



بررسی قابلیت ماشینکاری قطعات متالورژی پودر خام و تفجوشی شده آهن/چدن آسیاب پاششی شده

هادی عبداللہی^{1*}، روح اله پناهی لیاولی²، رمضانعلی مهدوی نژاد³، وحید زال⁴

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

2- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* ارومیه، صندوق پستی 57155-419، habdollahi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 اسفند 1392

پذیرش: 12 اردیبهشت 1393

ارائه در سایت: 06 مهر 1393

کلید واژگان:

قابلیت ماشینکاری

تفجوشی

آسیاب پاششی

متالورژی پودر

چدن خاکستری

در این تحقیق به بررسی قابلیت ماشینکاری قطعات متالورژی پودر خام و تفجوشی شده آهن-چدن خاکستری بازیابی شده پرداخته می‌شود. برای این منظور براده‌های چدن خاکستری با استفاده از روش آسیاب پاششی تبدیل به پودر شده و در ترکیب با پودر آهن تجاری برای تهیه قطعات متالورژی پودر مورد استفاده قرار گرفتند. خسته‌های خام با متغیرهای درصد پودر چدن و فشار تراکم تهیه شدند. برای قطعات تفجوشی شده نیز طراحی آزمایش با روش رویه پاسخ و با متغیرهای درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی و هر کدام در پنج سطح انجام شد. تحلیل‌های رگرسیون و واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی، ارائه مدل‌های ریاضی و ارزیابی صحت مدل‌ها به کار رفتند. در بخش خام قابلیت ماشینکاری در عملیات سوراخکاری به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت. در قطعات تفجوشی شده نیز قابلیت ماشینکاری از طریق اندازه‌گیری نیروهای محوری و گشتاوری و زبری سطح حاصل از عملیات سوراخکاری بررسی شد. نتایج به دست آمده صحت معادلات رگرسیون استخراجی برای پیش‌بینی خواص ماشینکاری این قطعات را تأیید کرد. همچنین، نتایج نشان دادند که افزودن پودر چدن خاکستری به دست آمده از روش آسیاب پاششی باعث بهبود قابلیت ماشینکاری قطعات متالورژی پودر پایه آهنی می‌شود.

Investigation of machinability of green and sintered iron-jet milled cast iron powder metallurgy parts

Hadi Abdollahi^{1*}, Rouhollah Panahi Leavoli², Ramezan Ali Mahdavinejad³, Vahid Zal⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 57155-419 Urmia, habdollahi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 March 2014
Accepted 02 May 2014
Available Online 28 September 2014

Keywords:
Machinability
Sintering
Jet Milling
Powder Metallurgy,
Grey Cast Iron

ABSTRACT

In this research, the machinability of iron-recycled grey cast iron powder metallurgy parts is investigated. For this purpose, grey cast iron swarfs were transformed to powders by target jet milling method and were then used to prepare powder metallurgy parts in combination with commercial iron powder. Green compacts were prepared with the variables of cast iron powder percentage and compaction pressure. Design of experiments was conducted by response surface method for sintered parts with the variables of cast iron powder percentage, compaction pressure, sintering temperature and sintering time each in five levels. Regression analysis and analysis of variance were used to investigate the effect of input parameters, develop the mathematical models and evaluate the validity of the models. In the green section, machinability was qualitatively investigated in drilling. For sintered parts, machinability was evaluated by measuring the thrust and torque forces and the obtained surface finish in drilling. The obtained results certificated the accuracy of the extracted regression equations for predicting the machining properties of the parts. Also, the results demonstrated that the addition of jet milled grey cast iron improves the machinability of iron-based powder metallurgy parts.

صنعت متالورژی پودر مزایایی از جمله صرفه اقتصادی را به همراه دارد. در این بین براده‌های چدن خاکستری به دلیل مقادیر بالای تولید، قیمت پایین،

1- مقدمه

بازیابی براده‌های ماشینکاری و تبدیل آن‌ها به پودرهای قابل استفاده در

Please cite this article using:

H. Abdollahi, R. Panahi Leavoli, R. Mahdavinejad, V. Zal, Investigation of machinability of green and sintered iron-jet milled cast iron powder metallurgy parts, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 59-67, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ماشینکاری بر روی 40 الی 50 درصد از قطعات تولید شده به روش متالورژی پودر به کار برده می‌شود، لذا لزوم بررسی قابلیت ماشینکاری در این دسته از قطعات نمایان‌تر می‌شود [13].

در بین عملیات ماشینکاری مختلف، سوراخکاری بنا به دلایلی از جمله سریع بودن، هزینه پایین و تکرارپذیری به‌طور قابل توجهی برای تعیین قابلیت ماشینکاری قطعات به کار می‌رود. همچنین، با توجه به اینکه در این عملیات شکل و اندازه قطعه محدودکننده نیست، در بررسی قابلیت ماشینکاری قطعات متالورژی پودر نیز پرکاربرد است. علاوه بر این، گزارش شده است که آزمایش سوراخکاری نسبت به تغییرات کوچک ریزساختاری مواد حساسیت بالاتری دارد [12]. قابلیت ماشینکاری در خشته‌های خام متالورژی پودر اغلب از طریق اندازه‌گیری زبری سطح حاصل و همچنین بررسی یکپارچگی لبه‌های سوراخ ایجاد شده در عملیات سوراخکاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [14]. در یک تحقیق انجام گرفته توسط پرون و همکاران [15]، قابلیت ماشینکاری خشته‌های خام آلیاژی پایه آهنی با این روش ارزیابی شده و شرایط برش بهینه برای حصول سوراخ‌هایی با لبه‌های یکپارچه به دست آمد. همچنین، اعلام شد که تغییرات ابعادی ناشی از تفجوشی در سوراخ قطعه، برای قطعاتی که ماشینکاری خام شده‌اند با قطعاتی که سوراخ مورد نظر در حین تراکم ایجاد شده، برابر است. زامپا و همکاران [16]، نیز به بررسی قابلیت ماشینکاری قطعات تفجوشی شده متالورژی پودر پایه آهنی کم آلیاژ در عملیات سوراخکاری پرداخته و تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل جنس ابزار برش و شرایط برش بر روی یکپارچگی لبه‌های سوراخ‌های ماشینکاری شده را بررسی کردند.

در این تحقیق، براده‌های ماشینکاری چدن خاکستری از طریق فرایند آسیاب پاششی تبدیل به پودر شده و سپس در ترکیب با پودر آهن، قطعات خام و تفجوشی شده با پارامترهای ساخت مختلف تهیه می‌شوند. پس از اثبات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسب به همراه صرفه‌های اقتصادی بسیار بالا برای این دسته از قطعات در تحقیقات گذشته، اکنون قابلیت ماشینکاری آن‌ها از حیث تأثیر پارامترهای ساخت مختلف و همچنین بررسی اثر گرافیت باقیمانده در ساختار قطعات تفجوشی شده بر روی نیروهای ماشینکاری و زبری سطح حاصل، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا قابلیت ماشینکاری خشته‌های خام مورد بررسی کیفی قرار گرفته و سپس با استفاده از روش‌های رویه پاسخ، تحلیل رگرسیون² و واریانس³ قابلیت ماشینکاری قطعات تفجوشی شده نیز بررسی می‌شود.

2- طراحی و انجام آزمایش‌ها

2-1- طراحی آزمایش

روش رویه پاسخ⁴، 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، به کار می‌رود [18، 17]. در این تحقیق آزمایش‌ها براساس طرح مرکب مرکزی⁵ پنج سطحی روش رویه پاسخ طراحی شدند. متغیرهای ورودی فرایند و سطوح طراحی آزمایش همراه با مقادیر کد شده و واقعی متغیرها در جدول 1 آمده است.

شکندگی، اندازه کوچک براده و عدم آلودگی به روانکار، دارای پتانسیل بالایی برای این کار هستند [1]. برای تبدیل براده‌های چدن خاکستری به پودر، اغلب از روش‌های مکانیکی از قبیل آسیاب گلوله‌ای [2]، آسیاب چکشی [3] و آسیاب لرزشی [4] استفاده می‌شود، اما این روش‌ها زمان‌بر بوده و نیاز به عملیات ثانویه آنیلینگ بر روی پودرها دارند. همچنین، خواص مکانیکی خشته‌های خام تولید شده از این پودرها به دلیل ویژگی‌های خاص آن‌ها ضعیف بوده و بر روی خواص پس از تفجوشی نیز تأثیر می‌گذارد [5]. اخیراً، یک روش جدید آسیاب به نام آسیاب پاششی¹ ارائه شده است [6]، که در آن براده‌های چدن خاکستری با سرعت بسیار بالا و بدون نیاز به عملیات تکمیلی به پودرهای قابل استفاده تبدیل می‌شوند. روش کار براساس حرکت براده‌ها همراه با یک جریان سریع از هوا و برخورد به یک صفحه هدف چدنی است که باعث متلاشی شدن براده‌ها می‌شود. همچنین، نشان داده شده است که پودرهای تولید شده به روش آسیاب پاششی نسبت به روش آسیاب گلوله-ای دارای گوشه‌های تیزتر و سطوح زبرتر بوده و قابلیت تراکم بیشتری دارند [7].

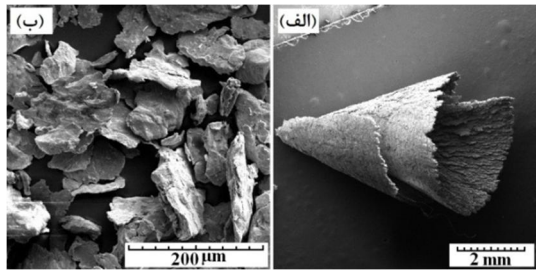
افزودن پودر چدن خاکستری به پودر آهن این امکان را فراهم می‌سازد تا از طریق تفجوشی یک قطعه متالورژی پودر آلیاژی با مقاومت به سایش بالا و خواص فیزیکی و مکانیکی خوب حاصل شود. این کار همزمان باعث کاهش مصرف پودر آهن می‌شود که گران‌تر از چدن است. عبدالهی و همکاران، در تحقیقات قبلی با افزودن پودر چدن تولید شده به روش آسیاب پاششی به پودر آهن به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی پودرهای تولید شده و خشته-های خام [8]، و خواص قطعات تفجوشی شده [9، 10]، پرداخته و خواص خوب فیزیکی-مکانیکی را برای این گروه از قطعات گزارش کردند.

در شرایطی که شکل قطعه به گونه‌ای است که تولید آن از طریق تراکم در قالب مشکل است و یا دقت ابعادی بسیار بالایی لازم است، نیاز به انجام عملیات ماشینکاری خواهد بود. قطعات تفجوشی شده، از نقطه‌نظر ماشینکاری، در زمره موادی قرار می‌گیرند که به سختی ماشینکاری می‌شوند، چرا که عملیات برش به واسطه حضور تخلخل در ماده ناپیوسته بوده و متعاقباً سایش ابزار و سطح پرداخت ضعیف را به همراه خواهد داشت. در برخی موارد ماشینکاری قطعه در حالت خام به دلیل سهولت ماشینکاری خام و یا کمینه کردن ماشینکاری نهایی انجام می‌گیرد. در ماشینکاری خام، به دلیل عدم وجود نیروهای بین دانه‌ای قوی، نیروهای ماشینکاری پایین است. البته، ماشینکاری بر روی خشته‌های خام تنها تحت شرایط خاص (در ارتباط با دو عامل خشته خام و پارامترهای ماشینکاری) قابل انجام است [11، 12]. به‌طور کلی می‌توان گفت که مزایای ماشینکاری خام شامل نیروهای برش کمتر، سایش ابزار کمتر و در نهایت کاهش مجموع هزینه‌ها؛ و معایب آن شامل تحمل پایین نیروهای ماشینکاری و گیره‌بندی توسط خشته و نیز کیفیت پایانی ضعیف‌تر است [12].

قطعات متالورژی پودر به‌طور کلی قابلیت ماشینکاری ضعیف‌تری نسبت به قطعات کار شده دارند که عامل تأثیرگذار کلیدی آن وجود تخلخل در ساختار آن‌ها است. تخلخل باعث تبدیل یک ساختار موادی پیوسته به یک ساختار ناپیوسته می‌شود که متعاقباً باعث ایجاد برش منقطع، بروز اثرات منفی بر روی طول عمر ابزار و صافی سطح پس از ماشینکاری می‌شود [12]. قطعات متالورژی پودر بر خلاف قابلیت ماشینکاری ضعیف، این امتیاز را دارند که به حجم براده‌برداری کمتری نیاز دارند. علاوه بر این با توجه به اینکه عملیات

2- Regression analysis
3- Analysis Of Variance (ANOVA)
4- Response Surface Method (RSM)
5- Central Composite Design (CCD)

1- Jet milling method



شکل 1 الف) شکل و اندازه براده‌های چدن خاکستری استفاده شده برای تولید پودر، ب) پودرهای نهایی تولید شده به روش آسیاب پاششی

دو بخش خام و تفجوشی شده مورد بررسی قرار گرفت. در بخش خام امکان ماشینکاری نمونه‌های پرس شده 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 ماشین فرز مدل FP4MK ماشین‌سازی تبریز و مته‌های مارپیچی HSS با پوشش TiN با قطر 6 mm، زاویه مارپیچ 30° و زاویه رأس مته 120° استفاده شدند. در بخش خام، هر نمونه، با سرعت پیشروی ثابت 15 mm/min و با دو سرعت برشی 7/5 و 20 مورد آزمایش قرار گرفته و قابلیت آن نمونه برای عملیات ماشینکاری خام به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری قابلیت ماشینکاری قطعات تفجوشی شده در مرحله اول از دینامومتر سه مؤلفه‌ای KISTLER مدل 9257B استفاده شد. در این بخش عملیات، با سرعت پیشروی ثابت 40 mm/min و سرعت برشی 7/5 m/min انجام گرفت. دلیل انتخاب سرعت برشی نسبتاً پایین این است که عملیات سوراخکاری با سرعت برش پایین در قطعات متالورژی پودر، نسبت به تغییرات ریزساختاری حساسیت بیشتری دارد [12]. برای هر ردیف آزمایش دو نمونه ماشینکاری شد. پس از ماشینکاری هر سوراخ اطلاعات به دست آمده از فرایند ماشینکاری در یک فایل توسط نرم‌افزار داینور 2 ذخیره شده و سپس از روی نمودارهای به دست آمده از آن مقادیر نیروی محوری و گشتاور ایجاد شده در ماشینکاری آن سوراخ به دست آمد. پس از عملیات سوراخکاری، نمونه‌ها از محل قطر سوراخ بریده شده و زبری سطح آن‌ها توسط دستگاه زبری‌سنج مار 3 مدل Marsurf PS1 اندازه‌گیری شد. آزمایش زبری‌سنجی با طول کورس 1/75 mm بر روی سطح سوراخ شده نمونه و برای هر نمونه 5 بار در نقاط مختلف آن تکرار شده و عدد دقیق زبری سطح (Ra) به صورت حاصل میانگین این اعداد تعیین شد.

جدول 1 متغیرهای مستقل فرایند و سطوح آن‌ها

متغیر	علامت	واحد	سطوح				
			-2	-1	0	1	2
درصد پودر چدن	CIP	[-]	30	40	50	60	70
فشار تراکم	P	[MPa]	400	500	600	700	800
دمای تفجوشی	STe	[°C]	1050	1080	1110	1140	1170
زمان تفجوشی	STi	[min]	20	30	40	50	60

سطوح بالا و پایین هر پارامتر به ترتیب با 2+ و 2- کد شده و مقدار کد شده هر سطح دلخواه میانی با استفاده از رابطه (1) محاسبه می‌شود [19]:

$$X_i = \frac{2X - (X_{\max} + X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})/2} \quad (1)$$

که در آن X_i مقدار کد شده برای فاکتور دلخواه با مقدار واقعی X (بین $X_{\min}$ و $X_{\max}$) است. $X_{\max}$ و $X_{\min}$ نیز به ترتیب حدود واقعی پایین و بالای فاکتورها هستند.

برای بررسی خواص قطعات تفجوشی شده، پارامترهای درصد پودر چدن، فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی هر کدام در پنج سطح به عنوان متغیرهای ورودی فرض شدند (مطابق جدول 1). در این بخش در مجموع 31 آزمایش طراحی شد، که شامل 16 نقطه آزمایش در نقاط عاملی در رئوس مکعب، هشت نقطه آزمایش در نقاط محوری و هفت نقطه آزمایش در مرکز مکعب است. جدول 2 ترکیب 31 آزمایش طراحی شده به همراه فاکتورهای آزمایش و سطوح هر فاکتور را نشان می‌دهد. در این بخش، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده نیروی محوری و نیروی گشتاوری سوراخکاری، و زبری سطح پس از ماشینکاری هستند.

2-2- تولید پودر چدن و تهیه نمونه‌ها

براده‌های چدن خاکستری از نوع پرلیتی لایه‌ای به دست آمده از تراشکاری خشک حاوی 3/5% کربن، و همچنین پودر آهن افشانشی تجاری خالص حاوی 0/02% کربن، به عنوان مواد اولیه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. شکل براده‌های اولیه در تصویر SEM شکل 1 الف) دیده می‌شود. براده‌ها توسط روش آسیاب پاششی و با استفاده از متغیرهای بهینه به دست آمده از تحقیق انجام شده قبلی [6]، تبدیل به پودر شدند. برای این منظور مقدار 5 کیلوگرم از براده‌های اولیه در پنج چرخه تحت عملیات آسیاب پاششی قرار گرفتند. عملیات بهینه مورد استفاده عبارت از: نرخ تغذیه 9 g/s، زاویه برخورد 90°، فاصله نازل تا صفحه هدف 8 cm و فشار هوای 0/6 MPa. جدول 3 اندازه نهایی پودرهای استفاده شده برای ساخت قطعات را نشان می‌دهد. شکل 1 ب) نیز تصویر SEM پودرهای تولید شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پودرها از نوع پولکی، گوشه‌دار و نامنظم و با سطوح زبر هستند. توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های فیزیکی پودر آهن افشانشی مورد استفاده نیز در جدول 3 آمده است. نرخ جریان و چگالی ظاهری پودرها (جدول 3) با استفاده از جریان‌سنج هال 1 و مطابق با استانداردهای به ترتیب ASTM B213-97 [20] و ASTM B212-99 [21]، به دست آمدند.

پس از آماده‌سازی پودرها، ترکیب‌های پودری آهن-چدن با درصد‌های مختلف چدن تحت فشارهای تک‌محوری مختلف در داخل قالبی با حفره مستطیلی، به ابعاد 31/7 mm در 12/7 mm، فشرده شدند (با ضخامت بین 6/5 الی 8 mm بسته به پارامترهای ساخت). روانکاری قالب با محلول 10% استئیریت روی و طبق استاندارد ASTM B331-95 [22] انجام شد. سپس، خسته‌های 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.

2-3- آزمایش سوراخکاری

در این بخش خواص ماشینکاری نمونه‌های متالورژی پودر تهیه شده در

2- Dynaware
3- Mahr (Marsurf PS1)

1- Hall flowmeter

جدول 2 ماتریس طراحی آزمایش به همراه نتایج اندازه گیری شده برای خواص ماشینکاری قطعات تفجوشی شده

شماره آزمایش	درصد پودر چدن	فشار تراکم	دمای تفجوشی	زمان تفجوشی	نیروی محوری (N)	نیروی گشتاوری (Nm)	زبری سطح (Ra)
1	0	0	0	2	127/4	3/00	2/45
2	2	0	0	0	96/3	1/64	1/77
3	0	0	0	0	117/6	3/07	2/66
4	1	-1	1	-1	113/4	2/26	2/91
5	0	0	0	0	115/5	2/84	2/60
6	0	0	0	0	116/5	2/85	2/55
7	0	2	0	0	138/7	3/95	1/89
8	0	0	0	0	120/4	3/10	2/63
9	1	-1	-1	1	101/5	2/13	3/04
10	1	-1	1	1	117/6	2/43	2/34
11	-1	1	-1	-1	125/0	3/25	3/02
12	-1	-1	-1	1	114/0	2/31	3/27
13	1	1	-1	-1	109/7	2/21	2/17
14	-1	-1	1	1	127/1	3/23	2/85
15	0	0	-2	0	98/6	1/92	3/45
16	-1	1	1	-1	137/3	3/94	2/65
17	-1	1	1	1	141/5	4/12	2/12
18	1	-1	-1	-1	94/2	1/88	3/38
19	-1	-1	1	-1	121/4	2/68	3/15
20	0	0	0	0	118/3	3/00	2/61
21	1	1	1	-1	117/6	2/84	1/76
22	-2	0	0	0	139/9	3/92	3/07
23	0	0	2	0	138/5	3/35	2/28
24	0	0	0	0	119/0	2/85	2/67
25	-1	1	-1	1	130/9	3/56	2/95
26	0	0	0	-2	114/8	2/35	2/95
27	0	0	0	0	119/8	3/19	2/69
28	1	1	1	1	134/0	2/87	1/54
29	-1	-1	-1	-1	116/1	2/62	3/67
30	1	1	-1	1	112/2	2/58	2/13
31	0	-2	0	0	103/7	1/89	3/95

جدول 3 توزیع اندازه پودرهای استفاده شده

توزیع اندازه ذرات پودر چدن خاکستری آسیاب پاششی استفاده شده				
اندازه ذرات (μm)	106-180	75-106	45-75	-45
کسر وزنی (%)	62/08	21/42	10/77	5/73
توزیع اندازه ذرات پودر آهن تجاری				
اندازه ذرات (μm)	106-180	75-106	45-75	-45
کسر وزنی (%)	34/17	22/43	32/26	11/14
توزیع اندازه ذرات پودر فولاد				
اندازه ذرات (μm)	106-180	75-106	45-75	-45
کسر وزنی (%)	34/17	22/43	32/26	11/14

3- نتایج و بحث

3-1- خسته‌های خام

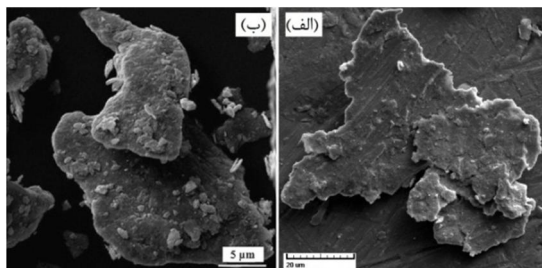
جدول 4 نتایج حاصل از ماشینکاری خام خسته‌های تهیه شده با پارامترهای ساخت مختلف را از نظر شکل و یکپارچگی لبه سوراخ‌ها نشان می‌دهد. مطابق این جدول، اولین نتیجه مطلوب در ماشینکاری خام، مقاومت و استحکام تمام

خسته‌های خام در برابر نیروهای گیره‌بندی و ماشینکاری بدون شکست نمونه‌ها در هر دو شرایط ماشینکاری است. اما، برخی از نمونه‌ها در حین عملیات سوراخکاری دچار لب‌پریدگی در لبه سوراخ‌ها شده و در این آزمون از نقطه نظر کاربرد صنعتی مردود شدند. با این حال، سوراخ‌های مورد نظر در تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها در هر دو شرایط ماشینکاری بدون هیچ‌گونه نقص و لب‌پریدگی ماشینکاری شدند.

همچنین، از نتایج این جدول می‌توان دریافت که خسته‌های خام متالورژی پودر در عملیات سوراخکاری نسبت به انتهای سوراخ (خروجی مته) از حساسیت بیشتری برخوردارند. چنین روند مشابهی در عملیات سوراخکاری خسته‌های خام پایه آهنی [15]، و سوراخکاری قطعات متالورژی پودر فولاد کم‌آلیاژ [16]، نیز مشاهده شده است. البته، این اثر در خسته‌های خام به صورت لب‌پریدگی و شکست، و در قطعات تفجوشی شده به شکل پلیسه دیده می‌شود [15، 16]. از روند موجود در جدول می‌توان دریافت که هر دو عامل درصد پودر چدن و فشار تراکم در کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده نقش اساسی دارند. همچنین، می‌توان دریافت که افزایش سرعت برشی در کیفیت

در نرم‌افزار داینور را نشان می‌دهد. در این نمودار دو خروجی نیروی محوری و گشتاور سوراخکاری به شکل گراف نمایش داده شده‌اند. برای اطمینان از ناچیز بودن سایر مؤلفه‌های نیروها، نتایج چندین نمونه آزمایشی مشابه قبل از نمونه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که در صورت وجود خطای مربوط به گرد نبودن مته، بی‌دقتی اسپیندل ماشین در هنگام چرخش و یا بی‌دقتی حرکت عمودی میز ماشین، ممکن است سایر نیروها به جز دو نیروی فوق نیز مقادیر محسوسی داشته باشند که باعث بروز خطا در نتایج می‌شود [24]. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده، اعداد مربوط به نیروی محوری و گشتاور از میانگین‌گیری بر روی این نمودارها در طول سیکل زمانی ماشینکاری به‌دست آمده و ثبت شد.

جدول 5 نتایج تحلیل واریانس بر روی داده‌های مربوط به نیروی محوری را نشان می‌دهد. مطابق این جدول تنها پارامترهای اصلی فرایند بر روی نیروی محوری مؤثر شناخته می‌شوند. ضریب همبستگی بالا (حدود 92%) نشان از پوشش بالای داده‌ها توسط مدل ارائه شده دارد [19]. همچنین، شکل 4 نمودار احتمال نرمال توزیع باقیمانده‌ها در تحلیل واریانس را نشان می‌دهد. مطابق شکل 4 (الف) مشاهده می‌شود که در نمودار احتمال نرمال داده‌های مربوط به نیروی محوری، باقیمانده‌ها حول خط مستقیم قطری پراکنده شده و توزیع نرمالی دارند که نشان‌دهنده صحت مدل ارائه شده و معادلات



شکل 2 پودر تولید شده با روش‌های (الف) آسیاب پاششی، (ب) آسیاب گلوله‌ای

سوراخ‌های ایجاد شده مؤثر بوده و با افزایش آن کیفیت سوراخ‌ها نیز بالاتر می‌رود. شایان ذکر است قابلیت ماشینکاری خسته‌های متالورژی پودر در قطعاتی که پس از تولید نیاز به ماشینکاری دارند، از دیدگاه صنعتی و اقتصادی یک امر مهم تلقی می‌شود، چرا که باعث کاهش هزینه‌های ماشینکاری و افزایش سرعت تولید می‌شود [12]. در خسته‌های تولید شده در این تحقیق عامل مهمی که باعث محقق شدن این موضوع گشته، استفاده از پودر چدنی است که با روش آسیاب پاششی تولید شده است. شکل 2 تفاوت بین پودرهای تولید شده با دو روش آسیاب پاششی و آسیاب گلوله‌ای را نشان می‌دهد. مطابق شکل 2 (الف) پودرهای تولید شده به روش آسیاب پاششی دارای گوشه‌های تیز به همراه 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 بوده و همچنین سطوح آن‌ها صاف و همراه با ذرات آزاد گرافیت است. علاوه بر این، پودرهای تولید شده به روش آسیاب پاششی، برخلاف پودرهای تولید شده با سایر روش‌ها مانند آسیاب گلوله‌ای، بدون ایجاد کرنش سختی تولید می‌شوند. مجموع عوامل یاد شده باعث افزایش استحکام خام این دسته از خسته‌ها شده [9،7]، و امکان ماشینکاری خام آن‌ها را فراهم می‌سازند. گفتنی است پودرهای تولید شده با سایر روش‌های مکانیکی خصوصیتی مشابه پودرهای تولید شده به روش آسیاب گلوله‌ای دارند [7]. همچنین، انتخاب سرعت پیشروی پایین تأثیر به‌سزایی در قابلیت ماشینکاری خام قطعات متالورژی پودر دارد [23].

2-3- قطعات تفجوشی شده

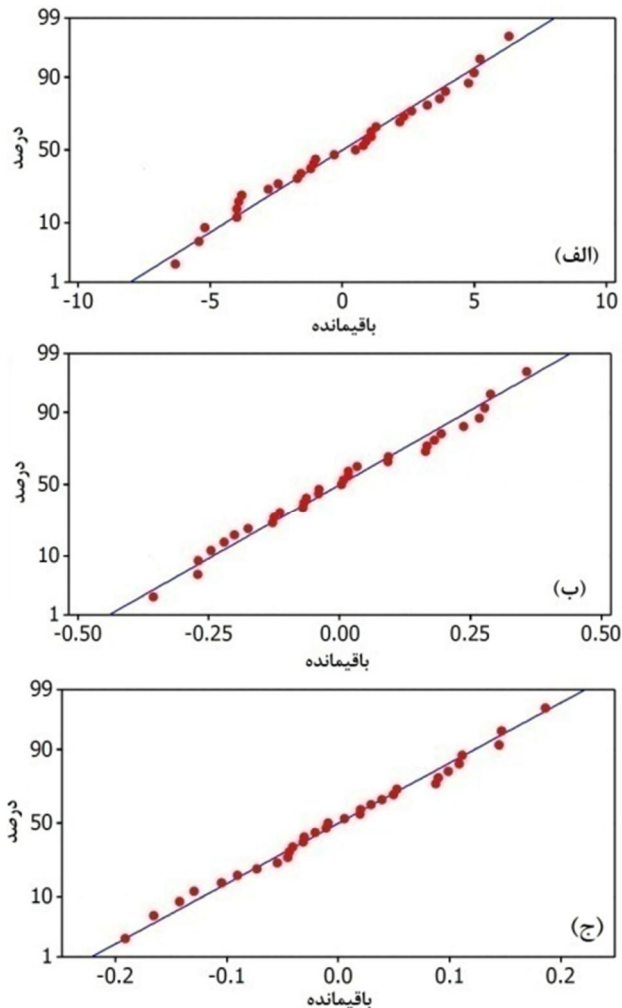
شکل 3 یک نمودار به‌دست آمده از فرایند اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری

جدول 4 نتایج حاصل از ماشینکاری خسته‌های خام

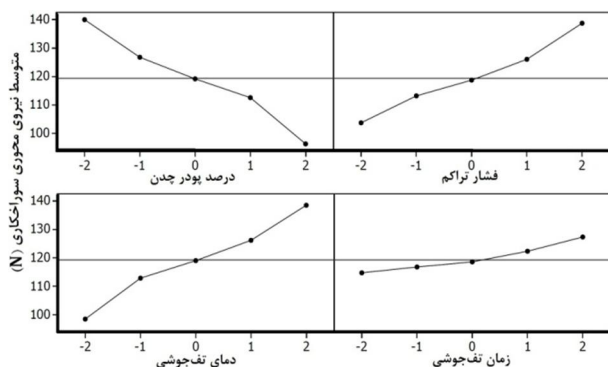
درصد پودر چدن (%)	فشار تراکم (MPa)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت برشی (m/min)	دوام در برابر نیروی گیره بندی و ماشینکاری	کیفیت سوراخ ماشینکاری شده (ورودی مته)	کیفیت سوراخ ماشینکاری شده (خروجی مته)
50	600	20	7/5	دارد	لب پریدگی	لب پریدگی شدید
			15	دارد	لب پریدگی جزئی	لب پریدگی
40	500	20	7/5	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
			15	دارد	لب پریدگی	لب پریدگی شدید
40	700	20	7/5	دارد	بدون نقص	لب پریدگی جزئی
			15	دارد	بدون نقص	بدون نقص
60	500	20	7/5	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
			15	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
30	600	20	7/5	دارد	لب پریدگی جزئی	لب پریدگی
			15	دارد	بدون نقص	لب پریدگی جزئی
70	600	20	7/5	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
			15	دارد	لب پریدگی	لب پریدگی شدید
60	700	20	7/5	دارد	بدون نقص	لب پریدگی جزئی
			15	دارد	بدون نقص	بدون نقص
50	400	20	7/5	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
			15	دارد	لب پریدگی شدید	لب پریدگی شدید
50	800	20	7/5	دارد	بدون نقص	بدون نقص
			15	دارد	بدون نقص	بدون نقص

نیروی محوری در درصدهای بالاتر پودر چدن شده است. همچنین، هر سه پارامتر فشار تراکم، دمای تفجوشی و زمان تفجوشی باعث افزایش چگالی، استحکام و سختی می‌شوند [10]، که در نهایت باعث افزایش نیروی محوری سوراخکاری نیز شده است.

نتایج تحلیل واریانس برای گشتاور سوراخکاری در جدول 6 آمده است. مطابق این نتایج تمام پارامترهای اصلی در گشتاور سوراخکاری مؤثر هستند و در بین سایر پارامترها نیز تنها پارامتر تعاملی درصد پودر چدن-فشار تراکم مؤثر است. در این بخش درصد پودر چدن بیشترین تأثیر را بر روی گشتاور



شکل 4 نمودار احتمال نرمال برای توزیع باقیمانده‌ها در تحلیل واریانس: الف) نیروی محوری، ب) نیروی گشتاوری، ج) زبری سطح

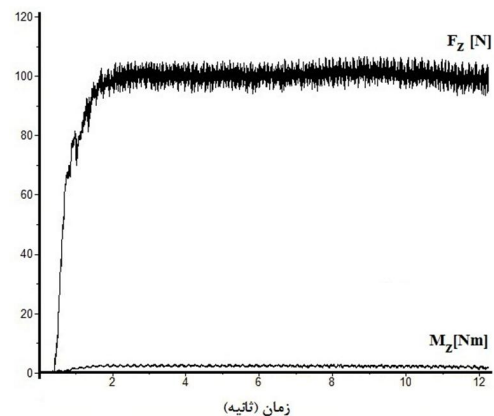


شکل 5 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی برای نیروی محوری سوراخکاری

رگرسیون استخراجی است [17]. این روند در نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های مربوط به دو پاسخ نیروی گشتاوری و زبری سطح نیز در شکل‌های 4 (ب) و 4 (ج) دیده می‌شود. نمودار توزیع مقادیر T موجود در جدول نشان می‌دهد که پارامترهای 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 پارامترها است. با توجه به پارامترهای مؤثر و همچنین ضرایب به‌دست آمده از تحلیل برای این پارامترها، معادله رگرسیون (2) برای پیش‌بینی نیروی محوری در عملیات سوراخکاری این نمونه‌ها به‌دست می‌آید.

$$F_{th} = 119.31 - 8.35CIP + 7.20P + 7.75Ste + 2.89STi \quad (2)$$

شکل 5 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی بر روی نیروی محوری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، افزایش درصد پودر چدن باعث کاهش نیروی محوری و افزایش پارامترهای فشار تراکم، دما و زمان تفجوشی باعث افزایش نیروی محوری می‌شود. با افزایش درصد پودر چدن خواصی نظیر چگالی، استحکام و سایش (مرتبط با افزایش گرافیت) در درصدهای بالا کمتر می‌شود [10]، که این سه عامل بر افزایش سختی غالب شده و باعث کاهش



شکل 3 خروجی به‌دست آمده در نرم‌افزار داینور

جدول 5 تحلیل واریانس اصلاح شده برای نیروی محوری در سوراخکاری قطعات تفجوشی شده

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار T	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	4560/43	4	1140/11	-	83/05	0/000
CIP	1671/67	1	1671/67	-11/04	121/77	0/000
P	1245/60	1	1245/60	9/53	90/73	0/000
Ste	1443/05	1	1443/05	10/25	105/12	0/000
STi	200/10	1	200/10	3/82	14/58	0/001
خطای باقیمانده	356/93	26	13/73	-	-	-
عدم برازش	338/36	20	16/92	-	5/46	0/022
خطای خالص	18/58	6	3/10	-	-	-
مجموع	4917/36	30	-	-	-	-

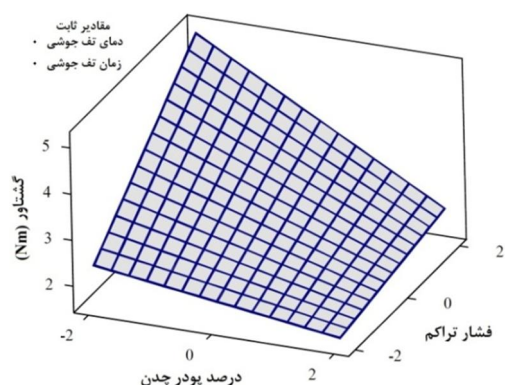
$$R^2 = 92/74\% \quad R^2(\text{adj}) = 91/62\%$$

شکل 7 منحنی رویه پاسخ برای پارامتر تعاملی مؤثر در تحلیل اخیر را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در درصد‌های پایین چدن افزایش فشار تراکم باعث افزایش شدید گشتاور شده است، در صورتی که در درصد‌های بالای چدن این افزایش جزئی است، در حالی که افزایش فشار تراکم در تمام شرایط باعث افزایش چگالی، استحکام و سختی نمونه‌ها می‌شود [10]. لذا، این مورد یک نتیجه مطلوب برای کاربرد پودرهای چدن آسیاب پاششی در ترکیب با پودر آهن محسوب می‌شود و بدین دلیل است که با افزایش پودر چدن، خواص سایشی نمونه ارتقاء یافته و با ایجاد ضریب اصطکاک کمتر (به واسطه وجود گرافیت ابقاء شده در ترکیب نمونه) باعث غلبه بر عوامل مخالف ذکر شده می‌شود. همچنین، با توجه به شکل تأثیرگذاری افزایش پودر چدن در کاهش گشتاور، در فشارهای بالای تراکم بسیار بیشتر از فشارهای پایین است. به این دلیل که در فشارهای تراکم پایین، چگالی، استحکام و سختی در شرایط نامطلوبی قرار دارند و این باعث می‌شود که تأثیر این عوامل بیشتر بوده و باعث کاهش تأثیر درصد چدن شوند.

پس از انجام تحلیل واریانس بر روی داده‌های مربوط به زبری سطح، نتایج حاصل، مطابق جدول 7، با ضریب همبستگی حدود 97% به دست آمد. همچنین، باقیمانده‌های تحلیل واریانس در نمودار احتمال نرمال مطابق شکل 4 (ج) از توزیع نرمالی برخوردار هستند که صحت مدل ارائه شده و معادله رگرسیون استخراجی را تأیید می‌کند. همان‌طور که در جدول ملاحظه می‌شود تمام پارامترهای اصلی بر روی زبری سطح تأثیرگذار هستند. همچنین، پارامترهای مرتبه دوم درصد پودر چدن، فشار تراکم و دمای تفجوشی به عنوان پارامترهای مؤثر شناخته شده‌اند. در بین پارامترهای تعاملی نیز پارامتر تعاملی درصد پودر چدن-فشار تراکم مؤثر هستند. پس از استخراج ضرایب پارامترهای مؤثر از تحلیل واریانس، معادله رگرسیون زبری سطح این نمونه‌ها مطابق رابطه (4) ارائه می‌شود.

$$R_a = 2.64 - 0.29CIP + 0.43P + 0.28STe + 0.15STi - 0.06CIP \times CIP + 0.06P \times P + 0.05STe \times STe - 0.12CIP \times P \quad (4)$$

شکل 8 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی بر روی زبری سطح حاصل از ماشینکاری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش هر چهار پارامتر اصلی، زبری سطح حاصل کاهش می‌یابد، اما مطابق مقادیر T موجود در جدول 7 میزان تأثیر آن‌ها متفاوت است. به این ترتیب که فشار تراکم بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح دارد و پس از آن دو پارامتر درصد پودر چدن و دمای تفجوشی با میزان تأثیر تقریباً یکسان در مرتبه بعدی قرار دارند. تأثیر زمان تفجوشی نیز کمتر از سایر پارامترها است. کاهش زبری



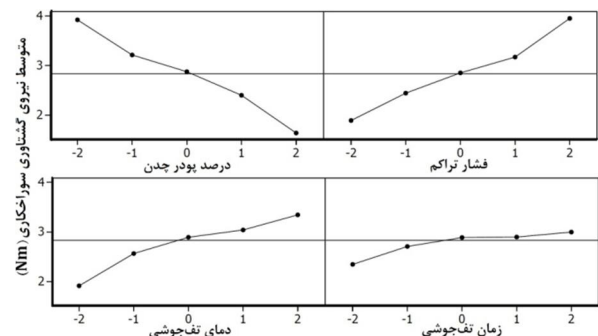
شکل 7 منحنی رویه پاسخ برای پارامتر تعاملی گشتاور سوراخکاری

سوراخکاری دارد. در این تحلیل، اولاً، ضریب همبستگی حدود 90% نشان دهنده پوشش مناسب داده‌ها توسط مدل است. همچنین، مطابق مقادیر P ، پارامتر رگرسیون مؤثر و پارامتر عدم برازش غیرمؤثر است که نشان‌دهنده دقت مدل است [19]. علاوه بر این، توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در نمودار احتمال نرمال شکل 4 (ب) نشان‌دهنده صحت مدل ارائه شده و معادله رگرسیون (3) برای پیش‌بینی گشتاور سوراخکاری است.

$$T = 2.83 - 0.46CIP + 0.42P + 0.28STe + 0.12STi - 0.14CIP \times P \quad (3)$$

شکل 6 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی بر روی گشتاور سوراخکاری را نشان می‌دهد.

مطابق این شکل و در نتایج مشابه با شکل 5، افزایش درصد چدن باعث کاهش گشتاور، و افزایش پارامترهای فشار تراکم، دما و زمان تفجوشی باعث افزایش گشتاور سوراخکاری می‌شوند. با این تفاوت که در این تحلیل علاوه بر پارامترهای اصلی، پارامتر تعاملی درصد پودر چدن-فشار تراکم نیز مؤثر است. بدین معنی که روند موجود برای تغییر گشتاور نسبت به این دو پارامتر با روند کلی نمودار تأثیر پارامترهای اصلی مطابقت کامل ندارد.

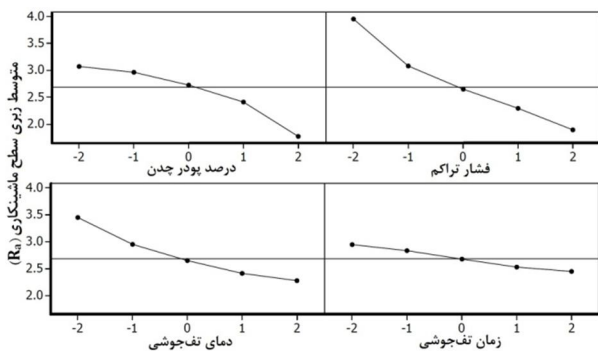


شکل 6 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی برای نیروی گشتاوری سوراخکاری

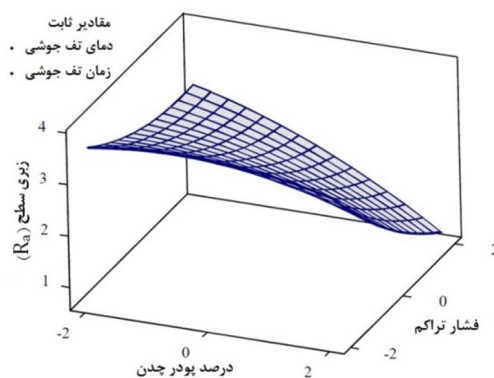
جدول 6 تحلیل واریانس اصلاح شده برای نیروی گشتاوری در سوراخکاری قطعات تفجوشی شده

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار T	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	11/745	5	2/349	-	54/74	0/000
CIP	5/106	1	5/106	-10/91	118/98	0/000
P	4/125	1	4/125	9/80	96/12	0/000
STe	1/865	1	1/865	6/59	43/46	0/000
STi	0/338	1	0/338	2/81	7/89	0/010
$CIP \times P$	0/311	1	0/311	-2/69	7/24	0/013
خطای باقی‌مانده	1/073	25	0/043	-	-	-
عدم برازش	0/953	19	0/050	-	2/50	0/130
خطای خالص	0/120	6	0/020	-	-	-
مجموع	12/818	30	-	-	-	-

$$R^2 = 91/63\% \quad R^2(\text{adj}) = 89/96\%$$



شکل 8 نمودار تأثیر پارامترهای اصلی برای زبری سطح ماشینکاری



شکل 9 منحنی رویه پاسخ برای پارامتر تعاملی زبری سطح ماشینکاری

جهت اعتبارسنجی و مقایسه بین نتایج حاصل از معادلات رگرسیون، ارائه شده و نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های ماشینکاری استفاده شده است. مقادیر پارامترهای ورودی به همراه پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط معادلات رگرسیون و همچنین نتایج تجربی برای هر نمونه در جدول 8 آمده است. مقایسه بین نتایج پیش‌بینی شده و نتایج واقعی حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که خطای بین این مقادیر بین 2 الی 10 درصد بوده و این امر نشانگر عملکرد خوب معادلات رگرسیون ارائه شده در پیش‌بینی مقادیر مورد نظر و صحت این معادلات است.

5- نتیجه‌گیری

نتایج برجسته این تحقیق عبارت‌اند از:

- 1- خسته‌های خام بازیابی شده از براده‌های چدن خاکستری به روش آسیاب پاششی در ترکیب با آهن و تحت شرایط خاص ماشینکاری قابلیت ماشینکاری خام در عملیات سوراخکاری را دارند و سرعت برشی به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار در قابلیت ماشینکاری این قطعات شناخته می‌شود.
- 2- معادلات رگرسیون استخراجی برای خواص ماشینکاری قطعات تفجوشی شده آهن-چدن آسیاب پاششی، دارای دقت کافی برای پیش‌بینی این خواص هستند، به‌طوری که خطای بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی حاصل از آزمایش‌های تکمیلی در محدوده 10%-2 قرار دارد.
- 3- حضور پودر چدن خاکستری تولید شده به روش آسیاب پاششی در ترکیب قطعه متالورژی پودر پایه آهنی باعث کاهش نیروهای محوری و گشتاوری سوراخکاری و همچنین کاهش زبری سطح می‌شود که نشان‌دهنده نقش مثبت آن در بهبود قابلیت ماشینکاری از طریق ابقای گرافیت آزاد در ساختار این دسته از قطعات است. این نتیجه، مزایای منحصر به فرد افزودن

سطح با افزایش پودر چدن را می‌توان به افزایش سهم چدن در ترکیب مربوطه نسبت داد، چرا که به واسطه حضور گرافیت‌های آزاد در ساختار آن قابلیت ماشینکاری بیشتری نسبت به آهن دارد (با معیار زبری سطح) [24]. همچنین، افزایش سختی با افزایش درصد پودر چدن می‌تواند عاملی برای کاهش زبری سطح نهایی باشد. با افزایش فشار تراکم نیز نمونه متالورژی پودر به یک نمونه کار شده نزدیک شده و با کاهش تخلخل نمونه منجر به کاهش زبری سطح می‌شود [12]. افزایش دمای تفجوشی نیز به دلیل افزایش چگالی و سختی نمونه [10]، باعث کاهش زبری سطح و افزایش قابلیت ماشینکاری این نمونه‌ها می‌شود.

شکل 9 منحنی رویه پاسخ مربوط به نحوه تأثیر پارامتر تعاملی درصد پودر چدن-فشار تراکم بر روی زبری سطح را نشان می‌دهد. مطابق شکل، افزایش فشار تراکم در درصدهای بالای پودر چدن باعث کاهش زبری سطح بیشتری نسبت به درصدهای پایین پودر چدن شده است. این امر نشان‌دهنده بهبود قابلیت ماشینکاری این دسته از قطعات با درصدهای بالای پودر چدن بوده و به‌عنوان یک حسن در استفاده از پودر چدن آسیاب پاششی شده در ترکیب با پودر آهن محسوب می‌شود. همچنین، این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که زمانی استفاده از پودر چدن بیشترین کارایی را در بهبود قابلیت ماشینکاری دارد که همراه با فشارهای تراکم بالا به‌کار برده شود. چرا که مطابق شکل، در فشارهای تراکم پایین افزایش درصد پودر چدن باعث کاهش جزئی زبری سطح شده است، زیرا افزایش درصد پودر چدن همراه با افت چگالی است و فشارهای پایین قادر به جبران آن نیستند، اما در فشارهای بالا، به‌دلیل جبران اثر منفی کاهش چگالی (افزایش تخلخل) بر روی زبری سطح، کاهش زبری سطح با شیب بیشتری اتفاق افتاده است.

4- صحت‌گذاری معادلات رگرسیون

در این بخش چهار نمونه از قطعات تهیه شده در تحقیقات قبلی [10]،

جدول 7 تحلیل واریانس اصلاح شده برای زبری سطح ماشینکاری در سوراخکاری قطعات تفجوشی شده

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار T	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	9/433	8	1/179	-	95/52	0/000
CIP	2/048	1	2/048	-12/879	165/86	0/000
P	4/498	1	4/498	-19/088	364/36	0/000
Ste	1/843	1	1/843	-12/217	149/26	0/000
STi	0/502	1	0/502	-6/375	40/64	0/000
CIP×CIP	0/106	1	0/106	-2/933	8/60	0/008
P×P	0/120	1	0/120	3/117	9/72	0/005
STe×STe	0/074	1	0/074	2/452	6/01	0/023
P×CIP	0/219	1	0/219	-4/208	17/70	0/000
خطای باقی‌مانده	0/272	22	0/012	-	-	-
عدم برازش	0/258	16	0/016	-	7/01	0/012
خطای خالص	0/014	6	0/002	-	-	-
مجموع	9/705	30	-	-	-	-

$$R^2 = 97/20\% \quad R^2(\text{adj}) = 96/18\%$$

جدول 8 مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از معادلات رگرسیون

نیروی گشتاوری (Nm)		نیروی محوری (N)		زبری سطح (R_a)		مقادیر ورودی			
مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	مشاهده	پیش‌بینی	STi (min)	Ste (°C)	P (MPa)	CIP (%)
3/95	4/28	130/3	137/0	2/86	2/75	60	1066	800	39/3
5/01	5/18	153/8	163/2	1/81	1/85	60	1170	800	40/2
4/62	4/41	160/2	154/5	1/44	1/36	60	1170	800	50/6
3/83	3/67	148/9	146/2	0/85	0/77	60	1170	800	60/6

- [9] H. Abdollahi, R. A. Mahdaviinejad, V. Zal, M. Ghambari, Optimization of mechanical properties of iron-based recycled powder metallurgy parts and investigation of these properties by transverse rupture test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 149-157, 2014. (In Persian)
- [10] H. Abdollahi, R. A. Mahdaviinejad, R. Panahi, M. Ghambari, M. Morad, Investigation and optimization of properties of sintered iron/recycled grey cast iron powder metallurgy parts, *Engineering Manufacture*, Revised article, Published online, DOI: 10.1177/0954405414535579, 2014.
- [11] R. M. German, *Powder metallurgy science*, Translated by M. Haerian Yazdi, 1st Ed., Mashhad: Daneshgah Ferdosi Mashad, 2006. (In Persian)
- [12] A. Salak, M. Selecka, H. Danninger, *Machinability of Powder Metallurgy Steels*, 1st Ed., England: CISP, 2005.
- [13] A. Salak, K. Vasilko, M. Seleck, H. Danninger, New short time face turning method for testing the machinability of PM steels, *Materials Processing Technology*, Vol. 176, pp. 62-69, 2006.
- [14] A. A. Bomont, M. Confente, E. Schneider, O. Bomont, C. Lescailier, Machinability in drilling mechanistic approach and new observer development, *Material Forming*, Vol. 3, pp. 495-498, 2010.
- [15] E. R. Perron, C. Blais, S. Pelletier, Y. Thomas, Drilling of high quality features in green powder metallurgy components, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 458, pp. 195-201, 2007.
- [16] M. Czampa, S. Markos, T. Szalay, Improvement of drilling possibilities for machining powder metallurgy materials, *46th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Setubal, Portugal, pp.288-293, 2013.
- [17] A. I. Khuri, J. A. Cornell, *Response Surfaces Design and Analysis*, 2nd Ed., New York: Marcel Dekker, 1996.
- [18] D. Chatterjee, B. Oraon, G. Sutradhar, P. K. Bose, Prediction of hardness for sintered HSS components using response surface method, *Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 123-129, 2007.
- [19] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 3rd Ed., New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [20] ASTM Standard B 213-97, *Flow rate of metal powders*.
- [21] ASTM Standard B 212-99, *Apparent density of free flowing metal powders using the hall flowmeter funnel*.
- [22] ASTM Standard B 331-95, *Compressibility of metal powders in uniaxial compaction*.
- [23] E. R. Perron, C. Blais, Y. Thomas, S. Pelletier, M. Dionne, An integrated approach to the characterization of powder metallurgy components performance during green machining, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 402, pp. 325-334, 2005.
- [24] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane, *Metal Machining: Theory And Applications*, 1st Ed., Great Britain: Arnold, 2000.

پودر چدن خاکستری آسیاب پاششی شده حاصل از بازیابی براده به پودر آهن تجاری جهت تولید قطعات متالورژی پودر را بیش از پیش تقویت می‌کند.

4- در سوراخکاری قطعات تفجوشی شده ترکیب چدن آسیای پاششی آهن، زبری سطح زیر 1 میکرون به راحتی قابل دستیابی است.

5- تأثیر مثبت افزودن پودر چدن به پودر آهن در بهبود قابلیت ماشینکاری، در فشارهای تراکم بالاتر، بیشتر و محسوس‌تر است.

6- زمان تفجوشی کمترین تأثیر را بر روی قابلیت ماشینکاری این دسته از قطعات دارد.

6- مراجع

- [1] H. H. Hausner, M. K. Mal, *Handbook of Powder Metallurgy*, 2nd Ed., New York: Chemical Pub. Co. Inc., 1982.
- [2] P. Kjeldsteen, Recycling of cast iron swarf by the powder metallurgy technique, *Materials in Engineering*, Vol. 3, pp. 335-340, 1982.
- [3] A. T. Mamedov, A. A. Guliev, Production of powder from cast-iron chips and the features of preparation of parts from them, I: Production of powder, their structure, and properties, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 7, pp. 508-512, 1989.
- [4] D. A. Karandikar, Processing of cast iron scrap from the diesel engine manufacturing industry by powder metallurgy techniques, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 5, pp. 61-71, 1991.
- [5] M. L. Parucker, C. E. Costa, Study of the recycling grey cast iron swarf by powder metallurgy: an alternative for the development of new materials, *Materials Science Forum*, Vol. 53, pp. 3-9, 2006.
- [6] M. Ghambari, M. Emadi Shaibani, N. Eshraghi, Production of grey cast iron powder via target jet milling, *Powder Technology*, Vol. 221, pp. 318-324, 2012.
- [7] M. Emadi Shaibani, M. Ghambari, Characterization and comparison of grey cast iron powder produced by target jet milling and high energy ball milling of machining scraps, *Powder Technology*, Vol. 212, pp. 278-283, 2011.
- [8] H. Abdollahi, R. A. Mahdaviinejad, M. Ghambari, M. Moradi, Investigation of green properties of iron/jet milled grey cast iron compacts by response surface method, *Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 4, pp. 493-503, 2014.