



بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودر بازیابی شده پایه آهنی و بررسی این خواص با آزمون شکست عرضی

هادی عبداللهی^۱، رمضان‌علی مهدوی‌نژاد^{۲*}، وحید زال^۳، محمد قمبری^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۵۱۵۱۴۳۹۵، mahdavin@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق براده‌های تراشکاری چدن خاکستری به روش آسیای پاششی به صورت پودر بازیابی شده و در ترکیب با پودر آهن برای تولید قطعات متالورژی پودر پایه آهنی به کار رفت. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش رویه پاسخ در دو بخش خسته‌های خام و قطعات تفجوشی شده انجام گرفت. در بخش اول پارامترهای درصد پودر چدن و فشار تراکم، و در بخش دوم دو پارامتر قبلی همراه با پارامترهای دما و زمان تفجوشی به عنوان متغیرهای ورودی هر کدام در پنج سطح انتخاب شدند. استحکام شکست عرضی و مدول الاستیک به عنوان پاسخ‌های مورد نظر اندازه‌گیری شدند. تحلیل رگرسیون و واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی، ارائه مدل‌های ریاضی و ارزیابی صحت مدل‌ها به کار رفتند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نوری برای درک بهتر مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج به دست آمده علاوه بر تعیین تأثیر پارامترهای مختلف، خواص مکانیکی مناسب قطعات تولیدی در مقیاس صنعتی و دقت مدل‌های ارائه شده را نیز نشان می‌دهد. همچنین، روش ارائه شده برای تخمین مدول الاستیک قطعات متالورژی پودر از روی منحنی نیرو-جابجایی کارایی خوبی را از خود نشان داد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۰۷ مرداد ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۶ بهمن ۱۳۹۲
کلید واژگان:
چدن خاکستری
آسیای پاششی
روش رویه پاسخ
استحکام شکست عرضی
مدول الاستیک

Optimization of mechanical properties of iron-based recycled powder metallurgy parts and investigation of these properties by transverse rupture test

Hadi Abdollahi¹, Ramezan Ali Mahdavinejad^{2*}, Vahid Zal³, Mohammad Ghambari⁴

1-Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

2- Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

3- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- Department of Material Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

*P.O.B. 51514395 Tehran, mahdavin@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 July 2013
Accepted 05 September 2013
Available Online 15 February 2014

Keywords:

Grey cast iron
Jet milling
Response surface method
Transverse rupture strength
Elastic modulus

ABSTRACT

In this research, grey cast iron scraps were recycled into powders and were then used in combination with iron powder for producing iron based powder metallurgy parts. Design of experiments was conducted by response surface method for both the green and sintered parts. For the green properties, the parameters cast iron powder percentage and compaction pressure, and for the sintered parts, the mentioned parameters in addition to sintering temperature and sintering time were selected in five levels as the input process parameters. Transverse rupture strength and elastic modulus were measured as the responses. 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. Scanning electron microscopy and optical microscopy micrographs were provided to better understand. The obtained results, in addition to determine the effects of the input parameters, demonstrated the adequate mechanical properties of the produced parts in industrial scales and the validity of the proposed models. Also, the proposed method demonstrated its good capability for estimation of elastic modulus of powder metallurgy parts.

۱- مقدمه

برای ساخت قطعات از پودرهای اولیه است. فناوری متالورژی پودر پیشرفته در سال ۱۹۲۰ میلادی با تولید قطعات کاربرد تنگستن آغاز شد و در پی آن

فناوری متالورژی پودر یک فرایند سریع، اقتصادی، دقیق و با حجم تولید بالا

Please cite this article using:

H. Abdollahi, R.A. Mahdavinejad, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برای تولید بوش‌های برنزی متخلخل برای یاتاقان‌ها و همچنین اتصالات الکتریکی مس-گرافیت به کار رفت [۱].

ماشین‌کاری قطعات فلزی یکی از روش‌های مرسوم تولید است که در نتیجه آن مقادیر زیادی براده ایجاد می‌شود. ذوب کردن یکی از روش‌های بازبایی این براده‌هاست، اما در این روش حدود ۳۰ درصد از ماده اولیه به ویژه عناصر آلیاژی از بین می‌روند. بنابراین تبدیل این براده‌ها با روش‌های مناسب به پودرهای قابل استفاده در صنعت متالورژی پودر می‌تواند مزایایی را در پی داشته باشد [۲]. در میان براده‌های فلزی چدن خاکستری به دلیل مقادیر بالای تولید، قیمت پایین، شکنندگی، اندازه کوچک براده و عدم آلودگی به روانکار دارای پتانسیل بالایی برای این کار است [۳].

برای تبدیل براده‌های چدن خاکستری به پودر اغلب روش‌های مکانیکی از قبیل آسیای گلوله‌ای [۴]، آسیای چکشی [۵] و آسیای لزشی [۶]، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین 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 گردد. این کار هم‌زمان سبب کاهش مصرف پودر آهن می‌شود که گران‌تر از چدن است. بازدهی افزودن پودر چدن خاکستری بازبایی شده با روش‌های سنتی به پودر آهن در مقیاس صنعتی بسیار پایین است، زیرا روش‌های مذکور زمان‌بر بوده و نیاز به عملیات ثانویه آنیلینگ بر روی پودرها دارند. همین‌طور، خواص مکانیکی خسته‌های خام تولید شده از این پودرها به دلیل ویژگی‌های خاص پودرهای تولیدی محدود شده و بر روی خواص پس از تفجوشی نیز تأثیر می‌گذارد [۷].

به تازگی یک روش جدید آسیا به نام آسیای پاششی^۱ ارائه شده است [۸]، که در این روش 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 سبب متلاشی شدن براده‌ها می‌شود. در این مطالعه پارامترهای بهینه فرایند آسیای پاششی برای تبدیل براده‌ها به پودر به دست آمد. در تحقیق مشابه بعدی [۹]، پودرهای چدن خاکستری با دو روش آسیای گلوله‌ای و آسیای پاششی تولید شده و خواص فیزیکی پودرها و خواص خسته‌های خام تولید شده از این پودرها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پودرهای تولید شده به روش آسیای پاششی دارای گوشه‌های تیزتر و سطوح زبرتر بوده و قابلیت تراکم بیشتری دارند. در تحقیق بعدی [۱۰]، قطعات چدنی تولید شده از پودرهای چدن آسیای پاششی تفجوشی شده و چگالی و سختی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، قطعه فشرده شده تحت فشار ۸۰۰ MPa و تفجوشی شده در دمای ۱۱۷۵ °C به مدت ۳۰ دقیقه، چگالی ۶/۱ g/cm³ و سختی ۹۶ برینل را از خود نشان داد.

امروزه روش‌های ریاضی و آماری به طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی و پیش‌بینی فرایندهای تولید به کار می‌روند. روش رویه پاسخ^۲ به عنوان 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 به کار می‌رود [۱۱]. روش رویه پاسخ به طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی فرایندهای تولید مختلف از قبیل ماشین‌کاری [۱۲]، فورج [۱۳]، جوش کاری [۱۴]، ریخته‌گری [۱۵]، قالب‌گیری تزریقی [۱۶] و همچنین

متالورژی پودر [۱۷] مورد استفاده قرار گرفته است.

برای بررسی خواص مکانیکی مواد ترد بنا به سه دلیل نمی‌توان از تست کشش استفاده کرد: ۱- آماده کردن نمونه ماده ترد به شکل هندسی استاندارد تست کشش بسیار مشکل است؛ ۲- بستن ماده ترد به گیره دستگاه بدون شکست مشکل است؛ ۳- مواد ترد در لحظه شکست کرنش بسیار کمی دارند که عملاً اندازه‌گیری این کرنش با تست کشش بسیار سخت است؛ بنابراین استفاده از آزمون شکست عرضی برای این مواد بسیار مرسوم است [۱۸]. در این آزمون نمونه‌ای با مقطع دایره‌ای و یا مستطیلی با بارگذاری نقطه‌ای در سه یا چهار نقطه تا لحظه شکست خم می‌شود. در این آزمون برای محاسبه تنش در لحظه شکست از روابط تغییر شکل الاستیک خطی استفاده می‌شود، البته این روابط در مقایسه با نتایج تست کشش، فقط برای مواد ترد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای مواد ضربه‌پذیر هیچ رابطه صریح و ساده‌ای بین استحکام کششی ماده و استحکام عرضی وجود ندارد [۱۹].

در این تحقیق، براده‌های تراشکاری چدن خاکستری از طریق فرایند آسیای پاششی به پودر تبدیل شده و سپس با پودر آهن مخلوط می‌شوند. روش‌های رویه پاسخ، تحلیل رگرسیون^۳ و واریانس^۴ برای بررسی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی خسته‌های خام و قطعات تفجوشی شده در آزمون شکست عرضی به کار می‌روند.

۲- طراحی و انجام آزمایش‌ها

۲-۱- طراحی آزمایش

در این تحقیق آزمایش‌ها بر اساس طرح مرکب مرکزی^۵ پنج سطحی روش رویه پاسخ طراحی شدند. متغیرهای ورودی فرایند و سطوح طراحی آزمایش همراه با مقادیر کد شده و واقعی متغیرها در جدول ۱ آمده است. سطوح بالا و پایین هر پارامتر به ترتیب با ۲+ و ۲- کد شده و مقدار کد شده هر سطح دلخواه میانی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۰]:

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

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

طراحی آزمایش در دو بخش جداگانه برای خسته‌های خام و قطعات تفجوشی شده انجام گرفت. در بخش اول برای ارزیابی خواص خسته‌های خام، درصد پودر چدن و فشار تراکم هر کدام در پنج سطح به عنوان متغیرهای ورودی فرض شدند (جدول ۱). در این بخش در مجموع ۱۳ آزمایش طراحی شد که شامل چهار نقطه آزمایش در نقاط عاملی در رئوس مکعب، چهار نقطه آزمایش در نقاط محوری و پنج نقطه آزمایش در مرکز مکعب است.

جدول ۱ متغیرهای مستقل فرایند و سطوح آن‌ها

متغیر	علامت	واحد	سطوح				
			۲-	۱-	۰	۱	۲
درصد پودر چدن	CIP	[-]	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
فشار تراکم	P	[MPa]	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰
دمای تفجوشی	STe	[°C]	۱۰۵۰	۱۰۸۰	۱۱۱۰	۱۱۴۰	۱۱۷۰
زمان تفجوشی	STi	[min]	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰

3- Regression analysis

4- Analysis of Variance (ANOVA)

5- Central Composite Design (CCD)

1- Jet milling method

2- Response Surface Method (RSM)

جدول ۲ ترکیب شیمیایی مواد اولیه

ترکیب شیمیایی براده چدن خاکستری							
عنصر	C	Si	Mn	Cr	S	Sn	P
درصد وزنی	۳/۳-۳/۵	۲/۰-۲/۲	۰/۵۵-۰/۷۵	۰/۰۶-۰/۱۲	۰/۰۶-۰/۰۹	۰/۰۱-۰/۰۳	۰/۰۵<
ترکیب شیمیایی پودر آهن تجاری							
عنصر	C	Si	P	S	Mn	Fe	مابقی
درصد وزنی	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۱۵		

جدول ۳ توزیع اندازه پودرهای استفاده شده

توزیع اندازه ذرات پس از ۵ مرحله آسیای پاششی بر روی ۵ کیلوگرم براده چدن خاکستری					
اندازه ذرات (μm)	۲۵۰-۶۰۰	۱۰۶-۲۵۰	۷۵-۱۰۶	۴۵-۷۵	-۴۵
کسر وزنی (%)	۶۳/۷	۲۶/۴	۵/۶	۲/۸	۱/۵
توزیع اندازه ذرات پودر چدن خاکستری آسیای پاششی استفاده شده					
اندازه ذرات (μm)	۱۰۶-۱۸۰	۷۵-۱۰۶	۴۵-۷۵	-۴۵	
کسر وزنی (%)	۶۲/۰۸	۲۱/۴۲	۱۰/۷۷	۵/۷۳	
چگالی ظاهری: ۲/۵۶ (g/cm ³)	نرخ جریان (هال): ۳۹/۵۱ (s/50g)				
توزیع اندازه ذرات پودر آهن تجاری					
اندازه ذرات (μm)	۱۰۶-۱۸۰	۷۵-۱۰۶	۴۵-۷۵	-۴۵	
کسر وزنی (%)	۳۴/۱۷	۲۲/۴۳	۳۲/۲۶	۱۱/۱۴	
چگالی ظاهری: ۳/۱۱ (g/cm ³)	نرخ جریان (هال): ۲۴/۵۵ (s/50g)				

نرخ تغذیه ۴۰ g/s، زاویه برخورد ۹۰°، فاصله نازل تا صفحه هدف ۸ cm و فشار هوای ۰/۶ MPa. پس از پنج مرحله پاشش توزیع اندازه ذرات مطابق جدول ۳ به دست آمد. این جدول اندازه نهایی پودرهای استفاده شده برای ساخت قطعات را نیز نشان می‌دهد. شکل ۱-ب نیز تصویر SEM پودرهای تولید شده نهایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پودرها از نوع پولکی، گوشه‌دار، نامنظم و با سطوح زبر هستند. توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پودر آهن افشانشی مورد استفاده نیز در جداول ۲ و ۳ آمده است. نرخ جریان و چگالی ظاهری پودرها (جدول ۳) با استفاده از جریان‌سنج هال^۱ و مطابق با استانداردهای به ترتیب ASTM B213-97، و ASTM B212-99 [۲۲]، به دست آمدند.

پس از آماده‌سازی پودرها، ترکیب‌های پودری آهن-چدن با درصدهای مختلف چدن تحت فشارهای تک محوری مختلف در داخل قالبی با حفره مستطیلی به ابعاد ۳۱/۷mm در ۱۲/۷mm فشرده شدند (با ضخامت بین ۶/۵ الی ۸mm بسته به پارامترهای ساخت). روان‌کاری قالب با محلول ۱۰ درصد استریت روی و طبق استاندارد ASTM B331-95 [۲۳]، 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. استحکام شکست عرضی^۲ خسته‌های خام و قطعات تفجوشی شده با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای و با سرعت ۱ mm/min، طبق استاندارد ASTM B 528-99 [۲۴]، به دست آمد. شکل ۲-الف یکی از نمونه‌های ساخته شده را بر روی دستگاه تست فشار همراه با بند^۳ مخصوص آزمایش خمش سه نقطه‌ای، و شکل ۲-ب همان نمونه را پس از انجام آزمایش و شکست قطعه نشان می‌دهد.

۳- استخراج نتایج از آزمون شکست عرضی

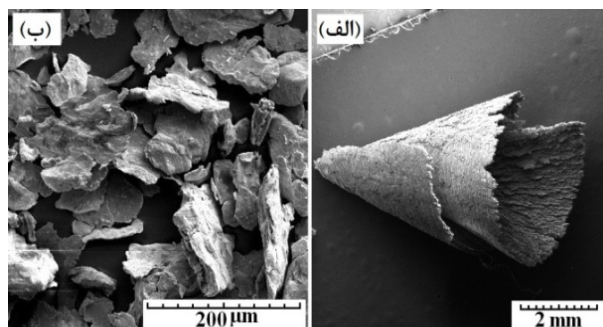
برای موادی که روابط تنش کرنش خطی دارند، تنش شکست (σ_r) می‌تواند با

در بخش دوم نیز برای بررسی خواص قطعات تفجوشی شده، پارامترهای درصد پودر چدن، فشار تراکم، دما و زمان تفجوشی هر کدام در پنج سطح به‌عنوان متغیرهای ورودی فرض شدند (جدول ۱). در این بخش نیز در مجموع ۳۱ آزمایش طراحی شد که شامل ۱۶ نقطه آزمایش در نقاط عاملی در رئوس مکعب، هشت نقطه آزمایش در نقاط محوری و هفت نقطه آزمایش در مرکز مکعب است. در هر دو بخش خام و تفجوشی شده، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده استحکام شکست عرضی و مدول الاستیکاست.

۲-۲- تولید پودر چدن و انجام آزمایش‌ها

براده‌های چدن خاکستری از نوع پرلیتی لایه‌ای به دست آمده از تراش کاری خشک به‌عنوان ماده اولیه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول ۲ گزارش شده است. همچنین شکل براده‌های اولیه در تصویر SEM شکل ۱-الف دیده می‌شود.

براده‌ها توسط روش آسیای پاششی و با استفاده از متغیرهای بهینه به دست آمده از تحقیق انجام شده قبلی [۸]، تبدیل به پودر شدند. برای این منظور مقدار ۵ کیلوگرم از براده‌های اولیه در پنج چرخه تحت عملیات آسیای پاششی قرار گرفتند. عملیات بهینه مورد استفاده عبارت‌اند از:



شکل ۱ الف) شکل و اندازه براده‌های چدن خاکستری استفاده شده برای تولید پودر،

ب) پودرهای نهایی تولید شده به روش آسیای پاششی

1- Hall flowmeter
2- Transverse Rupture Strength (TRS)
3- Fixture

جدول ۵ تحلیل واریانس اصلاح شده برای مدول الاستیک خسته‌های خام

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار T	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	۲۸۳۰۱۷	۴	۷۰۷۵۴	-	۲۹۸/۲۴	۰/۰۰۰
CIP	۶۷۸۰۰	۱	۶۷۸۰۰	-۱۶/۹۰۵	۲۸۵/۷۹	۰/۰۰۰
P	۲۰۴۸۸۵	۱	۲۰۴۸۸۵	۲۹/۳۸۸	۸۶۳/۶۳	۰/۰۰۰
P×P	۱۳۰۷	۱	۱۳۰۷	-۲/۳۴۷	۵/۵۱	۰/۰۴۷
CIP×P	۹۰۲۵	۱	۹۰۲۵	-۶/۱۶۸	۳۸/۰۴	۰/۰۰۰
خطای باقیمانده	۱۸۹۸	۸	۲۳۷	-	-	-
عدم برازش	۱۶۳۹	۴	۴۱۰	-	۶/۳۳	۰/۰۵۱
خطای خالص	۲۵۹	۴	۶۵	-	-	-
مجموع	۲۸۴۹۱۵	۱۲	-	-	-	-
	R2(adj.)=۹۹/۰۰%				R2=۹۹/۳۳%	

کدهای دو رقمی موجود بر روی منحنی‌ها، از سمت چپ به ترتیب نشان دهنده پارامترهای درصد پودر چدن و فشار تراکم مطابق با کدهای جدول ۱ هستند. همان طور که در شکل ۵ مشخص است، نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های خام تا نقطه شکست تقریباً رفتار خطی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، برای به‌دست آوردن شیب این نمودار، با استفاده از روش کمینه مربعات، خطی با دقت مناسب که از مبدأ نیز عبور می‌کند بر روی داده‌ها برازش شده و شیب خط به‌عنوان شیب نمودار نیرو-جابجایی لحاظ شده است. با جاگذاری در رابطه (۳) و اعمال سایر پارامترها مدول الاستیک نمونه‌ها به‌دست می‌آید.

پس از به‌دست آوردن مدول الاستیک خسته‌های خام، با انجام تحلیل واریانس نتایج مطابق جدول ۵ به‌دست آمد. طبق نتایج، پارامترهای اصلی درصد پودر چدن و فشار تراکم، پارامتر مرتبه دوم فشار تراکم و پارامتر تعاملی فشار تراکم-درصد پودر چدن مؤثر هستند. در بین پارامترهای مؤثر فشار تراکم بیشترین تأثیر را دارد. همچنین، با توجه به مقادیر P ملاحظه می‌شود که پارامتر رگرسیون مؤثر و پارامتر عدم برازش غیر مؤثر هستند. شایان ذکر است که بهترین تحلیل زمانی صورت می‌گیرد که هم‌زمان رگرسیون مؤثر و عدم برازش غیرمؤثر باشند [۲۰]. مقدار بالای ضریب همبستگی نیز، علاوه بر تأیید پوشش کامل داده‌ها توسط مدل، دقت روش استخراج مدول الاستیک از طریق منحنی نیرو-جابجایی در آزمون شکست عرضی را نشان می‌دهد، زیرا نتایج مدول الاستیک، که به طور غیرمستقیم و از روی منحنی نیرو-جابجایی به‌دست آمده‌اند، همانند خروجی استحکام نتایج قابل قبولی را در تحلیل واریانس از خود نشان دادند. در نهایت، پس از حذف پارامترهای غیرمؤثر، معادله رگرسیون برای مدول الاستیک خسته‌های خام مطابق معادله (۵) به‌دست آمد.

$$E_{(g)} = 410.2 - 75.2CIP + 130.67P - 7.2P^2 - 47.5CIP \times P \quad (5)$$

شکل ۶ منحنی رویه پاسخ را برای مدول الاستیک خسته‌های خام نشان می‌دهد. مطابق رویه پاسخ به‌دست آمده، کاهش درصد پودر چدن سبب افزایش مدول الاستیک می‌شود که این افزایش با افزایش فشار تراکم شدیدتر است. همچنین، افزایش فشار تراکم نیز سبب افزایش مدول می‌شود که این مورد نیز در درصد‌های پایین پودر چدن ملموس تر است.

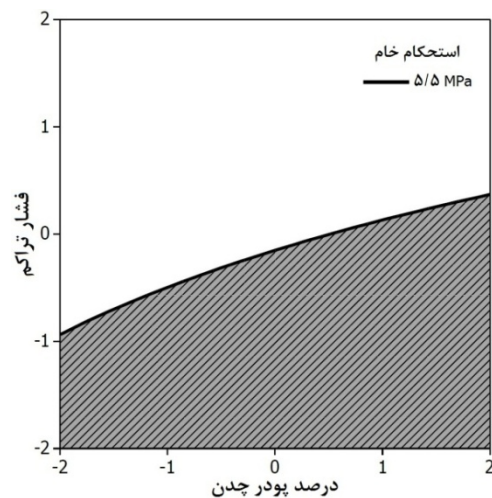
۴-۲- قطعات تفجوشی شده

مطابق نتایج تحلیل واریانس انجام گرفته بر روی استحکام قطعات تفجوشی

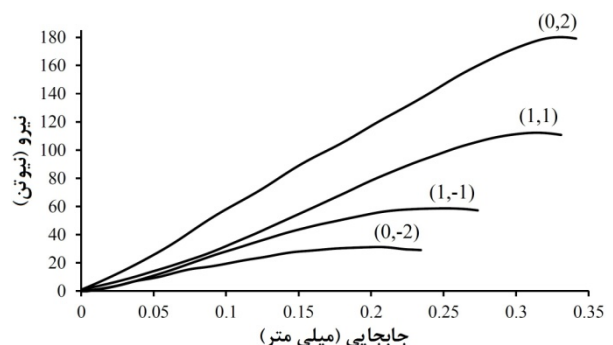
از سوی دیگر، ویژگی‌های پودر مانند شکل نامنظم و سطوح زبر پودر، فاکتورهای کلیدی برای بهبود استحکام خام از طریق افزایش درگیری‌های مکانیکی داخلی ذرات هستند [۲۷]. از آن جایی که پودرهای تولید شده به روش آسیای پاششی ویژگی‌های یاد شده را دارا هستند، علی‌رغم سختی بیشتر و اندازه بزرگ‌تر نسبت به پودر آهن، منجر به تولید خسته‌هایی با استحکام خام مناسب می‌شوند. پس از بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر روی استحکام خام خسته‌ها، نکته بسیار مهم این است که بدانیم در کدام ترکیب‌های ورودی فشار تراکم-درصد پودر چدن آسیای پاششی، حداقل استحکام خام برای ارضای نیازهای عملیات جابه‌جایی تأمین می‌شود. حداقل استحکام خام ۵/۵MPa برای انجام عملیات جابه‌جایی ایمن خسته‌های خام لازم است [۲۸]. شکل ۴ منحنی تراز پوششی استحکام خام برحسب دو متغیر فشار تراکم و درصد پودر چدن را نشان می‌دهد.

در شکل ۴ ناحیه سفید رنگ بالای خط تیره محدوده قابل قبول ترکیب‌های فشار تراکم-درصد پودر چدن را برای دستیابی به استحکام خام بالای ۵/۵MPa نشان می‌دهد. مطابق شکل، در محدوده وسیعی از ترکیب‌های فشار تراکم-درصد پودر چدن، استحکام خام مطلوب قابل دستیابی است. این امر قابلیت کاربرد پودرهای چدن خاکستری تولید شده به‌روش آسیای پاششی را در ترکیب با پودر آهن نشان می‌دهد. بدیهی است که با ترکیب‌های مختلف آهن-چدن آسیای پاششی و با فشارهای مختلف تراکم، خواص قطعات فوق پس از تفجوشی نیز متفاوت خواهند بود.

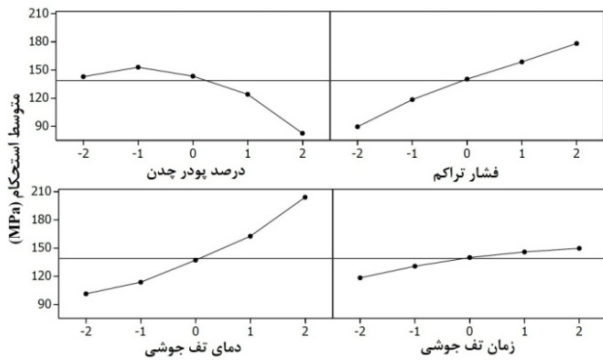
شکل ۵ نمودارهای نیرو-جابجایی برای تعدادی از خسته‌های خام را نشان می‌دهد.



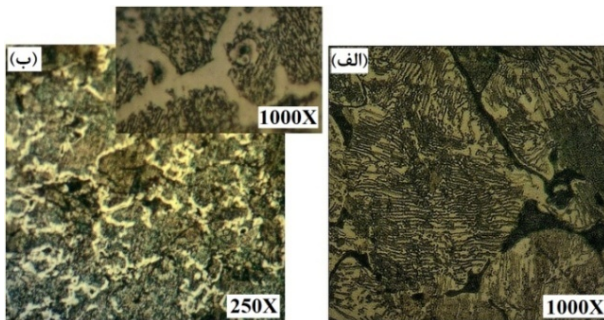
شکل ۴ منحنی تراز پوششی برای استحکام خام



شکل ۵ نمودارهای نیرو-جابجایی تعدادی از خسته‌های خام



شکل ۷ نمودارهای تأثیر پارامترهای اصلی برای استحکام قطعات تفجوشی شده



شکل ۸ تصاویر حکاکی شده میکروسکوپ نوری: الف) نمونه شامل ۳۰٪ پودر چدن (نمونه با کد ۰۰، ۰۰، ۲۰)، ب) نمونه شامل ۷۰٪ پودر چدن (نمونه با کد ۰۰، ۰۰، ۲۰)

این روند را می‌توان به یاری تصاویر شکل ۸ تفسیر کرد. در ریزساختار قطعات تفجوشی شده با مقادیر پایین چدن، ریزساختارهای پرلیتی مشابه با شکل ۸-الف مشاهده می‌شود. وجود چنین ریزساختاری تا حدودی اثر منفی چگالی پایین بر روی استحکام را خنثی می‌کند، چرا که سبب افزایش استحکام می‌شود. ولی در مقادیر بالای چدن، ریزساختارها مشابه شکل ۸-ب هستند که در آن شبکه سمینتیت در مرز دانه‌های ساختار پرلیتی رسوب کرده است. در این قطعات اثر معکوس افت چگالی غالب بوده و ریزساختار تشکیل شده قادر به بهبود استحکام نیست [۲].

در کدهای چهار رقمی موجود در شکل ۸، اعداد از سمت چپ به ترتیب نشان دهنده پارامترهای درصد پودر چدن، فشار تراکم، دما و زمان تفجوشی مطابق با کدهای جدول ۱ هستند.

شکل ۹ نمودارهای نیرو-جابجایی را برای تعدادی از قطعات تفجوشی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه بین نیرو و جابه‌جایی در تمام مسیر به صورت خطی نیست، به ویژه در بخش ابتدایی نمودار که شیب تغییر نیرو نسبت به جابه‌جایی بسیار کم است و این مسئله به دلیل تغییر شکل پلاستیک در ناحیه اعمال نیرو است. برای محاسبات مربوط به مدول الاستیک باید از این ناحیه صرف نظر شده و شیب قسمت خطی نمودار در رابطه (۳) اعمال شود. اما با توجه به اینکه نمودار در هیچ ناحیه‌ای به صورت کامل و ایده‌آل خطی نیست، بنابراین برای به دست آوردن شیب نمودار به صورت مناسب، منحنی چند جمله‌ای درجه چهار با دقت بسیار بالا بر روی نمودارها برازش شده و شیب منحنی در نقطه عطف به عنوان شیب ناحیه خطی نمودار نیرو-جابجایی لحاظ شده است.

در شکل ۱۰ فرایند استخراج این شیب برای تابعی با دو متغیر فرضی x و y ارائه شده است. در این شکل چند جمله‌ای مرتبه چهار با دقت بالایی بر روی داده‌ها برازش شده و خط مماس بر تابع در نقطه عطف، شیب ناحیه خطی تابع را به بهترین شکل ارائه می‌کند.

نتایج تحلیل واریانس بر روی مدول الاستیک به دست آمده برای قطعات

شده در جدول ۶، تمام پارامترهای اصلی و مرتبه دوم مؤثر، و تمام پارامترهای تعاملی غیرمؤثر هستند. مقادیر T پارامترهای مؤثر نشان می‌دهد که دمای تفجوشی و فشار تراکم بیشترین تأثیر را بر روی استحکام دارند. همچنین، اثر درصد پودر چدن بیش از اثر سایر پارامترهاست. مقدار ضریب همبستگی ($R^2=99/14\%$) نشان می‌دهد که تنها کمتر از ۱٪ از کل داده‌ها توسط مدل پوشش داده نمی‌شود که بیانگر دقت بالای مدل است. در این تحلیل نیز رگرسیون مؤثر و عدم برازش غیرمؤثر است که دقت تحلیل را نشان می‌دهد. معادله رگرسیون (۶) استحکام شکست عرضی تفجوشی را پس از حذف پارامترهای غیرمؤثر نشان می‌دهد.

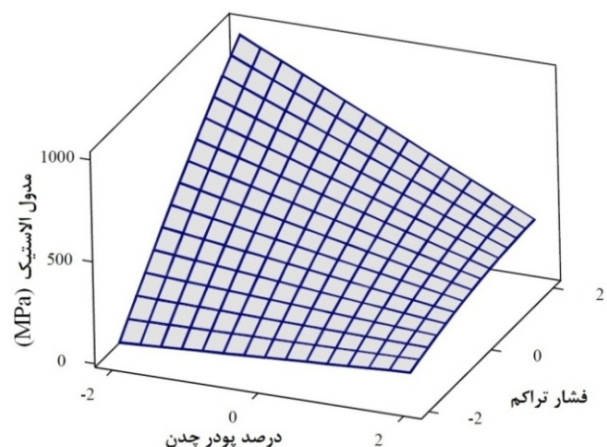
شکل ۷ نمودارهای تأثیر پارامترهای اصلی را برای استحکام نشان می‌دهد. با افزایش پارامترهای فشار تراکم و دما و زمان تفجوشی، استحکام افزایش می‌یابد. اما در مورد پارامتر درصد پودر چدن روند دیگری مشاهده می‌شود؛ به این ترتیب که با افزایش درصد پودر چدن از ۳۰ درصد به ۵۰ درصد، علی‌رغم کاهش چگالی خام، استحکام خام و چگالی تفجوشی، استحکام تفجوشی تغییر چندانی نمی‌کند، اما پس از ۵۰ درصد استحکام شروع به افت می‌کند.

$$TR_{S(S)} = 146.10 - 14.73CIP + 20.86P + 24.98STe + 7.76STi - 7.55CIP^2 - 2.27P^2 + 2.49STe^2 - 2.17STi^2 \quad (6)$$

جدول ۶ تحلیل واریانس اصلاح شده برای استحکام تفجوشی

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	مقدار T	مقدار F	مقدار P
رگرسیون	۳۳۸۸۲/۶	۸	۴۲۳۵/۴	-	۳۰۴/۵۳	۰/۰۰۰
CIP	۵۱۴۵/۱	۱	۵۱۴۵/۱	-۱۹/۲۳۴	۳۶۹/۹۵	۰/۰۰۰
P	۱۰۳۵۸/۴	۱	۱۰۳۵۸/۴	۲۷/۲۹۱	۷۴۴/۸	۰/۰۰۰
STe	۱۴۸۷۰/۳	۱	۱۴۸۷۰/۳	۳۲/۶۹۹	۱۰۶۹/۲۱	۰/۰۰۰
STi	۱۴۱۳/۷	۱	۱۴۱۳/۷	۱۰/۰۸۲	۱۰۱/۶۵	۰/۰۰۰
CIP×CIP	۱۵۹۲/۴	۱	۱۵۹۲/۴	-۱۰/۷۹۰	۱۱۶/۴۳	۰/۰۰۰
P×P	۱۵۲/۴	۱	۱۵۲/۴	-۳/۲۲۶	۱۰/۴۱	۰/۰۰۴
STe×STe	۲۱۷/۳	۱	۲۱۷/۳	۳/۶۰۳	۱۲/۹۸	۰/۰۰۲
STi×STi	۱۳۲/۲	۱	۱۳۲/۲	-۳/۰۸۳	۹/۵۰	۰/۰۰۵
خطای باقیمانده	۳۰۶/۰	۲۲	۱۳/۹	-	-	-
عدم برازش	۲۵۳/۰	۱۶	۱۵/۸	-	۱/۷۹	۰/۲۴۳
خطای خالص	۵۳/۰	۶	۸/۸	-	-	-
مجموع	۳۴۱۸۸/۸	۳۰	-	-	-	-

$$R^2=99/14\% \quad R^2(\text{adj})=98/82\%$$



شکل ۶ رویه پاسخ برای مدول الاستیک خسته‌های خام

جدول ۸ پاسخ‌های بہینہ شدہ ہمراہ با نتایج آزمایش‌های تکمیلی

مقدار پاسخ	متغیرها				پاسخ بہینہ شدہ	
بہینہ آزمایش	STi(min)	STe(°C)	P(MPa)	CIP(%)	پاسخ	مقدار پاسخ
۱۴/۳	۱۳/۸	-	-	۸۰۰	۳۰	استحکام خام (MPa)
۱۰۳۵	۹۸۳	-	-	۸۰۰	۳۰	مدول الاستیک خام (GPa)
۲۶۹/۳	۲۵۲/۷	۶۰	۱۱۷۰	۸۰۰	۴۰/۲	استحکام تف‌جوشی (MPa)
۱۶/۹	۱۵/۷	۶۰	۱۰۶۶	۸۰۰	۳۹/۳	مدول الاستیک تف‌جوشی (GPa)

مقایسہ بین نتایج بہینہ سازی و نتایج بہ دست آمدہ از آزمایش‌های تکمیلی نشان می‌دہد کہ خطای معادلات استخراجی بین ۴ تا ۸ درصد بودہ و این علاوہ بر اینکہ بیانگر دقت این معادلات برای پیش‌بینی خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودر مرکب تولیدی است، نشان‌دہندہ دقت روش مورد استفادہ برای تعیین مدول الاستیک قطعات متالورژی پودری از روی منحنی نیرو-جابہ‌جایی است.

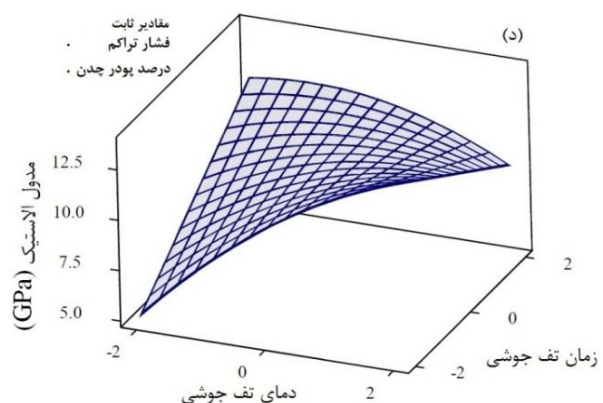
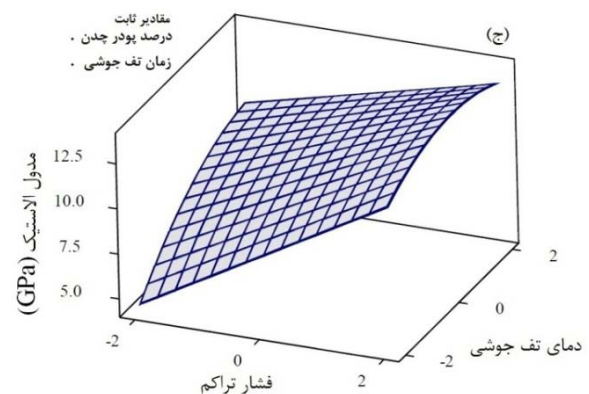
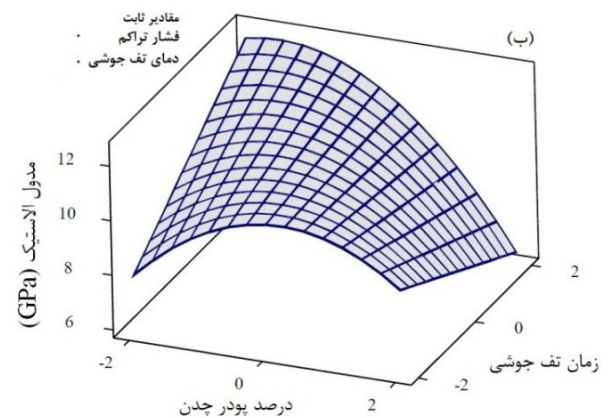
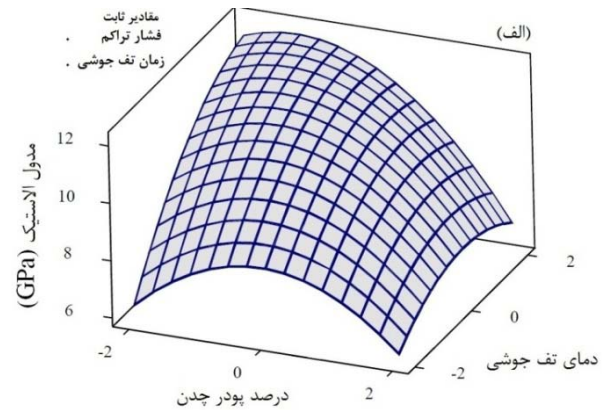
۶- نتیجہ

موارد زیر بہ عنوان نتایج مهم از این تحقیق قابل برداشت ہستند:

- ۱- معادلات استخراج شدہ بہ روش رویہ پاسخ برای خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودر آہن-چدن، در ہر دو حالت خام و تف‌جوشی شدہ، دارای دقت کافی برای پیش‌بینی این خواص ہستند، بہ طوری کہ خطای بین مقادیر پیش‌بینی شدہ و مقادیر واقعی حاصل از آزمایش‌های تکمیلی در محدودہ ۴ تا ۸ درصد قرار دارد.
- ۲- خستہ‌های خام ساختمانی از ترکیب پودر آہن با پودر چدن بازیابی شدہ بہ روش آسیای پاششی، بہ دلیل ویژگی‌های خاص این پودرہا، در ترکیب‌های متنوعی از فشار تراکم-درصد پودر چدن قابلیت دستیابی بہ استحکام خام لازم برای جابہ‌جایی را دارند.
- ۳- بیشینہ مقادیر ۱۴MPa و ۲۶۹MPa بہ ترتیب برای استحکام خام و استحکام تف‌جوشی شدہ قطعات تولید شدہ با مشارکت بہ ترتیب ۳۰ درصد و ۴۰/۲ درصد پودر چدن قابل دستیابی ہستند.
- ۴- قطعات متالورژی پودر آہن-چدن می‌توانند از طریق بازیابی برادہ‌های چدن بہ روش آسیای پاششی با حصول خواص مکانیکی مناسب در مقیاس-های صنعتی تولید شوند.
- ۵- روش ارائه شدہ برای استخراج مدول الاستیک از منحنی نیرو-جابہ‌جایی قطعات متالورژی پودر دارای دقت کافی برای تعیین مقدار این پارامتر است.

۷- مراجع

- [1] R. M. German, *Powder metallurgy science*, Translated by M. Haerian Yazdi, Mashhad: Daneshgah Ferdosi Mashad, 2006. (In Persian)
- [2] A. Salak, V. Rieckansky, *Ferrous Powder Metallurgy*, 1st Ed., England: CISP, 1995.
- [3] H. H. Hausner, M. K. Mal, *Handbook of Powder Metallurgy*, 2nd Ed., New York: Chemical Pub. Co. Inc., 1982.
- [4] P. Kjeldsteen, Recycling of cast iron swarf by the powder metallurgy technique, *Materials in Engineering*, Vol. 3, pp. 335-40, 1982.
- [5] 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. 508-12, 1989.
- [6] 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.



شکل ۱۲ منحنی‌های رویہ پاسخ پارامترهای تعاملی برای مدول الاستیک قطعات تف‌جوشی شدہ

با این تفاوت کہ بیشینہ استحکام قطعات تف‌جوشی شدہ در 1170°C بہ مدت ۶۰ دقیقہ، و بیشینہ مدول الاستیک در 1066°C و بہ مدت ۶۰ دقیقہ بہ دست می‌آید.

- [17] 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. 123-9, 2007.
- [18] ASTM Standard C 1161, Flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature.
- [19] A. S. Wronski, A. Cias, The Determination of fracture strength from ultimate tensile and transverse rupture stresses, *Powder Metallurgy Progress*, Vol. 3, No. 3, pp. 119-27, 2003.
- [20] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 3rd Ed., New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [21] ASTM Standard B213-97, *Flow rate of metal powders*.
- [22] ASTM Standard B212-99, *Apparent density of free flowing metal powders using the hall flowmeter funnel*.
- [23] ASTM Standard B331-95, *Compressibility of metal powders in uniaxial compaction*.
- [24] ASTM Standard B 528-99, *Transverse rupture strength of metal powder specimens*.
- [25] F. Beer, R. Johnston, *Strength of Materials*, Translated by E. Vahedian, 9nd Ed., Tehran: oloom daneshgahi, 2005. (In Persian)
- [26] F. Mujika, On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests, *Polymer Testing*, Vol. 25, Issue 2, pp. 214-20, 2006.
- [27] Kolaska H., Schulz P., beiss P., Ernst E., Investigations of die compaction, *Powder Metallurgy International*, Vol. 24, No. 6, 1992, pp. 30-5.
- [28] E. Klar, P. K. Samal, *Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures, and Properties*, 1st Ed., ASM International, 2007.
- [7] 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.
- [8] M. Ghambari, M. Emadi Shaibani, N. Eshraghi, Production of grey cast iron powder via target jet milling, *Powder Technology*, Vol. 221, pp. 318-24, 2012.
- [9] 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. 278-83, 2011.
- [10] M. Emadi Shaibani, N. Eshraghi, M. Ghambari, Sintering of grey cast iron powder recycled via jet milling, *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 174-8, 2013.
- [11] A. I. Khuri, J. A. Cornell, *Response Surfaces Design and Analysis*, 2nd Ed., New York: Marcel Dekker, 1996.
- [12] K. Palanikumar, Modeling and analysis for surface roughness in machining glassfibre reinforced plastics using response surface methodology, *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 2611-8, 2007.
- [13] Y. Yanhui, L. Dong, H. Ziyang, L. Zijian, Optimization of Perform Shapes by RSM and FEM to Improve Deformation Homogeneity in Aerospace Forgings, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 23, pp. 260-7, 2010.
- [14] M. Moradi, M. Ghoreishi, J. Frostevar, A. F. H. Kaplan, An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, pp. 481-7, 2013.
- [15] S. Kumar, P. Kumar, H. S. Shan, Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, *Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 615-23, 2007.
- [16] X. Li, G. Zhao, Y. Guan, M. Ma, Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 4317-23, 2009.