میزان گشتاور سوراخ‌کاری نداشته است. برای سوراخ‌کاری قطعات و انجام آزمایش‌ها برای داشتن نتیجه‌ای بهتر باید توجه ویژه‌ای به میزان درصد پودر چدن و فشار تراکم، همچنین در تعادل بودن این دو متغیر ورودی داشت، زیرا با توجه به میزان واریانس درصد پودر چدن ۰/۴۱ و فشار تراکم ۰/۳۴ این دو متغیر تأثیر بسزایی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری داشته‌اند. اما رابطه‌ی این دو با این عامل خروجی برعکس هم بوده است و میزان این دو باید به‌طوری باشد که اثر یکدیگر را خنثی کند.

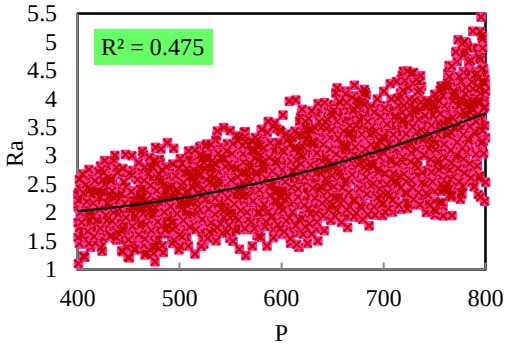
۳-۳- اثر متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح

شکل ۶ پراکندگی متغیرهای ورودی بر روی خروجی زبری سطح را نشان می‌دهد. در این شکل نیز همانند نمودارهای دو خروجی قبلی برازش منحنی‌های زبری سطح، چندجمله‌ای درجه ۲ لحاظ شده است و همچنین بزرگی واریانس‌ها بر روی نمودارها نشان داده شده است. در شکل ۶- الف با افزایش درصد پودر چدن زبری سطح در نهایت کاهش یافته است، اما همانطور که از معادله رگرسیون مشخص است فشار تراکم در شکل ۶- ب تأثیر بسزایی در افزایش میزان زبری سطح داشته است و با افزایش آن زبری سطح نیز افزایش یافته است. در شکل ۶- ج نیز مانند فشار تراکم با افزایش دمای تفجوشی میزان زبری سطح افزایش یافته است، این در حالی است که زبری سطح در شکل ۶- د با افزایش زمان تفجوشی افزایش اندکی داشته است. برای داشتن قطعات ماشین‌کاری شده با زبری سطح مطلوب باید به میزان فشار تراکم توجه ویژه‌ای شود زیرا با مقدار ۰/۴۷ واریانس بیشترین میزان را در بین متغیرهای ورودی داشته است. همچنین رابطه‌ی کیفی آن به‌صورت مستقیم بوده است و با افزایش آن میزان زبری سطح نیز افزایش یافته است. دیگر متغیرهای ورودی دما و زمان تفجوشی رابطه‌ای مستقیم با زبری سطح دارند و برای مهار این فاکتورهای ورودی باید تغییرات اساسی در میزان درصد پودر چدن ایجاد کرد زیرا پس از فشار تراکم این فاکتور ورودی با ۰/۲۱ و همچنین داشتن رابطه‌ای معکوس از اثرگذارترین فاکتورهای ورودی بر روی زبری سطح بوده است.



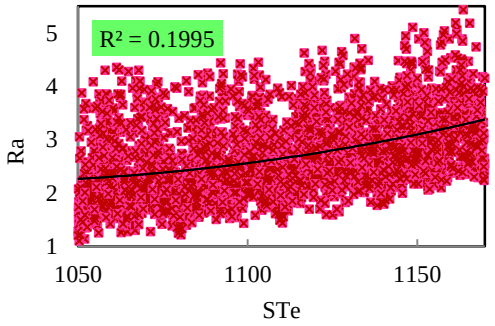
الف) اثر درصد پودر چدن

a) Effect of cast iron powder



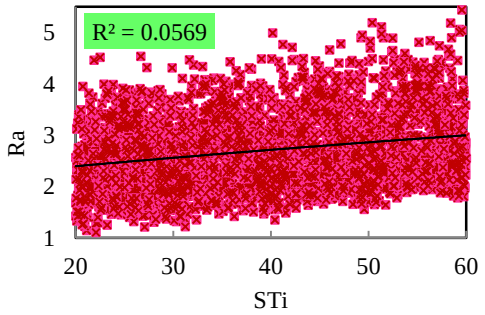
ب) فشار تراکم

b) Effect of compression pressure



ج) دمای تفجوشی

c) Effect of sintering temperature



د) زمان تفجوشی

d) Effect of sintering time

شکل ۶ اثر متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح

Fig. 6 The effect of input variables on surface roughness

۳-۴- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی نیروی محوری با استفاده از روش آماری ای-فست

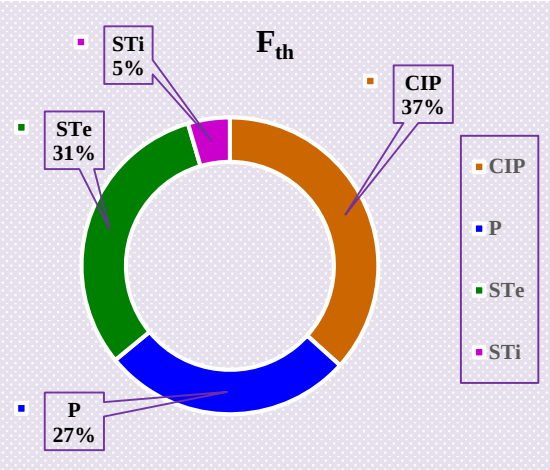
شکل ۷ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی نیروی محوری را با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای-فست نشان داده است. سه متغیر ورودی درصد پودر چدن، دمای تف‌جوشی و فشار تراکم به ترتیب با ٪۳۷، ٪۳۱ و ٪۲۷ اثرگذارترین متغیرهای ورودی بر روی میزان نیروی محوری هستند. زمان تف‌جوشی نیز با ٪۵ میزان کمی تأثیر بر روی نیروی محوری گذاشته است. اثر کمی فقط میزان تأثیرگذاری فاکتورها را بر روی خروجی نیروی محوری نمایش می‌دهد اما رابطه‌ی مستقیم یا معکوس بودن آن‌ها را بیان نمی‌کند در بخش اثرگذاری کیفی نشان داده شده است که، درصد پودر چدن رابطه‌ی معکوس داشته و باعث کاهش نیروی محوری شده است، این در حالی است که فشار تراکم و دمای تف‌جوشی باعث افزایش میزان نیروی محوری شده و یک رابطه‌ی مستقیم بین فاکتورها و عامل خروجی وجود دارد.

۳-۵- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری با استفاده از روش آماری ای-فست

اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی میزان گشتاور سوراخ‌کاری در شکل ۸ نمایش داده شده است. درصد پودر چدن و فشار تراکم از اثرگذارترین متغیرهای ورودی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری هستند. درصد پودر چدن با ٪۴۴ و فشار تراکم نیز با ٪۳۸ بیشترین تأثیر را بر روی میزان گشتاور سوراخ‌کاری گذاشته‌اند. دما و زمان تف‌جوشی در مرتبه بعدی اثرگذاری قرار گرفته‌اند. دمای تف‌جوشی با ٪۱۵ و زمان تف‌جوشی با میزان ناچیز ٪۳ بر روی گشتاور سوراخ‌کاری تأثیر گذاشته اند. دو فاکتور درصد پودر چدن و فشار تراکم در مجموع بیش از ٪۸۰ بر روی میزان گشتاور سوراخ‌کاری اثرگذاری کرده‌اند. اما به‌صورت کیفی دو رابطه‌ی کاملا متفاوت بین این دو فاکتور با عامل خروجی گشتاور سوراخ‌کاری وجود دارد، افزایش درصد پودر چدن باعث کاهش میزان گشتاور سوراخ‌کاری، اما کاهش فشار تراکم و دمای تف‌جوشی باعث افزایش مقدار گشتاور سوراخ‌کاری شده است و همچنین افزایش یا کاهش زمان تف‌جوشی باعث تغییر چندانی بر روی این عامل ماشین‌کاری نشده است.

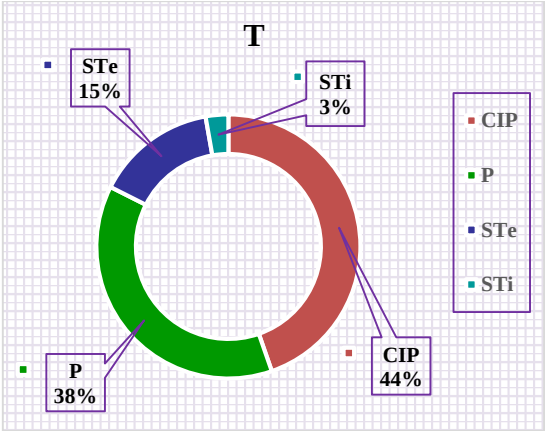
۳-۶- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح با استفاده از روش آماری ای-فست

متغیرهای ورودی فشار تراکم و درصد پودر چدن هر کدام به ترتیب با ٪۴۹ و ٪۲۶ بیشترین تأثیر را بر روی میزان تغییرات زبری سطح قطعات تف‌جوشی شده گذاشته است. شکل ۹ اثر کمی هر یک از فاکتورهای ورودی بر عامل خروجی زبری سطح را نشان داده است.



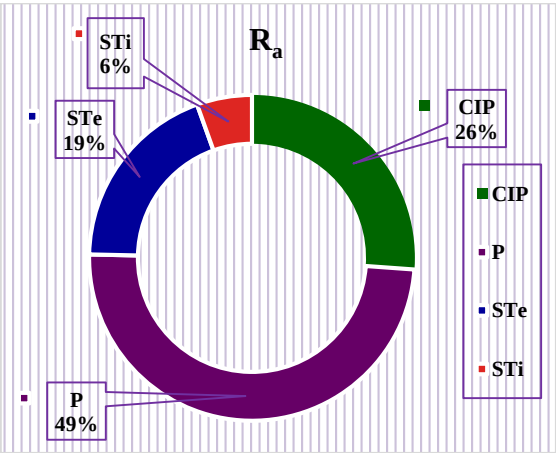
شکل ۷ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی نیروی محوری

Fig. 7 Quantitative effect of input variables on axial force



شکل ۸ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی گشتاور سوراخ‌کاری

Fig. 8 Quantitative effect of input variables on drilling torque



شکل ۹ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی زبری سطح
Fig. 9 Quantitative effect of input variables on surface roughness

پس از درصد پودر چدن دمای تفجوشی با ۱۹٪ و زمان تفجوشی با ۶٪ بر میزان زبری سطح تأثیر داشته‌اند. برای کاهش یا افزایش زبری سطح باید به فاکتور فشار تراکم توجه ویژه‌ای داشت زیرا تغییرات این عامل تا حدود ۵۰٪ وابسته به این فاکتور است، این در حالی است که فاکتور فشار تراکم با عامل زبری سطح رابطه‌ی معکوس داشته و با افزایش آن، زبری سطح به‌شدت کاهش می‌یابد. درصد پودر چدن و دمای تفجوشی که در رتبه‌های بعدی اثرگذاری قرار دارند و هر دوی آن‌ها یک رابطه مستقیم با زبری سطح دارند و با افزایش آن‌ها عامل خروجی زبری سطح نیز افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

امروزه در دنیای تکنولوژی و صنعت ساخت‌وتولید دو ابزار قدرتمند آنالیز حساسیت و روش طراحی آزمایش‌ها باعث پیشرفت روزافزون و افزایش کیفیت و کاهش هزینه‌ها و نواقص شده است. همچنین دقت و صحت فرایندها را بیش از پیش افزایش داده است. در تمام زمینه‌های صنعت و آزمایشگاهی برای انجام یک فرایند در ابتدا اگر با تکنیک طراحی آزمایش‌ها متغیرهای ورودی اصلی مشخص شوند، سپس با آنالیز حساسیت میزان اثرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی به‌صورت کمی و کیفی بر روی عامل‌های خروجی مشخص شود، میزان بهره‌وری در دقت و صحت و افزایش هرچه بیشتر کیفیت در فرایند افزایش می‌یابد. بازیابی براده‌های ماشین خود یک امر اقتصادی است که اگر با استفاده از روش نوین آسیاب پاششی انجام شود تحولی نو در صنعت متالورژی پودر را رقم زده است.

- **نیروی محوری:** درصد پودر چدن، دمای تفجوشی و فشار تراکم سه پارامتر مهم که به ترتیب بیشترین اثر را بر روی میزان نیروی محوری گذاشته‌اند.
- **گشتاور سوراخ‌کاری:** درصد پودر چدن و فشار تراکم در مجموع با مقدار ۸۲٪ بیشترین تأثیر را بر روی میزان گشتاور سوراخ‌کاری گذاشته‌اند.
- **زبری سطح:** فشار تراکم تقریباً نیمی از وابستگی این قابلیت ماشین‌کاری را تشکیل می‌دهد که یک رابطه‌ی مستقیم با آن دارد، هم از نظر کمی و هم کیفی فاکتور فشار تراکم بیشترین میزان تأثیر را بر روی زبری سطح دارد. درصد پودر چدن با ۲۶٪ و دمای تفجوشی با ۱۹٪ در مراتب بعدی تأثیرگذاری بر روی میزان زبری سطح هستند.

با توجه به نتایج نشان داده شده، درصد پودر چدن، فشار تراکم و دمای تفجوشی تأثیرگذارترین متغیرهای ورودی بر روی میزان نیروی محوری، گشتاور سوراخ‌کاری و زبری سطح برای ماشین‌کاری قطعات متالورژی پودر خام و تفجوشی هستند. که در انجام فرایندها به صورت تجربی و همچنین طراحی آزمایش‌ها باید به میزان قابل توجهی آن‌ها در نظر گرفته شوند. در جدول ۴ اثر هر یک از فاکتورهای ورودی بر اساس رتبه‌بندی بر روی قابلیت‌های ماشین‌کاری نمایش داده شده است.

جدول ۴ رتبه‌بندی فاکتورهای ورودی بر عوامل ماشین‌کاری
Table 4 Ranking of input factors on machining factors

	نیروی محوری	گشتاورسوراخ‌کاری	زبری سطح
فاکتور مؤثر	۱- درصد پودر چدن: ٪۳۷	۱- درصد پودر چدن: ٪۴۴	۱- فشار تراکم: ٪۴۹
	۲- دمای تفجوشی: ٪۳۱	۲-فشار تراکم: ٪۳۸	۲- درصد پودر چدن: ٪۲۶
	۳- فشار تراکم: ٪۲۷	۳- دمای تفجوشی: ٪۱۵	۳- دمای تفجوشی: ٪۱۹
	۴- زمان تفجوشی: ٪۵	۴- زمان تفجوشی: ٪۳	۴- زمان تفجوشی: ٪۶

۵- فهرست علائم

A_j	ضریب فوریه
Bj	ضریب فوریه
D	واریانس مدل
D_i	واریانس جزئی
ST_i	شاخص کلی حساسیت
CIP	درصد پودر چدن
Fth	نیروی محوری، N
P	فشار تراکم، MPa
STe	دمای تفجوشی، ℃
STi	زمان تفجوشی، min
T	نیروی گشتاوری، Nm

۶- مراجع

[1] Fang, Z., D. Paramore, J., Sun, P., Ravi Chandran, K.S., Zhang, Y., and Free, M., 2017. Powder metallurgy of titanium past, present, and future. International Materials Reviews,63(7), pp.407-459.

[2] Wan, Sh., Li, H., Tieu, K., Xue, Qi., and Zhu, H., 2019. Mechanical and tribological assessments of high-vanadium high-speed steel by the conventional powder metallurgy process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

103(4), pp.943-955.
[3] Agapiou, J. S., DeVries, M. F., 2009. An Experimental Determination of the Thermal Conductivity of a 304L Stainless Steel Powder Metallurgy Material. Journal of Heat Transfer. 111(2), pp. 281-286.
[4] Fan, G., Jiang, Y., and Zhang, Di., 2018. Enhanced interfacial bonding and mechanical properties in CNT/Al composites fabricated by flake powder metallurgy. Carbon. 130, pp.333-339.
[5] Hausner, H., Mal, M., 2nd Ed., 1982. Handbook of Powder Metallurgy, NewYork: Chemical Pub. Co. Inc.
[6] Sharma, A., Sagar, Sh., Mahto, R., Sahoo, B., Kanta Pal, S., and Paul, J., 2018. Surface modification of Al6061 by graphene impregnation through a powder metallurgy assisted friction surfacing. Surface & Coatings Technology. 337, pp.12-23.
[7] Verma, P., Saha, R., and Chaira., 2018. Waste steel scrap to nanostructured powder and superior compact through powder metallurgy: powder generation, processing and characterization. Powder Technology. 326, pp.159-167.
[8] Turan, M., Sun, Y., and Akgul, Y., 2018. Mechanical, tribological and corrosion properties of fullerene reinforced magnesium matrix composites fabricated by semi powder metallurgy. Journal of Alloys and Compounds. 740, pp. 1149-1158.
[9] Sudhakar, K.V., 2000. Fatigue behavior of a high density powder metallurgy steel. International Journal of Fatigue. 22, pp.729-734.
[10] Shen, J., Chen, B., Umeda, J., and Kondoh, K., 2018. Microstructure and mechanical properties of CP-Ti fabricated via powder metallurgy with non-uniformly dispersed impurity solutes. Materials Science and Engineering: A. 716, pp.1-10.
[11] Neville, B. P., Rabiei, A., 2008. Composite metal foams processed through powder metallurgy. Materials and Design. 29, pp.388-396.
[12] Coble, R., 1961. Sintering Crystalline Solids. I. Intermediate and Final State Diffusion Models. Applied physics, 32(5), pp. 787-799.
[13] Sousa, G., Sales, W., and Machado, A., 2017. A review on the machining of cast irons. Int J Adv Manuf Technol, 94(9), pp. 4073-4092.
[14] Czampa, M., Markos, S., and Szalay, T., 2013. Improvement of drilling possibilities for machining powder metallurgy materials. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Setubal, Portugal. pp.288-293.
[15] Karandikar, A., 1991. Processing of cast iron scrap from the diesel engine manufacturing industry by powder metallurgy techniques. Resources Conservation and Recycling, 5, pp. 61-71.
[16] Parucker, M., Costa, E., 2006. Study of the recycling grey cast iron swarf by powder metallurgy: an alternative for the development of new materials. Materials Science Forum, 53, pp. 3-9.
[17] Ghambari, M., Emadi, M., and Eshraghi, N., 2012. Production of grey cast iron powder via target jet milling. Powder Technology, 221, pp. 318-324.
[18] Abdollahi, H., PanahiLeavoli, R., Mahdavinejad, R., and Zal, V., 2014. Investigation of machinability of green and sintered iron-jet milled cast iron powder metallurgy parts. Modares Mechanical Engineering, 14(11), pp. 59-67,(in Persian).
[19] Taheri, M., 2019. Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method. Modares Mechanical Engineering, 19 (1), pp. 125-135. (in Persian)
[20] Taheri, M., 2018. Sensitivity analysis of 3D manipulation of spherical nanoparticles by using E-fast method. Modares Mechanical Engineering, 17(11), pp. 59-69. (in Persian)
[21] Mariano, R., 2006. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Technometrics, 48(2), pp.304-305.
[22] Dennis, L., Martin, O., and Sonya, G., 2001. DOE (Design of Experiments) in Development Chemistry: Potential Obstacles. Organic Process Research & Development. pp.5324-327.
[23] Frey, H., Patil, SR., 2002. Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. Risk Analysis, 22(3), pp.553-578.
[24] Dennis, L., Martin, O., and Sonya, G., 2001. DOE (Design of Experiments) in Development Chemistry: Potential Obstacles. Organic Process Research & Development, 5, pp.324-327.
[25] Edmund, R., Oliver., W., Apostolos, V., and Lindsay, L., 2018. Fast sensitivity analysis methods for computationally expensive models with multi dimensional output. Geoscientific Model Development, 11, pp.3131-3146.
[26] Zhaoxu, Y., Peng, L., Tiago, S., Kaiping, Y., and John, E., 2019. Parameter selection for model updating with global sensitivity analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 115, pp.483-496.
[27] Dinh, S., Raymond, R., Manuel, O., Michael, A., Phan, D., Naoya, A., and Luis, F., 2017. A design of experiments approach to the sensitivity analysis of the life cycle cost of biodiesel. Clean Technologies and Environmental Policy, 20(3), pp. 573-580.
[28] Duane, S., Mozumder, P., 1994. DOE/Opt: A System for Design of Experiments, Response Surface Modeling, and Optimization Using Process and Device Simulation. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 7(2), pp. 232-246.
[29] Dabade, A., Bhedasgaonkar, R., 2013. Casting Defect Analysis using Design of Experiments (DoE) and Computer Aided Casting Simulation Technique. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems, 7, pp. 616-621.
[30] Kleijnen, P. 2005. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. European Journal of Operational Research. 164, pp.287-300.
[31] Taheri, M., 2019. Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in

the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method. Modares Mechanical Engineering, 19 (1), pp. 125-135. (in Persian)

[32] Saltelli, A., Bolado, R., 1998. An Alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). Computational Statistics and Data Analysis, 26(4), pp. 445-460.

[33] Khuri, I., Cornell, J., , 2nd Ed., 1996. Response Surfaces Design and Analysis., New York: Marcel Dekker.

[34] Chatterjee, D., Oraon, B., Sutradhar, G., and Bose, P., 2007. Prediction of hardness for sintered HSS components using response surface method. Materials, Processing Technology, 190, pp. 123-129.

[35] B. Heydari, M. M. Abootorabi, H. R. Karimi Zarchi, Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate in dry turning of super alloy Inconel 600, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 1-11, 2018 (in Persian)