



Dynamic Response of Metal Powder Subjected to Low-Velocity Impact Loading: Experimental Investigation and Optimization using Response Surface Methodology

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sayah Badkhor M.¹ PhD,
Mirzababaie Mostofi T.¹ PhD,
Babaei H.*² PhD

How to cite this article

Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Dynamic Response of Metal Powder Subjected to Low-Velocity Impact Loading: Experimental Investigation and Optimization using Response Surface Methodology. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):863-876.

¹Mechanical Engineering Department, Electrical, Computer & Mechanical Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

²Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, 5 Kilometer of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran

Phone: +98 (13) 33690539

Fax: +98 (13) 33690271

ghbabaei@guilan.ac.ir

Article History

Received: September 01, 2019

Accepted: September 29, 2019

ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

Manufacturing products using powder compaction is one of the most widely used methods in the industry. In this paper, dynamic compaction of aluminum powder under low-velocity impact loading was investigated using a drop hammer testing machine along with the optimization of effective parameters in this process. In this series of experiments, the green density and green strength of compacted products were measured. The response surface methodology was used to study the influential parameters in the powder compaction process. In this method, the effects of independent parameters including the grain particle size, the hammer mass, and the standoff distance of the hammer on the green density and green strength were evaluated. In the current study, two separate analyses were performed for each output response and the obtained results were summarized in ANOVA tables. The results showed that the p-value for the model is less than 0.05, which means that the model is significant. The values of R2 for the green density and green strength are equal to 0.9956 and 0.9912, respectively. The results of the optimization section indicate that the optimum case, the maximum green density as well as green strength at the same time, occurs when the grain particle size, the hammer mass and the standoff distance of the hammer have the maximum values. The factors of standoff distance of hammer and grain particle size have the highest and least effect on responses.

Keywords Powder Compaction; Green Density; Green Strength; ANOVA Table; Optimization

CITATION LINKS

[1] Gas mixture detonation method, a novel ... [2] Experimental and analytical study of effective ... [3] Experimental investigation and a model presentation ... [4] Modeling and prediction of metallic ... [5] On the mechanics of cold die compaction ... [6] High-velocity compaction of titanium powder ... [7] Experimental characterisation of CaCO₃ ... [8] Experimental characterization of CaCO₃ powder ... [9] Frictional behaviour of CaCO₃ powder ... [10] Cold compaction of iron powders—relations ... [11] Uniaxial compaction behaviour and elasticity ... [12] Radial and axial die pressures during solid phase ... [13] Simulation of cold die compaction Alumina ... [14] Study of particle rearrangement during powder compaction ... [15] Development of a high-velocity compaction ... [16] Al Li alloy composites using a dynamic shock compaction ... [17] High velocity compaction of ferrous ... [18] Mechanical behavior and microstructural variation ... [19] On the modelling of the compaction mechanism ... [20] Simulation of high-velocity compaction process ... [21] Dynamic modeling of powder compaction ... [22] Modeling of large deformation frictional contact in powder compaction ... [23] Effects of particle size disparity on the compaction ... [24] Constitutive modelling of powder compaction—II. Evaluation ... [25] Numerical recipes in Fortran ... [26] Experimental and analytical investigation ... [27] Experimental study and analytical modeling ... [28] Experimental and theoretical study of large ... [29] Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling ... [30] Dynamic compaction of cold die Aluminum ... [31] Study on the response of circular ... [32] On dimensionless numbers for the ... [33] Theoretical analysis on the effect of uniform ... [34] Empirical modelling for prediction of large deformation ... [35] New dimensionless numbers for ... [36] Large transverse deformation ... [37] Experimental investigation and analytical ... [38] On dimensionless numbers for predicting ... [39] Experimental and analytical investigation ... [40] Repeated localized impulsive loading ... [41] Dynamic plastic response of ... [42] Experimental and numerical investigation ... [43] Experimental and numerical analysis ...

پاسخ دینامیکی پودرهای فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین: مطالعه تجربی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

مصطفی سیاح‌بادخور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

توحید میرزابابایی مستوفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

هاشم بابایی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

تولید قطعات به روش تراکم پودر یکی از روش‌های پرکاربرد و مهم در صنعت است. در این مقاله به مطالعه تجربی تراکم دینامیکی پودرهای آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای موثر در این فرآیند پرداخته شد. در این سری از آزمایش‌ها مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز قطعات تولیدی اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند تراکم پودر از روش سطح پاسخ استفاده شد. در این روش اثر پارامترهای مستقل شامل اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم چکش و ارتفاع چکش روی چگالی سبز و مقاومت سبز مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی برای هر یک از خروجی‌ها تحلیلی جداگانه انجام شد و نتایج به‌دست آمده در جداول ANOVA ارائه شد. نتایج نشان داد که مقدار p -value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به‌دست آمده و این یعنی مدل در نظر گرفته‌شده معنی‌دار است. مقدار R^2 نیز برای چگالی سبز و مقاومت سبز به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۵۶ و ۰/۹۹۱۲ به‌دست آمده است. نتایج بخش بهینه‌سازی نشان می‌دهد که بهینه‌ترین حالت یعنی بیشترین مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز، زمانی رخ می‌دهد که اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم چکش و ارتفاع چکش بیشترین مقادیر خود را داشته باشند. ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات بیشترین و کمترین تاثیر بر پاسخ‌ها را دارند.

کلیدواژه‌ها: تراکم پودر، چگالی سبز، مقاومت سبز، جدول ANOVA، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

تولید قطعات با استفاده از روش‌های شکل‌دهی پودرهای فلزی، یکی از روش‌های متداول در صنعت تولید قطعات است. از جمله مزایای این روش کم‌هزینه‌بودن تولید قطعه، تولید قطعات پیچیده، عدم نیاز به شرایط خاص مانند دمای خیلی بالا و غیره است [1]. در متالوژی پودر مراحل فرآیند، دارای انرژی مصرف کم، اتوماتیک، میزان بهره‌گیری بالا از مواد اولیه و هزینه‌های کمتر می‌باشند [2]. از همین رو است که آهنگ رشد و گسترش آن در مقایسه با فرآیندهای دیگر سریع‌تر است. امکان تولید قطعات در

تیراژ بالا با استفاده از روش تراکم پودر باعث استفاده صنعتی از این روش شده است [3]. قطعات تولیدی با استفاده از این روش در صنایع اتومبیل‌سازی، لوازم خانگی و الکترونیک نیز کاربرد دارد که باعث رشد روزافزون استفاده از این حوزه فناوری شده است [4].

در زمینه تراکم پودر، آزمایش‌های مختلفی تاکنون انجام شده و در نهایت به ارایه مدل‌های تحلیلی و عددی بر پایه این آزمایش‌ها پرداخته شده است. تقریبی و همکاران، با بررسی تغییر شکل‌های بزرگ ذرات در سیستم‌های متقارن، یک مدل ریاضی برای چگالی نهایی ارایه دادند که در این مدل، پارامترهای اصطکاک درونی و اثر اندازه دانه تاثیرگذار است [5]. بیان و همکاران، با انجام آزمایش روی پودر تیتانیوم، اثر فشار بیشینه اعمالی بر چگالی نهایی قطعه را مورد بررسی قرار دادند. همچنین با بررسی فرآیند تراکم روی دو نمونه با هندسه‌های مختلف (حلقه و استوانه) به این نتیجه رسیدند که با صرف انرژی یکسان، چگالی نسبی قطعات استوانه‌ای بیشتر است که این تحقیقات منجر به ارایه چندین راهکار برای بهبود فرآیند فشرده‌سازی شد [6]. برگ و همکاران، با استفاده از تئوری‌های مختلف تنش موثر، بازه‌ای برای زاویه اصطکاک و چسبندگی ذرات در چگالی‌های نهایی مختلف، به‌دست آوردند. برگ در پژوهش‌های دیگر، با استفاده از حل عددی، نحوه توزیع چگالی را در یک قرص فشرده‌شده و همچنین پدیده بازگشت فیزی را مورد بررسی قرار داد [7-9]. از کارهای تجربی صورت‌گرفته در زمینه تراکم پودر، می‌توان به تراکم سرد ذرات پودر آهن و روابط میان خواص نهایی قطعات، میزان نیرو و شرایط اولیه سیستم [10]، رفتار الاستیک ذرات پودر در تراکم تک‌محوره [11] و تراکم تک‌محوره پودرهای پلیمری [12] اشاره کرد. همچنین می‌توان از روش المان محدود برای مدل‌سازی فرآیند تراکم پودر استفاده کرد. تراکم پودر آلومینیوم و چگونگی توزیع فشار به‌کمک روش المان محدود [13] و چگونگی تغییر آرایش ذرات پودر در فرآیند تراکم با استفاده از روش المان محدود [14]، از جمله این موارد هستند. کارهای انجام‌شده بر تراکم پودر به روش استاتیکی در مقیاسی بسیار بزرگ نسبت به کارهای دینامیکی و نرخ انرژی بالا صورت گرفته است. اما در سال‌های اخیر توجه زیادی به فرآیند تراکم پودر به روش دینامیکی شده است. از جمله کارهای تجربی انجام‌گرفته در تراکم دینامیکی می‌توان به تراکم پودرهای پلیمری با نرخ انرژی بالا [15]، فرآیند تراکم آلیاژ آلومینیوم به‌کمک ضربه دینامیکی ایجادشده از تفنگ انفجاری [16]، تراکم پودرهای متخلخل با نرخ بالا [17] و رفتار ریزذرات تحت بارگذاری دینامیکی [18] اشاره کرد. از جمله مدل‌سازی‌های دینامیکی برای فرآیند تراکم پودر نیز می‌توان به مدل‌سازی تحلیلی مکانیسم تراکم ضربه‌ای به‌کمک داده‌های تجربی پژوهش [19]، مدل‌سازی تراکم پودر سرعت‌بالا با استفاده از روش المان محدود [20] و همچنین مدل‌سازی دینامیکی فرآیند تراکم پودر با الگوریتم برخورد [21] اشاره کرد. در فرآیند تراکم پودر، پارامترهای فراوانی در خواص قطعه نهایی تاثیر دارند. در سال‌های گذشته کارهای زیادی برای محاسبه این پارامترها صورت پذیرفته

۲- مطالعه تجربی

یکی از مهم‌ترین عوامل توجه به روش شکل‌دهی پودرهای فلزی، کم‌هزینه‌بودن آن است. همچنین میزان کم انرژی مصرفی، خودکاربودن روش کار و امکان تولید انبوه قطعات پیچیده با کمترین ضایعات، دیگر عوامل پیشی‌گرفتن این روش از دیگر روش‌های متالورژی هستند.

در این مقاله، سامانه استفاده‌شده برای فرآیند تراکم پودر، سامانه چکش پرتابه‌ای است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. این سامانه ماهیتی کاملاً مکانیکی دارد. روش کار این سامانه بدین صورت است که انرژی پتانسیل ناشی از رهاسازی وزنه‌ای در ارتفاع مشخص به انرژی جنبشی پیستون تبدیل شده و به‌صورت بار ضربه‌ای به پودر موجود در محفظه سیلندر وارد شده و پودر را متراکم می‌کند. اجزای مختلف این سامانه و نحوه عملکرد آن در مراجع [2, 3] به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱ سامانه چکش پرتابه‌ای [2, 3]

در آزمایش‌های انجام‌شده از پودر آلومینیوم خالص استفاده شده است. پودر آلومینیوم، اندازه دانه کمتر از ۲۵۰ میکرون بوده و شکل آن، سوزنی و استوانه‌ای با خلوص ۹۹٪ است. در شکل ۲، تصویر تهیه‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی از پودرهای مورد استفاده، نمایش داده شده است. به‌منظور بررسی تاثیرپذیری خواص نهایی از اندازه پودر، ذرات پودر آلومینیوم با استفاده از الک به سه دسته A، B و C تقسیم شده است که در این سه دسته، اندازه دانه به‌ترتیب در محدوده‌ای برابر با ۱۰۰ تا ۱۵۰، ۱۵۰ تا ۲۰۰ و ۲۰۰ تا ۲۵۰ میکرون است که هر یک تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفته‌اند [2, 3].

است که می‌توان به مدل‌سازی اصطکاک بین ذره‌ای در فرآیند تراکم پودر [22]، تاثیر اندازه ذرات بر تراکم قطعات نهایی [23] و محاسبه اصطکاک بین پودر و جداره قالب [24, 25] اشاره کرد. در زمینه تراکم پودر با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای، بابایی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی و مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداختند که در قسمت تحلیلی با استفاده از روش انرژی و روش لولای پلاستیک روابطی برای حداکثر خیز مرکز ورق ارائه کردند. آنها در تحقیقی دیگر، به بررسی تجربی و مدل‌سازی ریاضی خواص مکانیکی پودر آلومینیوم خالص و پودر ترکیبی آلومینیوم با سرامیک تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط چکش پرتابه‌ای پرداختند [26-31]. در سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹، میرزازابایی مستوفی و همکاران، از تحلیل ابعادی و روش تجزیه مقادیر منفرد برای ارائه مدل‌های ریاضی بر مبنای اعداد بی‌بعد جدید برای پیش‌بینی پاسخ نهایی فرآیندهای شکل‌دهی پودرهای فلز تحت بار ضربه‌ای سرعت‌بالا و پایین [1-4] و همچنین شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت بار دفعی و انفجار مخلوط گاز [32-37] و نفوذ پرتابه‌های صلب کرومی [38, 39] استفاده کردند. رضاصفت و همکاران، به بررسی پاسخ دینامیکی و رفتار پلاستیکی ورق‌های تک و دو لایه فلزی با ترکیب‌بندی‌های مختلف تحت بار انفجاری غیریکنواخت مکرر پرداختند [40, 41].

گلمکانی و همکاران، به بررسی فرآیند کشش عمیق با اجزای لاستیکی پرداختند. آنها نمونه مربعی را با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به‌صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل دادند. در نهایت به‌کمک روش پاسخ سطح به بررسی پارامترهایی از جمله شعاع سنبه، جایگشت، جنس ورق و مقدار فاصله اولیه بین ورق‌گیر روی نازک‌شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق‌گیر پرداختند [42]. بیگدلی و همکاران، به بررسی تجربی و عددی فشرده‌سازی استاتیکی سیلندرهای جدار نازک پرداختند. آنها با استفاده از روش پاسخ ضمن بررسی پارامترهای مختلف به‌صورت همزمان، شرایط بهینه را نیز تعیین کردند [43].

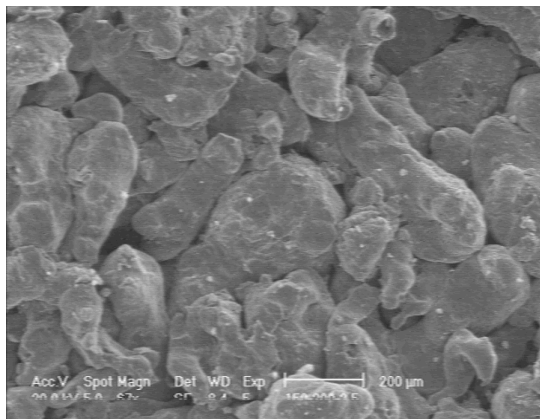
با بررسی پیشینه تحقیق، این نتیجه حاصل می‌شود که در زمینه فرآیند تراکم دینامیکی پودر، تاثیر پارامترهای غالب در این فرآیند روی پاسخ نهایی و خواص مکانیکی مطالعه نشده است؛ بنابراین، در این مقاله به بررسی این پارامترها در قطعات تولیدشده در اثر تراکم پودرهای فلزی توسط سامانه چکش پرتابه‌ای پرداخته شده است. قطعات تولیدشده به این روش بر اساس ارتفاع و جرم وزنه دارای خواص متفاوتی دارند. در این بررسی دو خاصیت چگالی و مقاومت قطعه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی بهتر تاثیر پارامترهای مختلف روی این دو خاصیت نیز از نرم‌افزار طراح آزمایش و روش پاسخ سطح استفاده شده است. بدین ترتیب ضمن تعیین شرایط بهینه برای این دو خاصیت، میزان اهمیت هر کدام از پارامترها نیز تعیین شده است.



شکل ۳) قطعات تولیدشده از پودر آلومینیوم با روش تراکم پودر

در شکل ۴، تصویر تهیه‌شده از قطعات تولیدی با میکروسکوپ الکترونی نمایش داده شده است. در این تصاویر، کاهش فضای خالی بین ذرات که همراه با افزایش چگالی است، کاملاً مشخص است.

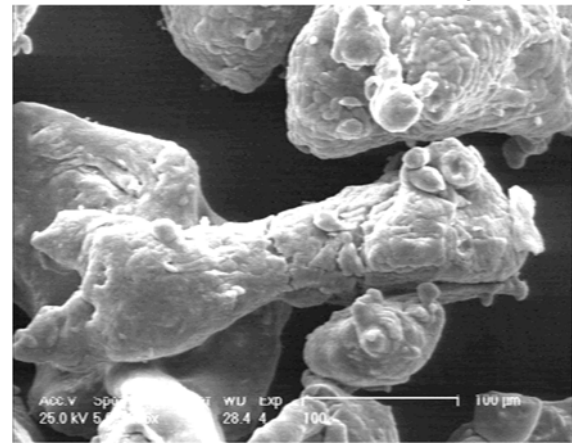
در جداول ۱ تا ۳، نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر ذرات آلومینیوم خالص گردآوری شده است. با توجه به جداول، چگالی نسبی از تقسیم چگالی قطعه نسبت به چگالی آلومینیوم به‌دست آمده است. شایان ذکر است که چگالی آلومینیوم ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.



شکل ۴) ذرات آلومینیوم متراکم‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی

جدول ۱) نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر پودر A

پودر A	جرم چکش (kg)	ارتفاع چکش (m)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه ۱	۷۴/۷۱۹	۱	۱۰/۲۵	۱۷۲۵	۶۳/۸۹
نمونه ۲	۷۴/۷۵۳	۱/۵	۹/۵۳	۱۸۵۵	۶۸/۷۰
نمونه ۳	۷۴/۷۷۰	۲	۸/۹۰	۱۹۸۷	۷۳/۵۹
نمونه ۴	۷۴/۷۸۰	۲/۵	۸/۶۳	۲۰۵۰	۷۵/۹۳
نمونه ۵	۷۴/۷۵۳	۳	۸/۱۹	۲۱۶۰	۸۰
نمونه ۶	۱۰۴/۷۰۹	۲/۵	۸/۰۱	۲۲۰۷	۸۱/۷۴
نمونه ۷	۹۹/۲۱۸	۳	۷/۸۴	۲۲۵۷	۸۳/۵۹
نمونه ۸	۱۲۱/۶۴۴	۳	۷/۴۹	۲۳۶۰	۸۷/۴۱



شکل ۵) تصویر پودر آلومینیوم خالص قبل از متراکم‌کردن به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی

در روش تجربی برای تولید قطعات حاصل از فرآیند تراکم پودر، ۱۲۵ گرم از پودر انتخابی در داخل سیلندر و پیستونی استوانه‌ای شکل ریخته شده و تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط سامانه چکش پرتابه‌ای قرار گرفته است. در این سامانه با بالابردن ارتفاع چکش و افزایش جرم آن، قطعات تحت سطوح انرژی مختلف تولید شده است. برای خارج کردن نمونه‌های تولیدشده از سیلندر، از جک هیدرولیکی استفاده شده است که با وارد کردن نیروی یکنواخت باعث سالم ماندن قطعه و همچنین یکنواخت ماندن چگالی می‌شود. همچنین برای سهولت در خارج کردن قطعه از سیلندر، از روان‌کننده‌ای برای کاهش اصطکاک بین جداره سیلندر و قطعه تولیدشده، استفاده شده است.

۳- نتایج تجربی

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، بیانگر میزان چگالی، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی قطعه تولیدشده تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط سامانه چکش پرتابه‌ای است که در آن اثر تغییرات نوع پودر، اندازه دانه و همچنین تغییرات شرایط بارگذاری با توجه به تغییرات ارتفاع چکش پرتاب‌شده در نظر گرفته شده است. تغییر ارتفاع چکش پرتاب‌شده موجب افزایش انرژی انتقالی به قطعه و به‌تبع آن تراکم بیشتر ذرات قطعه تولیدشده می‌شود. انرژی تولیدشده در این فرآیند با صرف‌نظر از اصطکاک از رابطه ۱ به‌دست می‌آید [2,3]:

$$U = Mgh \quad (1)$$

که در آن، M جرم چکش و h ارتفاع چکش نسبت به پیستون قبل از سقوط آزاد است.

در شکل ۳، نمونه‌هایی از قطعات تولیدشده از پودر آلومینیوم تحت بارگذاری ضربه‌ای با سامانه چکش پرتابه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش انرژی انتقالی، ارتفاع قطعات کاهش یافته و به‌تبع آن چگالی افزایش یافته است.

جدول ۲) نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر پودر B

پودر B	جرم چکش (kg)	ارتفاع چکش (m)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه ۱	۷۴/۷۱۹	۱	۱۰/۲۵	۱۷۲۶	۶۳/۹۳
نمونه ۲	۷۴/۷۵۳	۱/۵	۹/۴۵	۱۸۷۱	۶۹/۳۰
نمونه ۳	۷۴/۷۷۰	۲	۸/۸۲	۲۰۰۶	۷۴/۳۰
نمونه ۴	۷۴/۷۸۰	۲/۵	۸/۴۱	۲۱۰۲	۷۷/۸۵
نمونه ۵	۷۴/۷۵۳	۳	۸/۱۰	۲۱۸۴	۸۰/۸۹
نمونه ۶	۱۰۴/۷۰۹	۲/۵	۷/۸۵	۲۲۵۲	۸۳/۴۱
نمونه ۷	۹۹/۲۱۸	۳	۷/۵۸	۲۳۳۳	۸۶/۴۱
نمونه ۸	۱۲۱/۶۴۴	۳	۷/۱۶	۲۴۷۱	۹۱/۵۲

جدول ۳) نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر پودر C

پودر C	جرم چکش (kg)	ارتفاع چکش (m)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه ۱	۷۴/۷۱۹	۱	۱۰/۲۱	۱۷۳۲	۶۴/۱۵
نمونه ۲	۷۴/۷۵۳	۱/۵	۹/۴۴	۱۸۷۳	۶۹/۳۷
نمونه ۳	۷۴/۷۷۰	۲	۸/۴۷	۲۰۸۹	۷۷/۳۷
نمونه ۴	۷۴/۷۸۰	۲/۵	۸/۰۸	۲۱۸۹	۸۱/۰۷
نمونه ۵	۷۴/۷۵۳	۳	۷/۸۸	۲۲۴۳	۸۳/۰۷
نمونه ۶	۱۰۴/۷۰۹	۲/۵	۷/۶۷	۲۳۰۷	۸۵/۴۴
نمونه ۷	۹۹/۲۱۸	۳	۷/۲۷	۲۴۳۱	۹۰/۰۴
نمونه ۸	۱۲۱/۶۴۴	۳	۶/۸۹	۲۵۶۸	۹۵/۱۱

جدول ۴) نتایج به‌دست‌آمده از آزمون خمش و روابط ۲ و ۳

نوع پودر	شماره نمونه	نیروی شکست (N)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
پودر A	۱	۴۷۳	۱/۹۱	۵۵۶/۴۷
	۲	۸۶۲	۳/۴۸	۷۵۶/۱۴
	۳	۱۶۴۰	۶/۶۳	۱۴۳۳/۱۶
	۴	۱۸۲۰	۷/۳۵	۱۸۹۵/۸۳
	۵	۲۲۳۰	۹/۰۱	۲۳۲۲/۹۲
	۶	۲۵۴۰	۱۰/۲۶	۲۵۴۰/۷۵
	۷	۲۹۶۰	۱۱/۹۶	۲۸۹۱/۳۵
	۸	۳۴۷۰	۱۴/۰۲	۳۰۴۵/۴۳
پودر B	۱	۵۰۵	۲/۰۴	۵۷۳/۸۶
	۲	۹۵۵	۳/۸۶	۹۵۵
	۳	۱۶۸۰	۶/۷۹	۱۴۰۲/۷۵
	۴	۱۸۸۰	۷/۶۰	۱۷۹۸
	۵	۲۳۷۵	۹/۶۰	۲۴۸۶/۳۶
	۶	۲۶۲۰	۱۰/۵۹	۲۷۰۸/۶۷
	۷	۳۰۱۰	۱۲/۱۶	۲۶۰۷/۳۴
	۸	۳۵۴۰	۱۴/۳۰	۳۱۸۳/۳
پودر C	۱	۵۲۰	۲/۱۰	۵۸۴/۵۳
	۲	۷۳۲	۲/۹۶	۱۱۰۹/۱
	۳	۱۶۷۰	۶/۷۵	۱۸۹۴/۴۳
	۴	۱۹۴۰	۷/۸۴	۲۳۰۹/۵۴
	۵	۲۴۹۰	۱۰/۰۶	۲۷۰۶/۵۲
	۶	۲۷۰۰	۱۰/۹۱	۲۹۸۶/۵۷
	۷	۳۲۱۰	۱۲/۹۷	۳۰۰۲/۶۷
	۸	۳۷۵۰	۱۵/۱۵	۳۵۲۱/۹۴

۴- طراحی آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در فرآیند تراکم پودر، بررسی تاثیر هر کدام از آنها به‌صورت جداگانه کار بسیار دشواری است. استفاده از سایر روش‌ها مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به‌خوبی تاثیر و برهمکنش بین پارامترها را نشان دهد؛ بنابراین استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش می‌تواند موثر باشد. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology; RSM) به‌علت دقت خوب در تعیین تاثیرات برهمکنشی پارامترها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این روش، انجام تعدادی آزمایش تعیین‌شده توسط نرم‌افزار طراح آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، می‌تواند تاثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین کند.

در این مقاله به‌منظور تعیین تاثیر پارامترهای فرآیند تراکم پودر فلزات و با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به‌طور معمول به‌صورت جدولی

از آزمون خمش با دستگاه خمش سه‌نقطه‌ای برای به‌دست‌آوردن نیروی شکست و به‌تبع آن مقاومت خمشی قطعات تولیدی استفاده شده است. با استفاده از داده‌های خروجی از این آزمایش، نیروی شکست و شیب نمودار نیرو-جابجایی برای هر قطعه به‌دست آمده است. با استفاده از رابطه ۲، مقدار مقاومت خمشی برای هر قطعه محاسبه شده است که در آن P نیروی شکست، L فاصله بین تکیه‌گاه‌های دستگاه آزمون خمش و d قطر قطعه تولیدی است.

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi d^3} \quad (۲)$$

با توجه به رابطه ۳، مدول الاستیسیته برای هر قطعه به‌دست می‌آید که در آن I ممان اینرسی قطعه و $\frac{dp}{d\delta}$ شیب نمودار نیرو-جابجایی است.

$$E = \frac{L^3}{48I} \left(\frac{dp}{d\delta} \right) \quad (۳)$$

کلیه داده‌های محاسبه‌شده در جدول ۴ گزارش شده است. کاهش فضای تخلخل که در مرحله اول تراکم رخ می‌دهد، باعث کاهش حجم اشغالی توسط پودر شده و به‌تبع آن افزایش چگالی را در پی دارد. با توجه به روابط ۲ و ۳ و همچنین افزایش نیروی شکست و شیب نمودار نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از نمودارهای آزمون خمش، افزایش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نیز قابل توجیه است.

جدول ۶) نتایج آزمون ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ چگالی سبز (Y₁)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل (Y ₁)	۱۳۱۳۰۰۰	۹	۱۴۵۹۰۰	۳۴۹/۹۶	<۰/۰۰۰۱
X ₁	۱۷۴۹۸/۵۸	۱	۱۷۴۹۸/۵۸	۴۱/۹۶	<۰/۰۰۰۱
X ₂	۴۱۹۳۲/۷۸	۱	۴۱۹۳۲/۷۸	۱۰۰/۵۶	<۰/۰۰۰۱
X ₃	۲۹۴۱/۹۳	۱	۲۹۴۱/۹۳	۷/۰۵	۰/۰۱۸۸
X ₁ X ₂	۴۷۷۸/۵۰	۱	۴۷۷۸/۵۰	۱۱/۴۶	۰/۰۰۴۴
X ₁ X ₃	۱۵۰۰/۹۲	۱	۱۵۰۰/۹۲	۳/۶۰	۰/۰۷۸۶
X ₂ X ₃	۱۶۱۷/۵۷	۱	۱۶۱۷/۵۷	۳/۸۸	۰/۰۶۹۰
X ₁ ²	۴۱۸/۶۱	۱	۴۱۸/۶۱	۱	۰/۳۳۳۴
X ₂ ²	۷۵۱۹/۹۴	۱	۷۵۱۹/۹۴	۱۸/۰۳	۰/۰۰۰۸
X ₃ ²	۲۲/۹۵	۱	۲۲/۹۵	۰/۰۵۵	۰/۸۱۷۹
باقیمانده	۵۸۳۸/۱۹	۱۴	۴۱۷/۰۱	-	-
خطای خالص	۱۳۱۹۰۰۰	۲۳	-	-	-

جدول ۷) نتایج آزمون ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ مقاومت سبز (Y₂)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل (Y ₂)	۳۸۲/۵۳	۹	۴۲/۵۰	۱۷۵/۰۲	<۰/۰۰۰۱
X ₁	۰/۳۹	۱	۰/۳۹	۱/۵۹	۰/۲۲۷۸
X ₂	۱۲/۲۷	۱	۱۲/۲۷	۵۰/۵۲	<۰/۰۰۰۱
X ₃	۰/۸۴	۱	۰/۸۴	۳/۴۵	۰/۰۸۴۳
X ₁ X ₂	۰/۴۱	۱	۰/۴۱	۱/۶۸	۰/۲۱۵۶
X ₁ X ₃	۰/۰۵۵	۱	۰/۰۵۵	۰/۲۳	۰/۶۴۱۶
X ₂ X ₃	۰/۶۸	۱	۰/۶۸	۲/۸۰	۰/۱۱۶۷
X ₁ ²	۰/۰۱۸	۱	۰/۰۱۸	۰/۰۷۳	۰/۷۹۱۵
X ₂ ²	۰/۳۷	۱	۰/۳۷	۱/۵۳	۰/۲۳۷۰
X ₃ ²	۰/۱۲	۱	۰/۱۲	۰/۴۹	۰/۴۹۵۹
باقیمانده	۳/۴۰	۱۴	۰/۲۴	-	-
خطای خالص	۳۸۵/۹۳	۲۳	-	-	-

مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ چگالی سبز و مقاومت سبز به ترتیب به صورت رابطه‌های ۵ و ۶ به دست آمده است. این رابطه‌ها برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

$$Y_1 = 2084.86 + 49.80X_1 + 296.19X_2 + 76.96X_3 + 29.60X_1X_2 + 16.15X_1X_3 + 61.53X_2X_3 + 8.86X_1^2 - 53.61X_2^2 - 3.53X_3^2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 7.59 + 0.23X_1 + 5.07X_2 + 1.30X_3 + 0.27X_1X_2 + 0.098X_1X_3 + 1.26X_2X_3 - 0.057X_1^2 - 0.38X_2^2 - 0.25X_3^2 \quad (6)$$

مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۱ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها نزدیک خط مورب بدان معنا است که مدل، پیش‌بینی خوبی از تغییر شکل ساختار دولایه نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل نمودار نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ساختار دولایه که از آبی تا قرمز یعنی از کم تا زیاد نشان داده شده است.

شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p-value) ارائه می‌شود.

تعداد ۲۴ آزمایش انجام شد که داده‌های آنها در جداول ۱ تا ۳ آمده است. با توجه به داده‌ها، ۳ متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و دو متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. چگالی سبز و مقاومت سبز به‌عنوان متغیرهای خروجی و جرم چکش، ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات به‌عنوان پارامترهای مستقل در این بررسی هستند. در جدول ۵، نماد این پارامترها و تغییرات آنها آمده است.

جدول ۵) پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آنها

پارامتر	نماد	واحد	حد اقل	حد اکثر
اندازه دانه‌بندی ذرات	X ₁	μm	۱۲۵	۲۲۵
ارتفاع چکش	X ₂	mm	۱۰۰	۳۰۰
جرم چکش	X ₃	kg	۷۴	۱۲۲
چگالی سبز	Y ₁	kg/m ³	-	-
مقاومت سبز	Y ₂	MPa	-	-

رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به صورت چند جمله‌ای با مرتبه دوم است. معادله ۴ این رابطه را نشان می‌دهد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

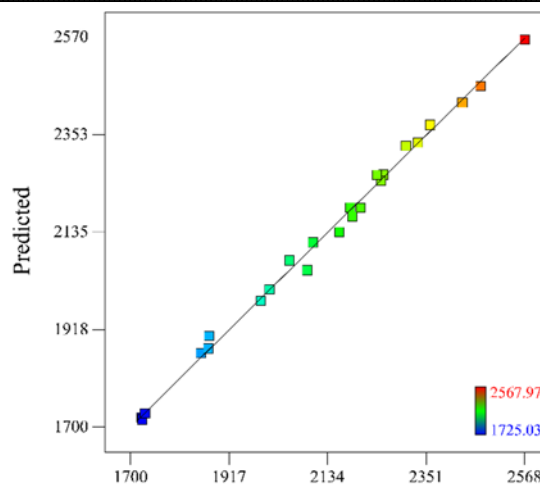
که در آن، Y پاسخ محاسبه شده، X_i و X_j متغیرهای کدگذاری شده، β₀ ضریب ثابت، β_j ضریب خطی، β_{ij} ضریب مرتبه دوم و β_{ij} ضریب متقابل است [31].

۱-۴- تحلیل واریانس خروجی‌ها

پس از بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده و استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های R² و R²_{adj} مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهادی، مدل درجه دوم اصلاح شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش برای چگالی سبز و مقاومت سبز دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که مقدار p-value آنها کمتر از ۰/۱ بود در جداول ۶ و ۷ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تاثیر بالای هر کدام از آنها بر خروجی دارد. در این بررسی، به‌منظور معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است؛ بر این اساس، p-value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده و این یعنی مدل دنظرگرفته شده معنی‌دار است. مقدار R² و R²_{adj} برای چگالی سبز به ترتیب برابر ۰/۹۹۵۶ و ۰/۹۹۲۷ و برای مقاومت سبز به ترتیب برابر ۰/۹۹۱۲ و ۰/۹۸۵۵ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل‌های ارائه شده برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده برای خروجی‌ها، بر اساس مدل مطابقت دارند.

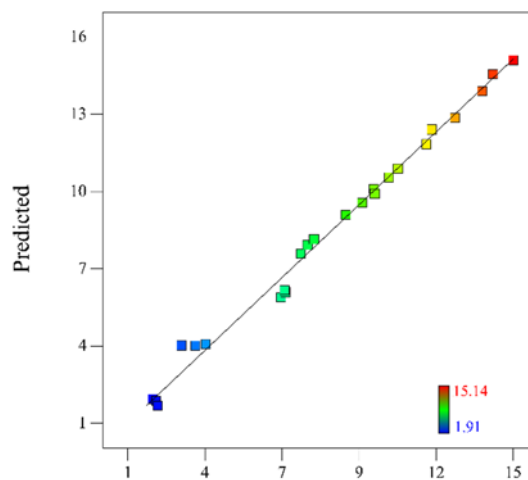
۲-۴- تحلیل آماری خروجی

در این بخش به بررسی تاثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور همزمان روی چگالی سبز و مقاومت سبز پرداخته شده است. در نمودار ۴، تاثیر پارامترهای مستقل بر چگالی سبز و مقاومت سبز نشان داده شده است. تحلیل این نمودارها بدان شکل است که شیب بیشتر خط مربوط به هر کدام از پارامترها، نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر روی چگالی سبز و مقاومت سبز است. همان‌طور که در نمودار ۴- الف مشاهده می‌شود، ارتفاع چکش بیشترین و اندازه دانه‌بندی ذرات کمترین تاثیر را بر چگالی سبز دارد. در نمودار ۴- ب نیز مشاهده می‌شود که ارتفاع چکش بیشترین و اندازه دانه‌بندی ذرات کمترین تاثیر را بر مقاومت سبز دارد.



Actual

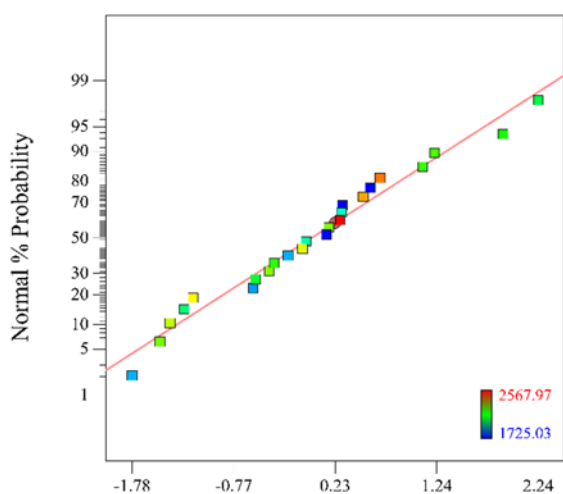
الف



Actual

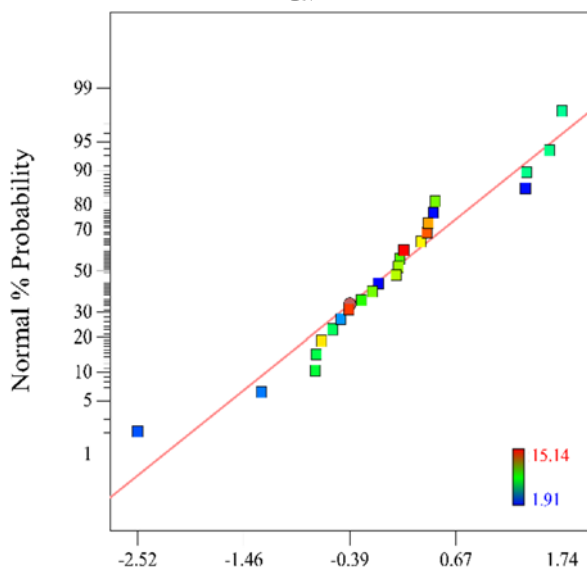
ب

نمودار ۱) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی؛ الف) چگالی سبز و ب) مقاومت سبز



Internally Studentized Residuals

الف



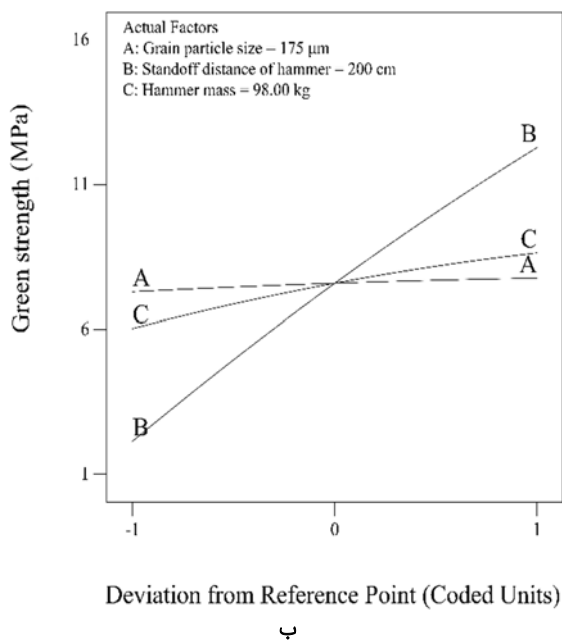
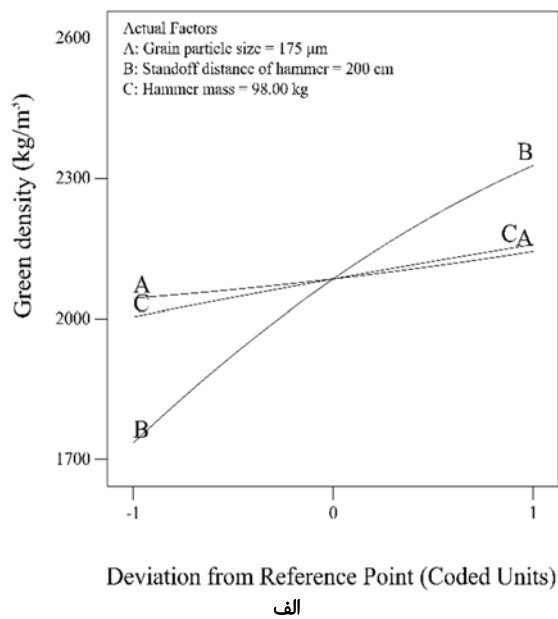
Internally Studentized Residuals

ب

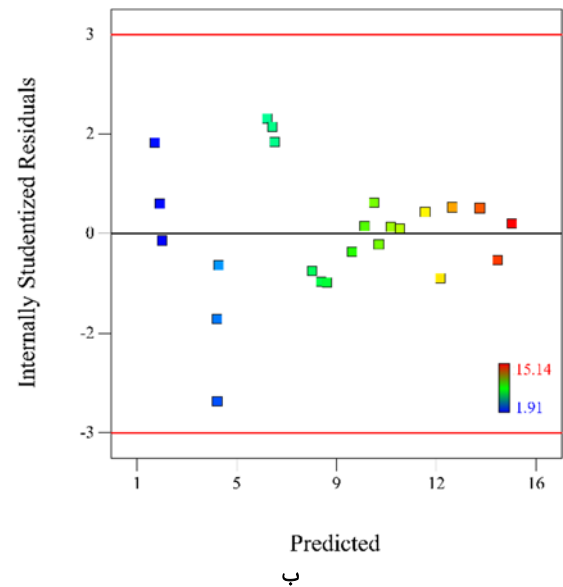
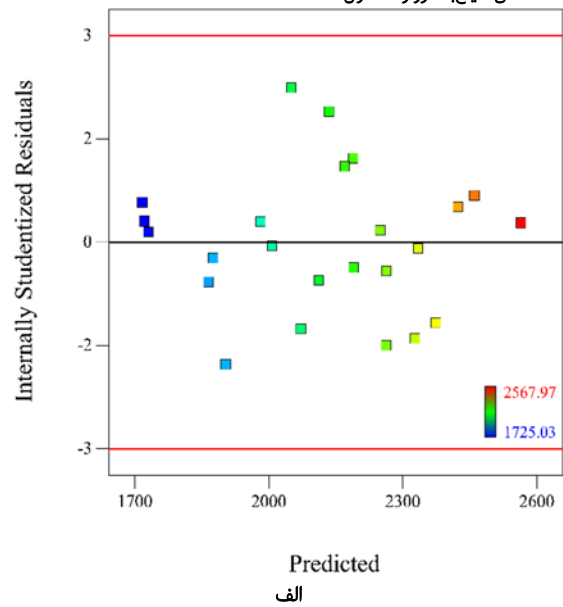
نمودار ۲) احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها؛ الف) چگالی سبز و ب) مقاومت سبز

در نمودارهای ۲ و ۳، به ترتیب نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است. طبق یک قانون کلی برای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، داده‌های این نمودار باید ۳ ویژگی داشته باشند؛ اول اینکه باید داده‌های احتمالی بین ۲۵ تا ۷۵ باشند، دوم اینکه باید این داده‌ها بیشتر از ۹۹ و کمتر از ۱ نیز نباشند و سوم اینکه باید بیش از ۹۵٪ باقی‌مانده‌ها بین مقادیر ۲ و ۲- باشند [42, 43]. با توجه به این قانون کلی، نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، توزیع مناسبی از خطاها دارد و قابل قبول است. در نمودار ۳ نیز نمودار باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده نشان داده شده است. در اینجا نیز به‌عنوان یک قانون کلی برای باقی‌مانده‌ها، باید خطاها بین مقادیر ۳ و ۳- توزیع شده باشند؛ بنابراین این نمودار نشان می‌دهد که خطاهای مقادیر پیش‌بینی‌شده، در محدوده مشخص قرار دارند و

شده است، اما این تأثیرات نسبت به چگالی سبز کمتر است. در نمودار ۶، مقدار ارتفاع چکش ثابت و جرم چکش و اندازه دانه‌بندی تغییر می‌کنند. مشاهده دقیق نمودار ۶- الف نشان می‌دهد که با افزایش جرم چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات، مقدار چگالی سبز افزایش می‌یابد. در این نمودار نیز به‌طور مشابه افزایش فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل جرم چکش همزمان با افزایش اندازه دانه‌بندی ذرات بیانگر این است که افزایش جرم چکش تأثیر اندازه دانه‌بندی ذرات بر چگالی سبز را افزایش می‌دهد. همین نتیجه در نمودار ۶- ب برای مقاومت سبز نیز نشان داده شده است، اما این تأثیرات نسبت به چگالی سبز کمتر است.



نمودار ۴) تأثیر پارامترهای مستقل بر چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

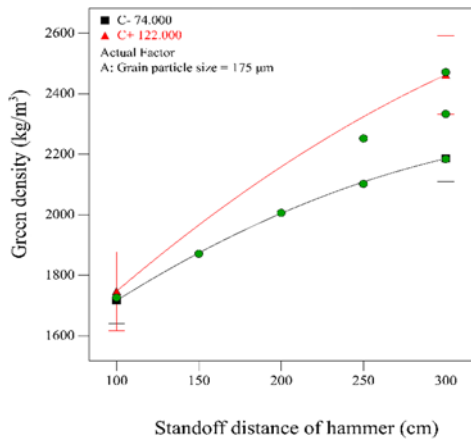


نمودار ۳) نمودار باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده: الف) چگالی سبز و ب) مقاومت سبز

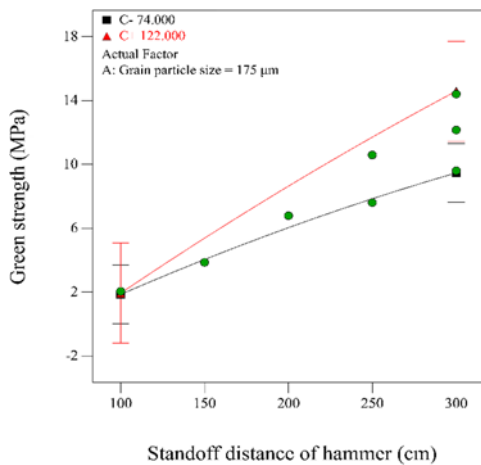
در نمودارهای ۵ تا ۷، اثر متقابل دو پارامتر بر چگالی سبز و مقاومت سبز ضمن ثابت در نظر گرفتن پارامتر سوم نشان داده شده است. در نمودار ۵، اندازه دانه‌بندی ذرات و ارتفاع چکش تغییر می‌کنند و جرم چکش ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در نمودار ۵- الف مشخص است، با افزایش اندازه دانه‌بندی و ارتفاع چکش، مقدار چگالی سبز افزایش می‌یابد. افزایش فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل ارتفاع چکش همزمان با افزایش اندازه دانه‌بندی نشان‌دهنده آن است که افزایش ارتفاع چکش تأثیر اندازه دانه‌بندی بر چگالی سبز را افزایش می‌دهد و اندازه دانه‌بندی در ارتفاع بالاتر چکش تأثیرگذاری بیشتری روی چگالی سبز دارد. همین نتیجه در نمودار ۵- ب برای مقاومت سبز نیز نشان داده

پاسخ دینامیکی پودرهای فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین: مطالعه تجربی و ... ۸۷۱

در نمودار ۷، مقدار اندازه دانه‌بندی ذرات ثابت و جرم چکش و ارتفاع چکش تغییر می‌کنند. از نمودار ۷-الف، به‌وضوح مشخص است که با افزایش جرم چکش و ارتفاع چکش، مقدار چگالی سبز افزایش می‌یابد. افزایش فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل جرم چکش همزمان با افزایش ارتفاع چکش نشان‌دهنده آن است که افزایش جرم چکش، تاثیر ارتفاع چکش بر چگالی سبز را افزایش می‌دهد و ارتفاع چکش در جرم بالاتر آن، تاثیرگذاری بیشتری روی چگالی سبز دارد. همین نتیجه در نمودار ۷-ب برای مقاومت سبز نیز نشان داده شده است.



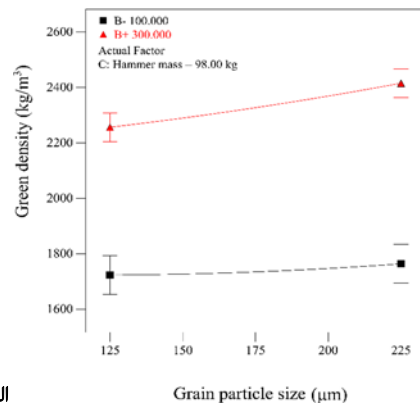
الف



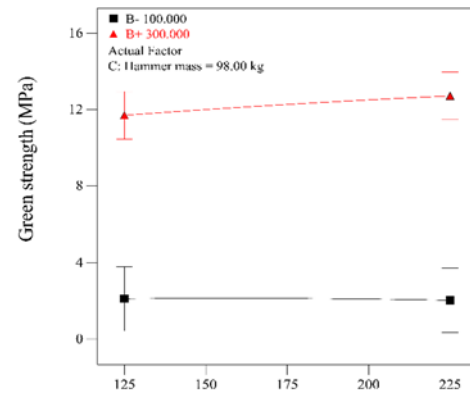
ب

نمودار ۷) تاثیر ارتفاع چکش و جرم چکش بر چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

به‌منظور درک بهتر نتایج به‌دست‌آمده در نمودارهای ۵ تا ۷، اثرات متقابل پارامترها بر چگالی سبز و مقاومت سبز به‌صورت کانتورهای رنگی در نمودارهای ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. نمودار ۸، بیانگر تغییرات ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات در جرم چکش ثابت است. نمودار ۹، نشان‌دهنده تغییرات جرم چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات در ارتفاع چکش ثابت است. نمودار ۱۰، بیانگر تغییرات جرم چکش و ارتفاع چکش در اندازه دانه‌بندی ذرات ثابت است.

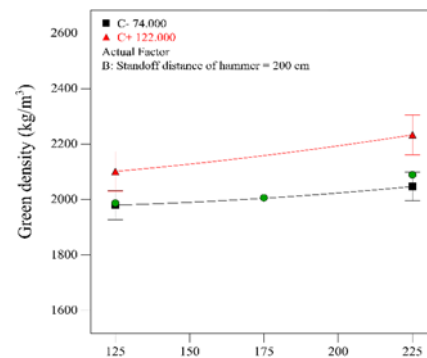


الف

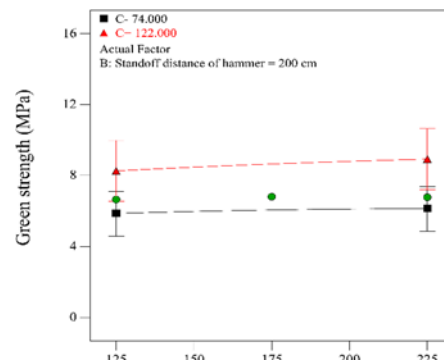


ب

نمودار ۵) تاثیر اندازه دانه‌بندی ذرات و ارتفاع چکش بر چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

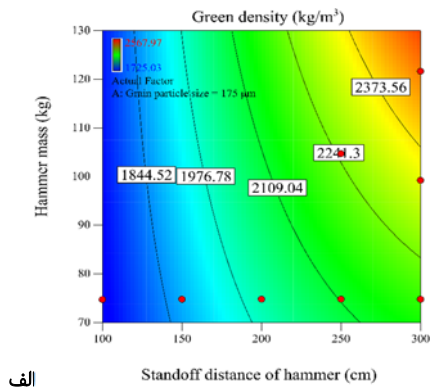


الف

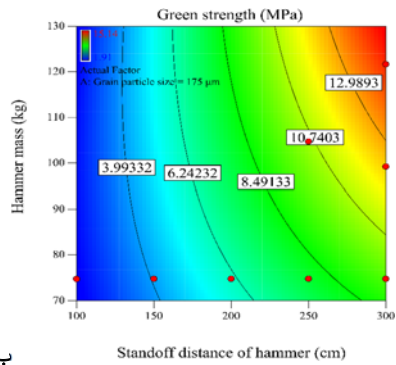


ب

نمودار ۶) تاثیر اندازه دانه‌بندی ذرات و جرم چکش بر چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)



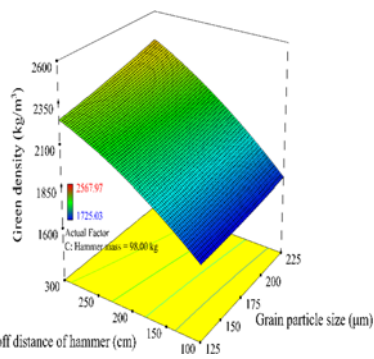
الف



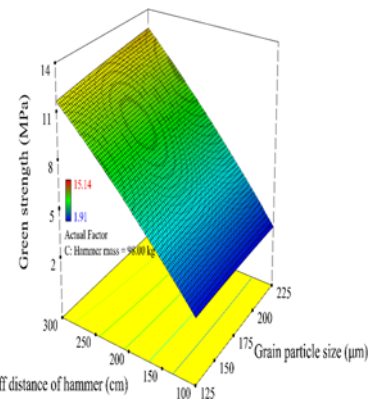
ب

نمودار ۱۰) تغییرات ارتفاع چکش و جرم چکش به صورت کانتورهای رنگی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

در نمودارهای ۱۱ تا ۱۳، مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز بر اساس تاثیر همه پارامترها به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. در نمودارهای ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب جرم چکش، ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات، ثابت است.

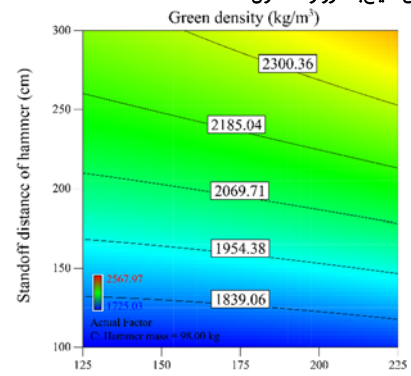


الف

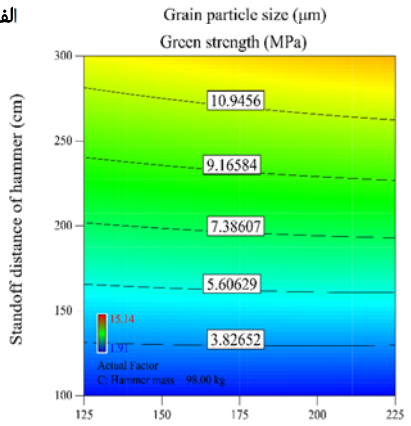


ب

نمودار ۱۱) تغییرات اندازه دانه‌بندی ذرات و ارتفاع چکش به صورت سه‌بعدی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)



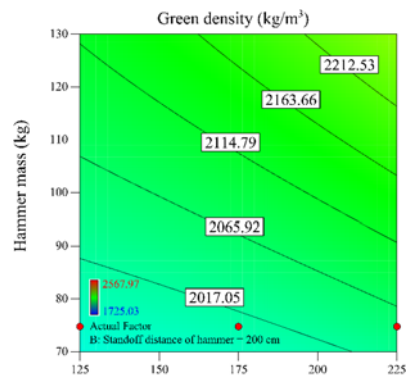
الف



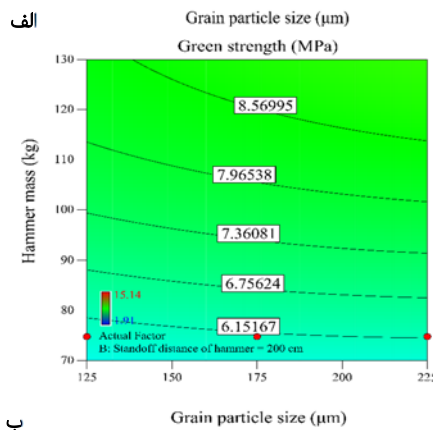
ب

نمودار ۸) تغییرات اندازه دانه‌بندی ذرات و ارتفاع چکش به صورت کانتورهای رنگی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

الف



الف



ب

نمودار ۹) تغییرات اندازه دانه‌بندی ذرات و جرم چکش به صورت کانتورهای رنگی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

۳-۴- تعیین شرایط بهینه

برای تعیین مطلوبیت تاثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی‌ها، نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۸ نشان داده شده است. در این جدول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است.

با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۸، شرایط بهینه مورد نظر به ترتیب مطلوبیت در جدول ۹ آمده است. همان‌طور که مشخص است، برای داشتن بیشترین مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز باید جرم چکش، ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات بیشترین مقادیر خود را داشته باشند. نزدیک‌بودن مقدار مطلوبیت به عدد ۱ نشان‌دهنده شرایط بهینه، خیلی خوب است.

جدول ۸) مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی برای تعیین شرایط بهینه

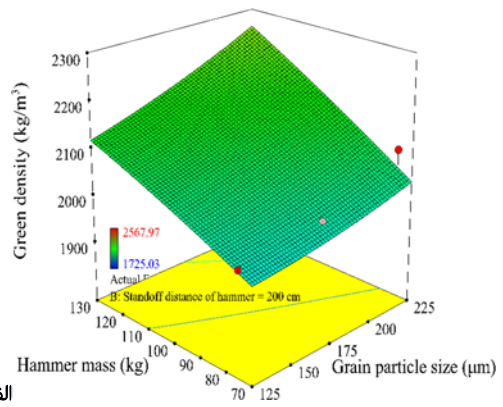
پارامتر	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت
اندازه دانه‌بندی ذرات (μm)	در بازه مقادیر	۱۲۵	۲۲۵	۳
ارتفاع چکش (mm)	در بازه مقادیر	۱۰۰	۳۰۰	۳
جرم چکش (kg)	در بازه مقادیر	۷۴	۱۲۲	۳
چگالی سبز (kg/m^3)	بیشترین مقدار	۱۷۲۵/۰۳	۲۵۶۷/۹۷	۵
مقاومت سبز (MPa)	بیشترین مقدار	۱/۹۱	۱۵/۱۴	۵

جدول ۹) شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۸

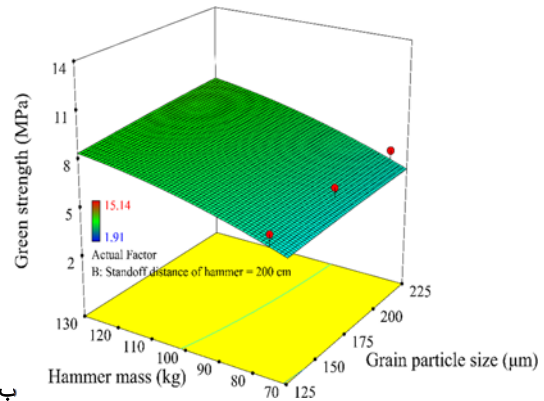
شماره	۱	۲	۳	۴	۵
اندازه دانه‌بندی ذرات (μm)	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۰۸	۱۸۱
ارتفاع چکش (mm)	۳۰۰	۳۰۰	۲۹۸	۳۰۰	۳۰۰
جرم چکش (kg)	۱۲۲	۱۲۱/۵۴	۱۲۱/۹۸	۱۲۲	۱۲۲
چگالی سبز (kg/m^3)	۲۵۶۷/۸۱	۲۵۶۳/۹۱	۲۵۶۲/۳۶	۲۵۲۹/۰۴	۲۴۷۳/۸۴
مقاومت سبز (MPa)	۱۵/۱۲۹۶	۱۵/۰۸۷۱	۱۵/۰۳۷۶	۱۴/۹۵۵	۱۴/۶۵۳
مطلوبیت	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۷۰	۰/۹۲۵

به منظور بررسی نتایج به دست آمده برای شرایط بهینه تعیین شده در جدول ۹، مقادیر شماره ۱ در یک آزمایش تجربی، مجدد مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز با آزمایش تجربی مجدد برای این شرایط به ترتیب برابر ۲۵۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۵/۲ مگاپاسکال به دست آمد؛ بنابراین مقدار خطا بین مقدار تجربی و پیش‌بینی شده برای چگالی سبز و مقاومت سبز به ترتیب برابر ۱۲٪ و ۴۶٪ است.

در نمودار ۱۴، تغییرات مطلوبیت شرایط بهینه برای بیشترین مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز بر اساس تغییر اندازه دانه‌بندی ذرات و ارتفاع چکش و با جرم چکش نشان داده شده است.

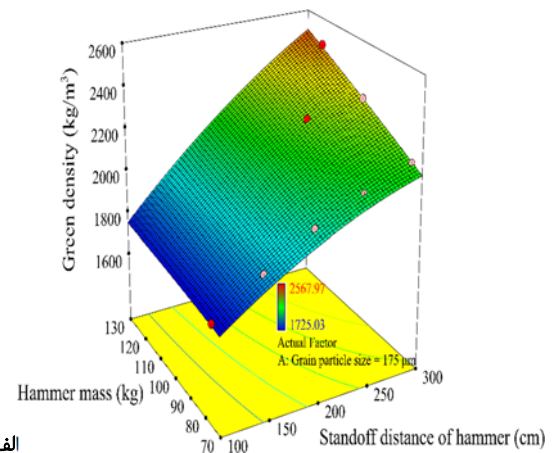


الف

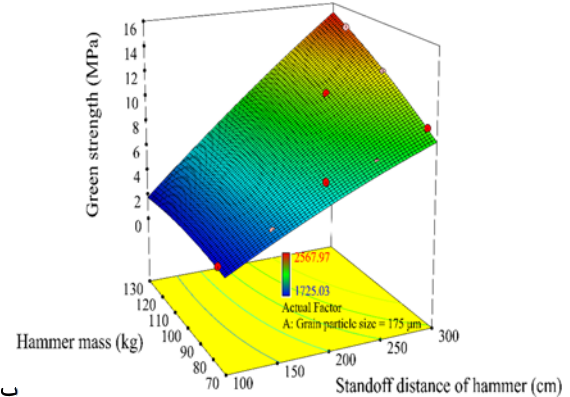


ب

نمودار ۱۲) تغییرات اندازه دانه‌بندی ذرات و جرم چکش به صورت سه‌بعدی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)



الف



ب

نمودار ۱۳) تغییرات ارتفاع چکش و جرم چکش به صورت سه‌بعدی برای چگالی سبز (الف) و مقاومت سبز (ب)

خود را داشته باشند؛ در این بین، ارتفاع چکش تاثیر بیشتری دارد و در شرایط بهینه مهم‌تر است.

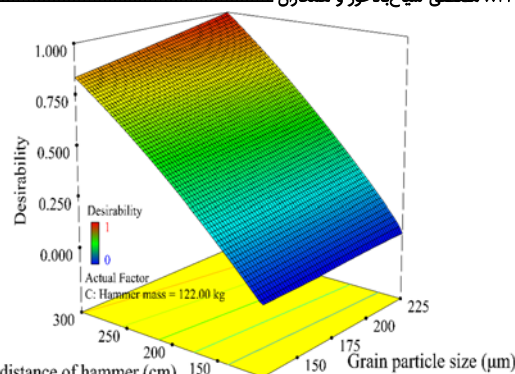
تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.
تعارض منافع: این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: مصطفی سیاح‌بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۵٪)؛ توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Technology*. 2017;315:171-181.
- 2- Alitavoli M, Babaei H, Mahmoudi A, Golbaf A, Mirzababaei Mostofi T. Experimental and analytical study of effective factors on compaction process of aluminium powder under the impact load by low speed. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(7):22-30. [Persian]
- 3- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M, Namdari M. Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(5):357-366. [Persian]
- 4- Alitavoli M, Khaleghi E, Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Namazi N, editors. Modeling and prediction of metallic powder behavior in explosive compaction process by using genetic programming method based on dimensionless numbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2019;233(2):195-201.
- 5- Al-Qureshi HA, Galiotto A, Klein AN. On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;166(1):135-143.
- 6- Yan Z, Chen F, Cai Y. High-velocity compaction of titanium powder and process characterization. *Powder Technology*. 2011;208(3):596-599.
- 7- Berg S, Jonsén P, Häggblad HÅ. Experimental characterisation of CaCO₃ powder mix for high-pressure compaction modelling. *Powder Technology*. 2010;203(2):198-205.
- 8- Berg S, Jonsén P, Häggblad HÅ. Experimental characterization of CaCO₃ powder for use in compressible gaskets up to ultra-high pressure. *Powder Technology*. 2012;215-216:124-131.
- 9- Berg S, Marklund P, Häggblad HÅ, Jonsén P. Frictional behaviour of CaCO₃ powder compacts. *Powder Technology*. 2012;228:429-434.
- 10- Poquillon D, Baco-Carles V, Tailhades Ph, Andrieu E. Cold compaction of iron powders—relations between powder morphology and mechanical properties: Part II.



نمودار (۱۴) تغییرات مطلوبیت شرایط بهینه براساس تغییرات اندازه دانه‌بندی و ارتفاع چکش به صورت سه‌بعدی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی و تحلیل بهینه، خواص نهایی قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم پودر پرداخته شد. پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند تراکم پودر عبارت بودند از اندازه دانه‌بندی ذرات پودر، جرم و ارتفاع چکش مورد استفاده در سامانه چکش پرتابه‌ای. در بخش تجربی از پودر آلومینیوم خالص استفاده شد که با رهاسازی چکش از ارتفاع‌های مختلف، به بررسی رفتار مکانیکی قطعه تولیدی تحت سطوح انرژی مختلف پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصل از داده‌های تجربی و حصول درصد چگالی نسبی بالا (از ۸۵٪ بیشتر) در نمونه‌های A، B و C، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند تراکم پودر با نرخ انرژی پایین جایگزین مناسبی برای فرآیندهای نرخ انرژی بالا نظیر فرآیند تراکم انفجاری است. از ویژگی‌های فرآیند تراکم پودر با نرخ انرژی پایین می‌توان به کم‌هزینه‌بودن و ایمنی بیشتر آن اشاره کرد.

در بخش مدل‌سازی نیز، از روش سطح پاسخ استفاده شد. به‌منظور بررسی معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد؛ این بدان معنا است که چنانچه p-value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p-value و همچنین R² و R_{adj}² به‌دست آمد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی برای هر دو خروجی یعنی چگالی سبز و مقاومت سبز، دارد. اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم چکش و ارتفاع چکش به‌عنوان پارامترهای مستقل تاثیرگذار بر خروجی‌ها یعنی چگالی سبز و مقاومت سبز، در نظر گرفته شدند. ارتفاع چکش بیشترین تاثیر و اندازه دانه‌بندی ذرات کمترین تاثیر را بر خروجی‌ها دارند. با افزایش ارتفاع چکش تاثیر اندازه دانه‌بندی ذرات و جرم چکش بر خروجی‌ها یعنی چگالی سبز و مقاومت سبز افزایش می‌یابد. ضمناً با افزایش جرم چکش نیز تاثیر ارتفاع چکش بر خروجی‌ها افزایش می‌یابد. برای داشتن شرایط بهینه (افزایش مقدار چگالی سبز و مقاومت) باید اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم چکش و ارتفاع چکش بیشترین مقادیر

- 28- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(3):490-496.
- 29- Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh SH, Mirzababaie Mostofi T. Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2016 July.
- 30- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M, Namazi N, Rahmanpoor A. Dynamic compaction of cold die Aluminum powders. *Geomechanics and Engineering*. 2016;10(1):109-124.
- 31- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomechanics and Engineering*. 2015;9(2):207-218.
- 32- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2016;231(5):939-950.
- 33- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Structures*. 2016;109:367-376.
- 34- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M, Darvizeh A. Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*. 2016;40(6):1485-1494.
- 35- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2016;234(2):231-245.
- 36- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;125:93-106.
- 37- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015 October.
- 38- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2017;112:118-124.
- 39- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2016;107:257-265.
- Bending tests: Results and analysis. *Powder Technology*. 2002;126(1):75-84.
- 11- Stasiak M, Tomas J, Molenda M, Rusinek R, Mueller P. Uniaxial compaction behaviour and elasticity of cohesive powders. *Powder Technology*. 2010;203(3):482-488.
- 12- Crawford R, Paul D. Radial and axial die pressures during solid phase compaction of polymeric powders. *European Polymer Journal*. 1981;17(10):1023-1028.
- 13- Kadhim KMJ, Alwan AA, Abed IJ. Simulation of cold die compaction Alumina powder. *STM Journals*. 2011;1(1):1-21.
- 14- Martin CL, Bouvard D, Shima S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2003;51(4):667-693.
- 15- Azhdar B, Stenberg B, Kari L. Development of a high-velocity compaction process for polymer powders. *Polymer Testing*. 2005;24(7):909-919.
- 16- Murakoshi Y, Boey F, Sano T. Al/Li alloy composites using a dynamic shock compaction technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 1993;38(1-2):351-360.
- 17- Wang JZ, Qu X, Yin H, Yi MJ, Yuan XJ. High velocity compaction of ferrous powder. *Powder Technology*. 2009;192(1):131-136.
- 18- Hu RL, Yeung MR, Lee CF, Wang SJ. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction. *Engineering Geology*. 2001;59(3-4):203-217.
- 19- Mamalis AG, Vottea IN, Manolakos DE. On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;108(2):165-178.
- 20- Shoaib M, Kari L, Azhdar B. Simulation of high-velocity compaction process with relaxation assists using the discrete element method. *Powder Technology*. 2012;217:394-400.
- 21- Khoei AR, Biabanaki SOR, Parvaneh SM. Dynamic modeling of powder compaction processes via a simple contact algorithm. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012;64(1):196-210.
- 22- Khoei AR, Keshavarz Sh, Khaloo AR. Modeling of large deformation frictional contact in powder compaction processes. *Applied Mathematical Modelling*. 2008;32(5):775-801.
- 23- Koynov A, Romanski F, Cuitiño AM. Effects of particle size disparity on the compaction behavior of binary mixtures of pharmaceutical powders. *Powder Technology*. 2013;236:5-11.
- 24- Sinka I, Cocks A. Constitutive modelling of powder compaction-II. Evaluation of material data. *Mechanics of Materials*. 2007;39(4):404-416.
- 25- Press WH, Flannery BP, Teukolsky Sa, Vetterling WT. Numerical recipes in Fortran in C: The art of scientific computing. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 1992.
- 26- Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaie Mostofi T. Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):305-312. [Persian]
- 27- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(4):361-368. [Persian]

- 42- Golmakani H, Moradi Besheli S, Mazdak S, Sharifi E. Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square sections two layers sheet with rubber matrix. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(2):79-87. [Persian]
- 43- Bigdeli A, Damghani Nouri M. Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2018;26(19):1644-1660.
- 40- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.
- 41- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(7):1449-1471.