



مطالعه تجربی و تحلیلی عوامل مؤثر بر فرآیند تراکم پودر آلومینیومی تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین

مجید علی‌طاوی^{1*}، هاشم بابایی²، علی محمودی³، علی گلباف³، توحید میرزابابایی مستوفی⁴

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 3756-41635، tavoli@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 فروردین 1394

پذیرش: 12 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 28 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

بارگذاری ضربه‌ای

تراکم پودر

چکش پرتابه‌ای

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی تجربی و تحلیلی چگالی نهایی، درصد تخلخل و توزیع چگالی قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم پودر، تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای است. در بخش تجربی، با استفاده از پودر آلومینیوم خالص، به بررسی تأثیرپذیری چگالی از اندازه دانه و سطوح انرژی متفاوت پرداخته می‌شود. در این راستا با تغییر مقادیر جرم و ارتفاع چکش اثر سطوح مختلف انرژی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در بخش تحلیلی، با در نظر گرفتن یک المان کوچک از قطعه در حال تراکم و استفاده از معادلات تعادل، معادله بقای جرم و معیار لوی میز، رابطه‌ای برای چگالی نهایی قطعه به دست می‌آید. با استفاده از تحلیل آماری، تأثیر اندازه دانه و ضریب اصطکاک به عنوان دو عامل تأثیرگذار، به طور هم‌زمان روی چگالی نهایی به دست آمده از حل تحلیلی، بررسی می‌شود. در گام بعدی، درصد تخلخل و توزیع چگالی در قطعات تولیدی به روش تحلیلی محاسبه و با مقادیر تجربی آن مقایسه می‌شود. تطابق قابل قبول بین نتایج تجربی و تحلیلی، صحت نتایج تحلیلی ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین با به کارگیری دو کمیت ثابت ضریب شکل و کار سختی در روابط تحلیلی، به بررسی اثرات این دو عامل بر درصد تخلخل و توزیع چگالی قطعات تولیدشده، پرداخته می‌شود.

Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed

Majid Alitavoli*, Hashem Babaei, Ali Mahmoudi, Ali Golbaf, Tohid Mirzababaie Mostofi

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

* P.O.B. 3756-41635 Rasht, Iran, tavoli@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 April 2015
Accepted 02 May 2015
Available Online 18 May 2015

Keywords:
Drop Hammer
Powder Compaction
Impact Loading

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the green density, the percentage of porosity and the density distribution of materials which have been produced by powder compaction procedure under low rate impact loading by using drop hammer both experimentally and analytically. Effect of grain size and different level of energy on density is carried out in the experimental section. In this regard, the effect of different level of energy is investigated by changing mass and height of hammer. The analytical section presents a relation for green density considering a small element of compacting piece and using equilibrium equation, continuity equation and Levy-Mises equation. Using the statistical analysis leads to investigation of the effect of grain size and friction coefficient simultaneously as two impressive factors on analytical green density. In the next step, the percentage of porosity and density distribution was calculated analytically and compared with experimental values. The satisfactory agreement between Experimental results and analytical ones validates the presented analytical results. Also, by applying two constant quantities, shape factor and work hardening in analytical relations, the effect of these factors on percentage of porosity and density distribution of products have been investigated.

1- مقدمه

می‌توان به کنترل ترکیب پودرهای به کار برده شده، فشرده‌سازی در قالب‌های مناسب و گرمایش بعدی قطعه تولیدی در یک فضای مشخص با حرارت قابل کنترل اشاره کرد. توجه به نکات یادشده سبب رسیدن به چگالی و مقاومت مورد نیاز می‌شود. به طور کلی، از سال 1920، قطعه‌های تولیدشده با

در صنعت، برای تولید قطعات مهندسی پیچیده با دقت بسیار بالا، از روش متالورژی پودر استفاده می‌شود که پیچیدگی این روش به دلیل تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر، طی فرآیند تراکم است. از نکات قابل توجه در این روش

Please cite this article using:

M. Alitavoli, H. Babaei, A. Mahmoudi, A. Golbaf, T. Mirzababaie Mostofi, Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 22-30, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده از روش تراکم پودر مانند کاربیدهای تنگستن و برنز برای یاتاقان‌ها و رشته‌های تنگستن برای لامپ‌ها، مورد استفاده تجاری قرار گرفت [1].

القریشی و همکارانش با بررسی تغییر شکل‌های بزرگ ذرات در سیستم‌های متقارن، یک مدل ریاضی برای چگالی نهایی ارائه دادند که در این مدل، پارامترهای اصطکاک درونی و اثر اندازه دانه تأثیرگذار است [1].

یان و همکارانش، با انجام آزمایش بر روی پودر تیتانیوم، اثر فشار بیشینه اعمالی بر چگالی نهایی قطعه را مورد بررسی قرار دادند. همچنین با بررسی فرآیند تراکم بر 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 ارائه چندین راه‌کار برای بهبود فرآیند فشرده‌سازی شد [2].

برگ و همکارانش با استفاده از تئوری‌های مختلف تنش مؤثر، بازه‌ای برای زاویه اصطکاک و چسبندگی ذرات در چگالی‌های نهایی مختلف، به دست آوردند. همچنین در این تحقیق، تعدادی رابطه ریاضی برای محاسبه مدول حجمی و یانگ ارائه شد که تطابق قابل توجهی با نتایج تجربی دارد. برگ در پژوهش‌های دیگر، با استفاده از حل عددی، نحوه توزیع چگالی را در یک قرص فشرده‌شده و همچنین پدیده بازگشت فنی را مورد بررسی قرار داد [3-5].

شعیب و همکارانش، در فرآیند تراکم پودر با سرعت‌های بالا به همراه تسهیل‌کننده از روش گسسته سازی المان‌ها استفاده کردند. شایان یاد است که تسهیل‌کننده شامل دو عدد قرص فلزی است که در بالا و پایین قالب قرار گرفته و پودر بین این دو قرص جای دارد. از مزایای استفاده از تسهیل‌کننده می‌توان به بهتر قفل شدن ذره‌ها اشاره کرد. همچنین نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی نشان‌دهنده تراکم روان‌تر در مدت بارگذاری، جلوگیری از جدایی ذره‌ها هنگام باربرداری و تبدیل انرژی بالای جنبشی چکش به تغییر شکل ذره‌ها می‌شود [6].

برای درک بهتر مکانیزم فرآیند تراکم، کدهیم و همکارانش این فرآیند را با در نظر گرفتن مدل پایدار ریاضی بررسی کردند. آن‌ها از روش تفاضل محدود برای حل عددی قطعات متقارن استوانه‌ای شکل استفاده و در آن اهمیت فیزیکی مدل ساختاری را در تولید شیب فشار، طی فرآیند تراکم، بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که به‌طور معمول برای به‌دست آوردن توزیع چگالی نهایی در هر قطعه، مدل توزیع فشار با تابع تجربی فشار و چگالی مربوط به همان قطعه همراه می‌شود. آن‌ها در این مدل تأثیر نیروهای اصطکاکی که بین ذرات و بین دیواره داخلی قالب و ذرات وجود دارند را مورد بررسی قرار دادند. همچنین نشان دادند که هندسه تراکم، تأثیر مستقیمی روی توزیع فشار و چگالی نهایی قطعات تولیدشده دارد، به این صورت که نسبت ابعاد کوچک‌تر توزیع یکنواخت‌تری دارد [7].

در جدیدترین تحقیقات انجام‌شده با سامانه چکش پرتابه‌ای، بابایی و همکارانش به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی و مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداخته‌شده است که در قسمت تحلیلی با استفاده از روش انرژی و روش لولای پلاستیک روابطی برای بیشینه‌خیز مرکز ورق ارائه‌شده است. 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 [8-10].

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی و تحلیلی چگالی نسبی در قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم پودر آلومینیومی است. همچنین در این تحقیق به

بررسی اثر اصطکاک داخلی ذرات بر چگالی نسبی و به تبع آن پدیده برگشت فنی پرداخته می‌شود. در بخش تجربی به بررسی رفتار مکانیکی تراکم پودر آلومینیوم خالص تحت بارهای مختلف دینامیکی توسط چکش پرتابه‌ای پرداخته‌شده است. در این راستا پودر آلومینیوم به سه گروه از نظر اندازه دانه تقسیم‌بندی شده است. در بخش تحلیلی از روابط مطرح‌شده مقدار چگالی نسبی برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه‌شده و دلیل اختلاف نتایج تجربی و تحلیلی شرح داده می‌شود. همچنین با توجه به این که ضریب اصطکاک داخلی ذرات پودر تابعی از عوامل متعددی است، برای بررسی کامل این نکته، ضریب اصطکاک داخلی را در بازه‌ای تغییر داده و مقادیر متناظر با هر ضریب اصطکاک ارائه می‌شود. سپس در بخش تحلیل آماری بازه تغییرات چگالی نسبی با دقت 97/5 درصد محاسبه می‌شود.

از دیگر نکات قابل توجه در پژوهش حاضر این است که در قطعات تولیدشده با فرآیند تراکم، توزیع چگالی (اختلاف چگالی قسمت‌های مختلف برای نمونه اختلاف چگالی بالا و پایین قطعه) به اندازه چگالی نهایی مورد توجه قرار می‌گیرد. از این رو توجه به این پدیده و شناخت عوامل تأثیرگذار بر آن می‌تواند گام مهمی در تولید قطعات، باکیفیت بیشتر باشد. در این پژوهش، رابطه‌ای برای توزیع چگالی در راستای طول قطعه ارائه‌شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، عواملی مانند ضریب اصطکاک، ضریب شکل و کار سختی در این رابطه تأثیرگذار است که در ادامه با رسم نمودارهای مورد نیاز، تأثیر هر یک از این عوامل روی توزیع چگالی مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین در این تحقیق، رابطه‌ای برای تخلخل و کاهش آن طی فرآیند تراکم ارائه و عوامل تأثیرگذار بر آن شناسایی می‌شود.

2- بررسی تجربی

2-1- سامانه چکش پرتابه‌ای

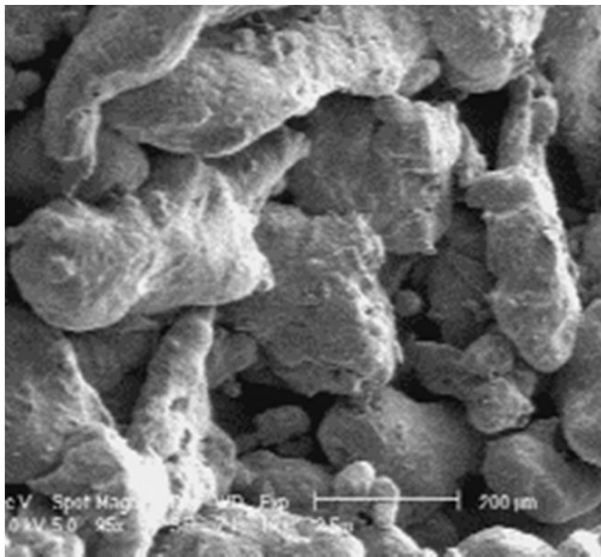
در این تحقیق، انرژی جنبشی مورد نیاز برای فشرده‌سازی پودر از رهاسازی چکش پرتابه‌ای با انرژی مشخص استفاده‌شده که در شکل 1 نمایش داده شده است. با صرف نظر از اصطکاک بخش‌های مختلف سامانه و مقاومت هوا، انرژی پتانسیل ذخیره‌شده تبدیل به انرژی جنبشی چکش می‌شود. از آن جاکه برخورد چکش با پیستون در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد، بارگذاری از نوع ضربه‌ای در نظر گرفته می‌شود. از ویژگی این نوع بارگذاری، درصد تبدیل بالای انرژی جنبشی به انرژی داخلی سیستم است. اجزای مختلف این سامانه و عملکرد آن به تفصیل در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته شده است [8-10].

2-2- روش تجربی

برای انجام آزمایش، از پودر آلومینیوم با اندازه دانه کمتر از 250 میکرون و شکل سوزنی که دارای درصد خلوص 99 درصد است، استفاده‌شده است. شکل‌های 2 و 3، به ترتیب تصاویر پودر آلومینیوم پس و پیش از تراکم را نشان می‌دهد که توسط میکروسکوپ الکترونی تهیه‌شده است.

برای بررسی تأثیر اندازه دانه بر خواص مکانیکی قطعات تولیدشده، ذرات در سه دسته با اندازه دانه‌های 100 تا 200، 150 تا 200 و 150 تا 250 میکرون تقسیم‌بندی شده‌اند.

در روش تجربی برای تولید قطعات حاصل از فرآیند تراکم پودر، 125 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 بالا بردن ارتفاع چکش و افزایش جرم آن، قطعات تحت سطوح



شکل 3 پودر آلومینیوم خالص پس از تراکم



شکل 4 نمونه‌هایی از قطعات تولیدشده از پودر آلومینیوم با فرآیند تراکم پودر

در جداول 1-3، نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر ذرات آلومینیوم گردآوری‌شده است. با توجه به جداول، چگالی نسبی از تقسیم چگالی نهایی قطعه نسبت به چگالی آلومینیوم به‌دست‌آمده است. چگالی آلومینیوم 2700 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته‌شده است [10]. برای محاسبه فشار متوسط واردشده بر سطح بالای قطعه از رابطه (2) استفاده شده است، که P فشار وارد بر پیستون و V میزان تغییرات حجم در

جدول 1 نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر پودر A

پودر A	انرژی (J)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه 1	733	10/25	1725	63/89
نمونه 2	1100	9/53	1855	68/70
نمونه 3	1467	8/90	1987	73/59
نمونه 4	1834	8/63	2050	75/93
نمونه 5	2200	8/19	2160	80
نمونه 6	2568	8/01	2207	81/74
نمونه 7	2920	7/84	2257	83/59
نمونه 8	3580	7/94	2360	87/41

جدول 2 نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر پودر B

پودر B	انرژی (J)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه 1	733	10/25	1726	63/93
نمونه 2	1100	9/45	1871	69/30
نمونه 3	1467	8/82	2006	74/30
نمونه 4	1834	8/41	2102	77/85
نمونه 5	2200	8/10	2184	80/89
نمونه 6	2568	7/85	2252	83/41
نمونه 7	2920	7/58	2333	86/41
نمونه 8	3580	7/16	2471	91/52

انرژی مختلف تولیدشده است. برای خارج کردن نمونه‌های تولیدشده از سیلندر، از جک هیدرولیکی استفاده‌شده است که با واردکردن نیروی یکنواخت سبب سالم ماندن قطعه و همچنین یکنواخت ماندن چگالی می‌شود. همچنین برای سهولت در خارج کردن قطعه از سیلندر، از روان کننده‌ای برای کاهش اصطکاک بین جداره‌ی سیلندر و قطعه‌ی تولیدشده، استفاده‌شده است.

3-2- نتایج آزمایش‌ها

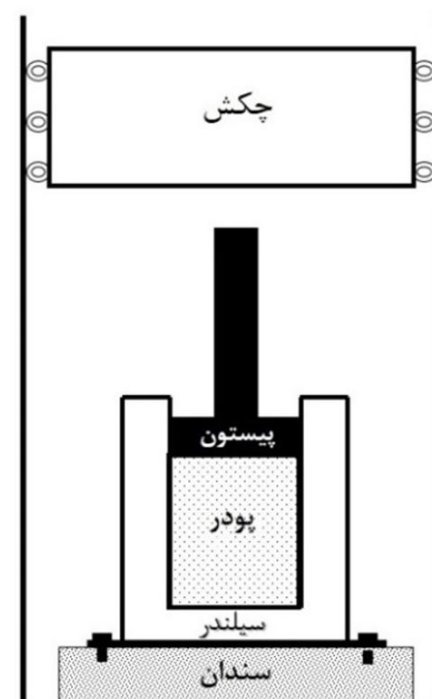
در این بخش، چگالی نهایی قطعات تولیدی و اثر اندازه دانه بر آن، موردبحث و بررسی قرارگرفته است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، میزان تراکم ذره‌ها با انرژی انتقالی از چکش، رابطه مستقیم دارد [10].

مقدار انرژی پتانسیل با صرف‌نظر کردن از اصطکاک از رابطه (1) به‌دست‌آمده است.

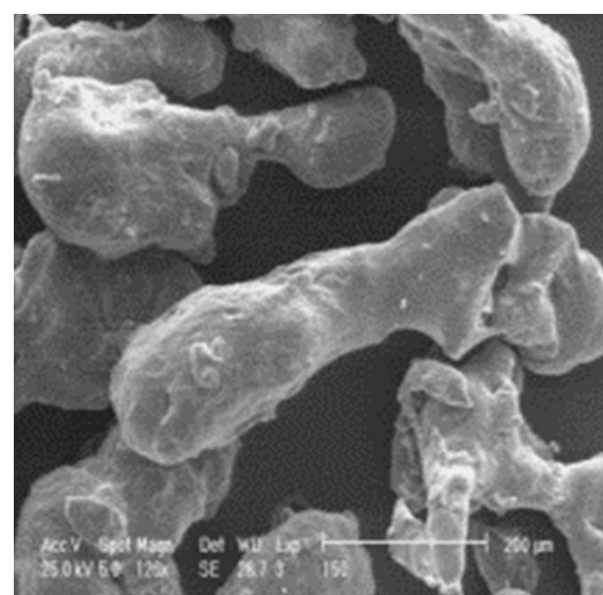
$$E = Mgh \quad (1)$$

که در این معادله M جرم چکش، g شتاب گرانش زمین و h ارتفاع نخستین چکش نسبت به پیستون است.

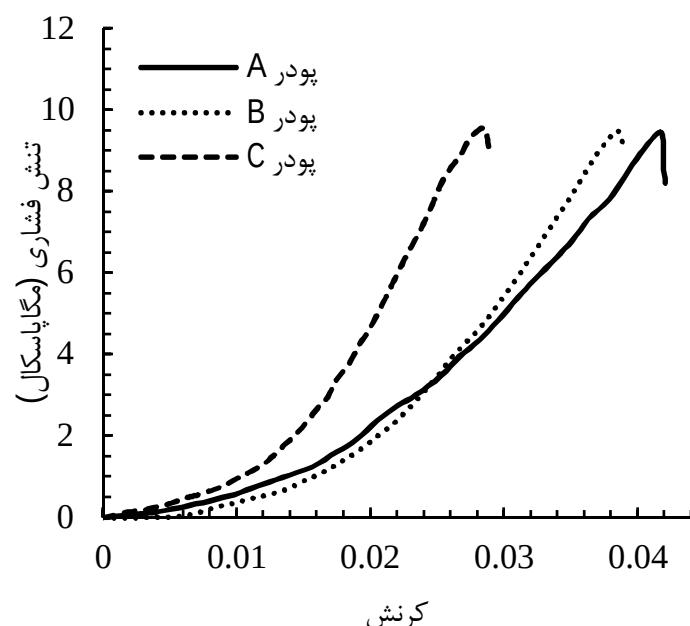
در شکل 4 نمونه‌هایی از قطعات تولیدشده از پودر آلومینیوم تحت بارگذاری ضربه‌ای با سامانه چکش پرتابه‌ای نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش انرژی انتقالی، ارتفاع قطعات کاهش‌یافته و به‌تبع آن چگالی نهایی افزایش‌یافته است.



شکل 1 دستگاه چکش پرتابه‌ای



شکل 2 پودر آلومینیوم خالص پیش از تراکم



شکل 6 آزمون فشار برای سه نمونه از قطعات تولیدشده از پودرهای A، B و C

چندتکه شدن، آرایش مجدد و تغییر شکل متفاوت ذرات، کاری بسیار دشوار است، به‌طوری‌که در بیشتر مراجع، چگالی نهایی قطعه، تابعی از پارامترهای فرآیند معرفی شده است. به‌طورکلی، استخراج این روابط بدون استفاده از آزمایش‌های متعدد تجربی امکان‌پذیر نیست. در این تحقیق، تلاش بر ارائه روابطی است که کمینه نیاز به داده‌های تجربی را داشته باشند. برای این منظور، مطابق با بررسی‌های تجربی، پودر آلومینیوم داخل سیلندر به‌صورت آزاد تحت فشار خارجی از یک طرف در نظر گرفته شده است. در شکل 7، موقعیت یک المان کوچک از قطعه که به فاصله‌ی z از سطح پایین سیلندر قرار دارد، نشان داده شده است. معادله تعادل در راستای محور z و در دستگاه مختصات استوانه‌ای در رابطه (3) مشخص شده است.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0 \quad (3)$$

با فرض این‌که قطعه طی فرآیند تراکم، تقارن محوری خود را حفظ می‌کند، $\sigma_{\theta z} = 0$ است و با حذف جمله مربوط به پیچش معادله تعادل به شکل خلاصه‌شده رابطه (4) تبدیل شده است.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0 \quad (4)$$

با توجه به شکل 7، رابطه تعادل استاتیکی در فرآیند انجام گرفته به‌صورت رابطه (5) بیان شده است.

$$\pi r^2 (\sigma_z + d\sigma_z) - \pi r^2 \sigma_z + 2\pi \mu r \sigma_r dz = 0 \quad (5)$$

که در آن σ_z تنش محوری در فاصله z از سطح پایینی سیلندر، σ_r تنش شعاعی و μ ضریب اصطکاک بین دیواره سیلندر با پودرهای فشرده شده در نظر گرفته شده است، به عبارت دیگر در رابطه (6) داریم.

$$d\sigma_z = -\frac{2\mu \sigma_r dz}{r} \quad (6)$$

با توجه به ثابت بودن شعاع سیلندر و معیار لوی میزز، σ_θ برابر با σ_r است و با استفاده از معیار ون میزز رابطه (7) برای به دست آوردن تنش مؤثر، حاصل شده است.

$$\sigma_r = \sigma_z + \bar{\sigma} \quad (7)$$

رابطه (8) با ترکیب روابط (6) و (7) به دست می‌آید.

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z + \bar{\sigma}} = -\frac{2\mu}{r} dz \quad (8)$$

معادله (9)، به عنوان شرایط مرزی برای حل معادله دیفرانسیل رابطه (8) در نظر گرفته شده است.

$$\sigma_z = P_a \quad (Z = H) \quad (9)$$

جدول 3 نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی پودر C

پودر C	انرژی (J)	ارتفاع قطعه (cm)	چگالی (kg/m ³)	چگالی نسبی (%)
نمونه 1	733	10/21	1732	64/15
نمونه 2	1100	9/44	1873	69/37
نمونه 3	1467	8/47	2089	77/37
نمونه 4	1834	8/08	2189	81/07
نمونه 5	2200	7/88	2243	83/07
نمونه 6	2568	7/67	2307	85/44
نمونه 7	2920	7/27	2431	90/04
نمونه 8	3580	6/89	2568	95/11

طی فرآیند تراکم است.

$$P = \frac{E}{V} \quad (2)$$

در شکل 5، نمودار درصد چگالی نسبی برحسب فشار واردشده بر سطح

پودر رسم شده است.

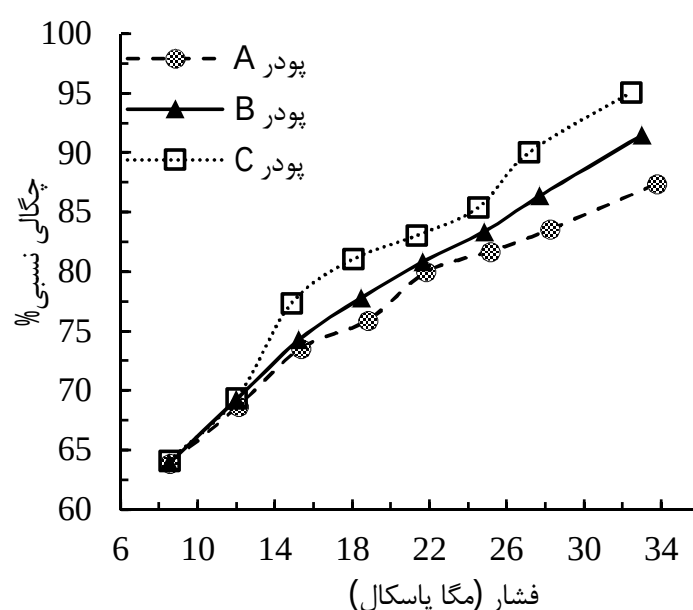
این نمودار نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین اندازه ذرات و چگالی نسبی نهایی قطعات تولیدشده است. به‌طوری‌که قطعات تولیدشده از پودر A کمترین و پودر C بیشترین مقدار چگالی را دارند. با توجه به شکل 5 مشخص است که در فشارهای بالا تأثیر اندازه دانه بر مقدار چگالی نهایی قطعه بیشتر بوده به‌طوری‌که در فشارهای پایین، قطعات تولیدشده با این سه نوع پودر، چگالی نسبی نهایی نزدیک به هم دارند و با افزایش فشار، این اختلاف افزایش می‌یابد.

برای به دست آوردن تنش تسلیم فشاری قطعات تولیدشده، از آزمون فشار استفاده شده است که در شکل 6، نمودار این آزمون برای تعدادی از این قطعات نمایش داده شده است. لازم به یاد است که تمیز بودن سطح مقطع قطعات انتخابی، هم‌دما بودن محیط انجام آزمایش با محیط تولید قطعات و همچنین کالیبره بودن سامانه آزمون فشار، در به دست آوردن نتایج بهتر، نقش مؤثری دارد.

در نمودار مربوط به آزمون فشار اثر اندازه دانه بر میزان تردی یا نرمی قطعه تولیدشده کاملاً مشهود است. از آن‌جا که قطعه مربوط به نمونه C در کرنش کمتری نسبت به دو نمونه دیگر به تسلیم می‌رسد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش اندازه دانه منجر به افزایش تردی قطعه تولیدی شده است.

3- حل تحلیلی

استخراج روابط ریاضی برای رفتار مکانیکی مواد متخلخل به دلیل شکست و



شکل 5 نمودار چگالی نسبی قطعات تولیدشده برحسب فشار

از رابطه (19) قابل محاسبه است که در این رابطه λ به عنوان ضریب شکل در نظر گرفته شده است.

$$\bar{\sigma} = \lambda^{-1} \sigma_{yc} \left(\frac{1 + \mu}{1 - \mu} \right) \quad (19)$$

با در نظر گرفتن اثر کار سختی طی فرآیند تراکم رابطه (17) به صورت معادله (20) نوشته می‌شود.

$$\rho_g = \rho_p + \rho_c^n \quad (20)$$

فضای خالی موجود در قطعه با تعریف پارامتر U به عنوان تخلخل در نظر گرفته شده که از رابطه (21) قابل محاسبه است.

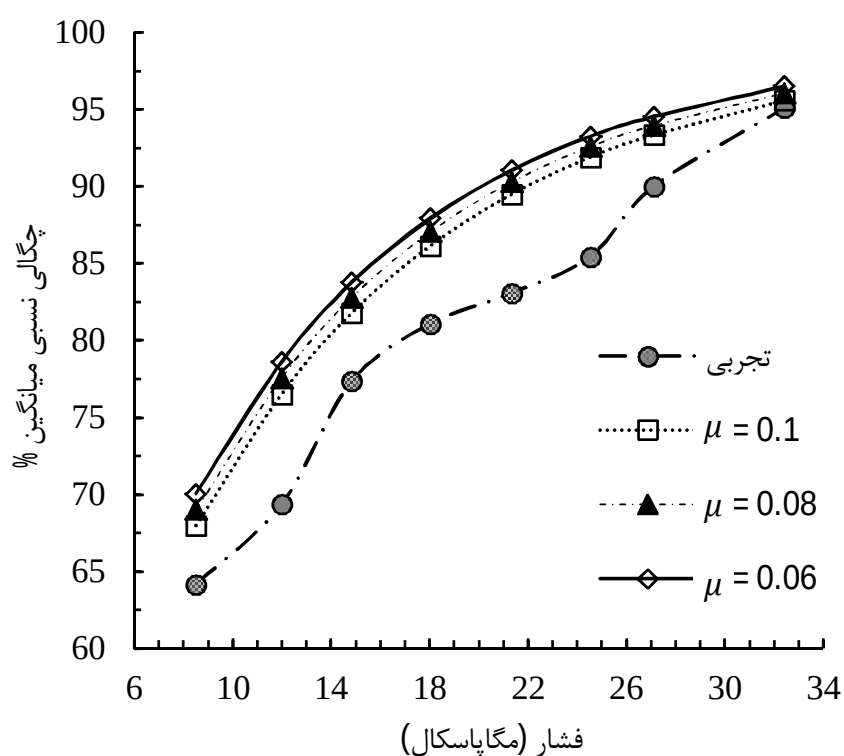
$$U = \frac{\rho_t - \rho_g}{\rho_t} \quad (21)$$

4- بحث و نتایج

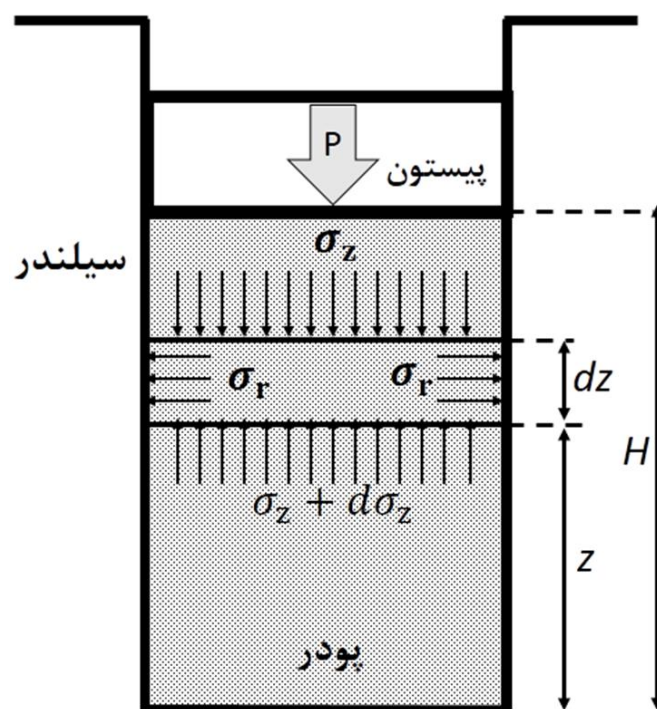
برای بررسی نمودارهای حاصل از حل تحلیلی، با توجه به این که ضریب اصطکاک تابع عوامل فیزیکی متعددی مانند روغن کاری، نحوه ترکیب شدن پودرها و چیدمان اتفاقی پودرها در کنار هم است، نمی‌توان مقدار مشخصی به آن نسبت داد؛ بنابراین چگالی نسبی برای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک محاسبه شده است.

در شکل 8، نمودار چگالی نسبی بر حسب فشار برای هشت نمونه آزمایشی پودر C در ضریب اصطکاک‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از نکات قابل توجه در این شکل، اختلاف بین داده‌های تجربی و تحلیلی است که بر اثر عوامل متعددی مانند اثر پدیده بازگشت فنری به وجود می‌آید. این پدیده در هنگام برگشت چکش، با برداشته شدن بار از روی قطعه رخ می‌دهد که نتیجه آن افزایش اندک ارتفاع قطعه است. شایان یاد است که این افزایش ارتفاع سبب کاهش چگالی شده است. با توجه به شکل 8، به دلیل آن که پس از برداشته شدن بار، قطعه مقاومت بیشتری در برابر تغییر ارتفاع نشان داده؛ بنابراین با افزایش ضریب اصطکاک، پدیده بازگشت فنری کاهش یافته است که نزدیک‌تر شدن نتایج تحلیلی و تجربی به یکدیگر این مطلب را تصدیق می‌کند. با بررسی بیشتر داده‌های حاصل از حل تحلیلی مشخص است که با افزایش اندازه دانه مقدار بازگشت فنری کمتر شده است.

در شکل‌های 9، 10 و 11، چگالی نسبی قطعات تولید شده به صورت



شکل 8 مقایسه چگالی نسبی میانگین حاصل از حل تحلیلی با نتایج تجربی برای پودر C



شکل 7 نمایش شماتیکی فرایند تراکم

که در آن P_a فشار خارجی اعمال شده از سوی پیستون به سطح قطعه و H ارتفاع قطعه در هر لحظه است. با حل معادله دیفرانسیل و جای گذاری شرایط مرزی بالا، رابطه شماره (10) به دست آمده است.

$$\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}} = \left[1 + \frac{P_a}{\bar{\sigma}} \right] \left[\exp \left\{ \frac{2\mu(H-Z)}{r} \right\} \right] - 1 \quad (10)$$

برای وارد کردن عبارت مربوط به چگالی به معادله (10) از مفهوم کرنش در معادله (11) استفاده شده است.

$$d\bar{\epsilon} = -\frac{dH}{H} \quad (11)$$

با توجه به قانون بقای جرم رابطه (12) نتیجه می‌شود.

$$\frac{dH}{H} = -\frac{d\rho}{\rho_t} \quad (12)$$

رابطه تنش و کرنش به صورت معادله (13) پیشنهاد شده است و β از معادله (14) استخراج می‌شود [11].

$$d\bar{\epsilon}_z = \beta \left[\exp \left\{ -\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}} \right\} \right] d\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\rho_t - \rho_p}{\rho_t} \quad (14)$$

که β ضریب چگالی، ρ_t چگالی آلومینیوم خالص و ρ_p چگالی نخستین پودر آلومینیوم ریخته شده در ظرف است. با انتگرال گیری از رابطه (13) که به صورت رابطه (15) بیان می‌شود، چگالی نهایی قطعه (ρ_g) در هر لحظه از فرآیند تراکم براساس رابطه (16) مشخص می‌شود.

$$\int_{\rho_p}^{\rho_g} \frac{d\rho}{\rho_t} = \int_0^{\sigma_z} \frac{\beta}{\bar{\sigma}} \exp \left(-\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}} \right) d\sigma_z \quad (15)$$

$$\rho_g = \rho_p + (\rho_t - \rho_p) \left(1 - \exp \left[-\frac{\sigma_z}{\bar{\sigma}} \right] \right) \quad (16)$$

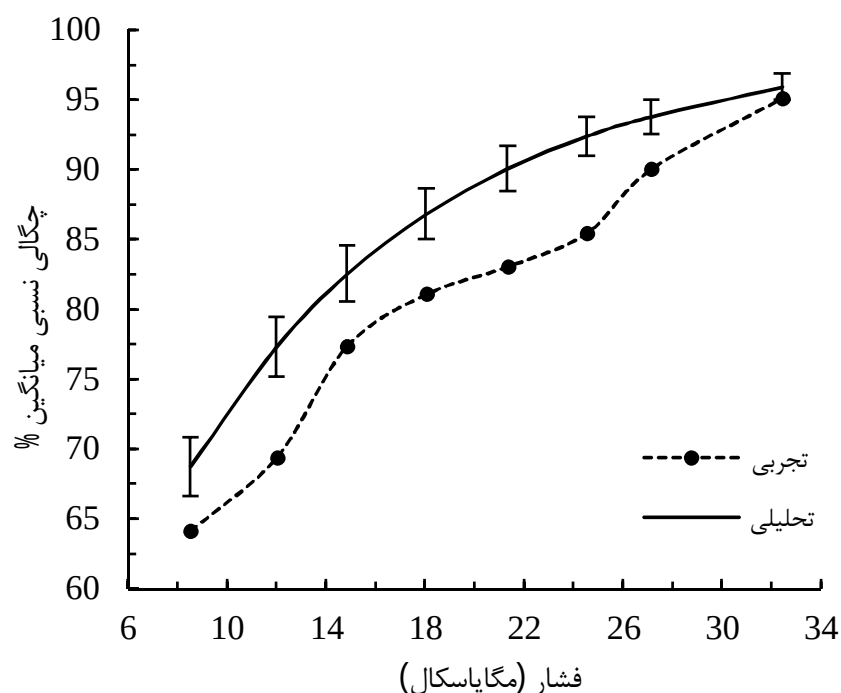
با توجه به رابطه 16، چگالی نهایی از حاصل جمع چگالی نخستین پودر و مقداری که طی فرآیند فشرده سازی به آن افزوده می‌شود، به دست می‌آید که در رابطه (17) مشخص است.

$$\rho_g = \rho_p + \rho_c \quad (17)$$

این چگالی افزوده شده با ρ_c مشخص شده است. با مقایسه رابطه‌های (16) و (17)، و استفاده از رابطه (10)، رابطه (18) به دست می‌آید.

$$\rho_c = (\rho_t - \rho_p) \left[1 - \exp \left\{ - \left(1 + \frac{P_a}{\bar{\sigma}} \right) \exp \left(\frac{2\mu(H-Z)}{r} \right) \right\} \right] \quad (18)$$

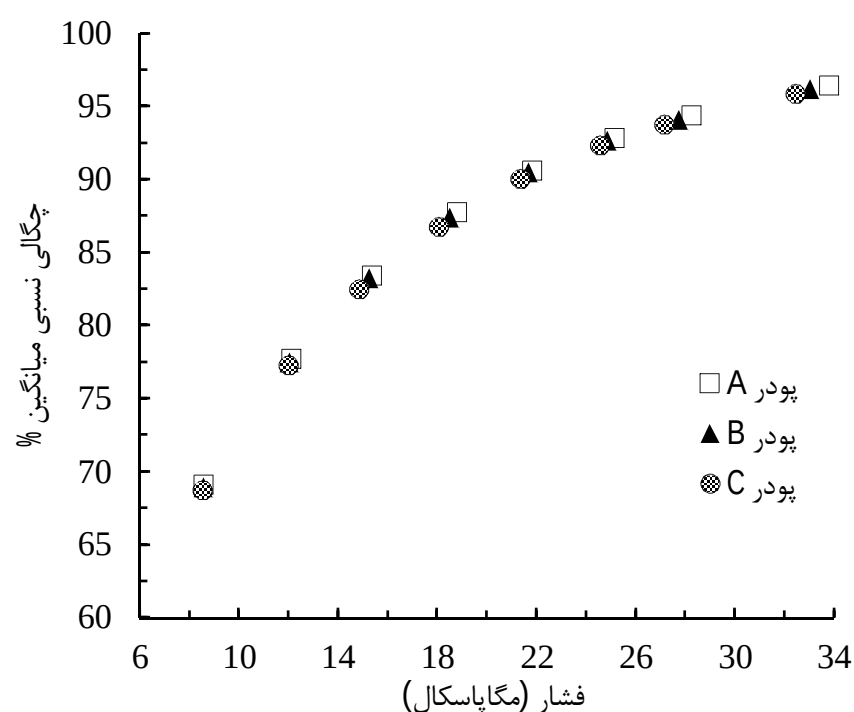
با به دست آوردن σ_{yc} از آزمون فشار، تنش مؤثر طبق معیار کولمب-مور



شکل 11 مقایسه چگالی نسبی میانگین برحسب فشار اعمالی برای پودر C ($n = 1, \lambda = 1$)

در شکل 12، به‌منظور بررسی اثر ضریب اصطکاک و اندازه دانه روی چگالی نسبی، نمودار چگالی نسبی میانگین برحسب فشار اعمالی، برای هر سه نمونه پودر رسم شده است. انطباق تقریبی نمودار چگالی نسبی میانگین برای اندازه دانه‌های مختلف با یکدیگر نشان‌دهنده این است که با تغییر اندازه دانه، چگالی نسبی میانگین تغییر نسبتاً کمی دارد، در صورتی‌که این کمیت با تغییر ضریب اصطکاک، تغییرات ملموس‌تری کرده است. بدین معنا که تأثیرپذیری چگالی نسبی از ضریب اصطکاک بسیار بیشتر از تأثیرپذیری آن از اندازه دانه است.

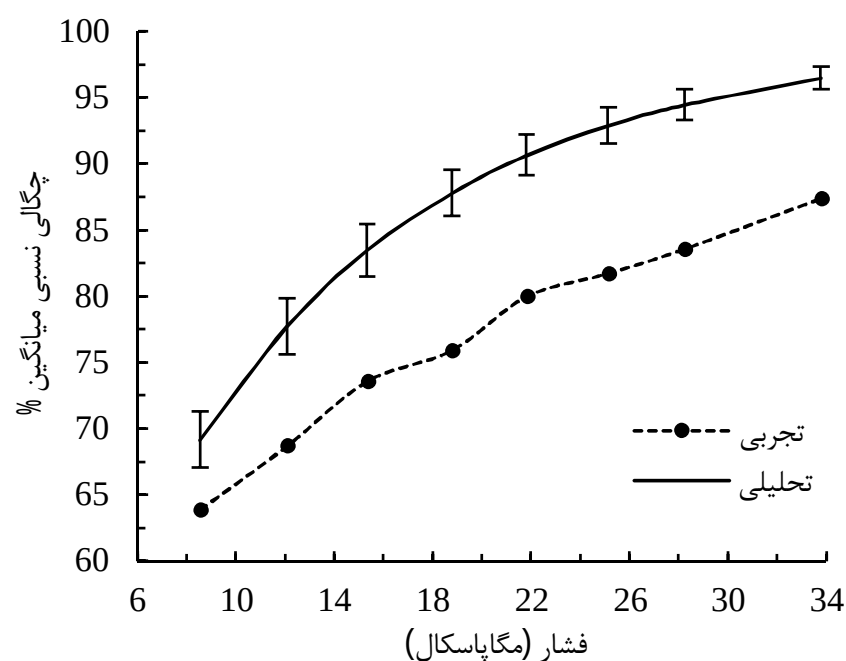
با توجه به تعاریف ارائه‌شده برای کار سختی و درصد تخلخل در بخش تحلیلی، در شکل‌های (13-15)، تأثیر کار سختی بر درصد تخلخل قطعات تولیدشده از پودرهای A، B و C موردبررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای رسم شده، با افزایش کار سختی، درصد تخلخل به‌دست‌آمده از روابط تحلیلی به نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است. همچنین از مقایسه این سه نمودار می‌توان دریافت که افزایش اندازه ذرات پودر تأثیر مستقیمی برافزایش کار سختی دارد. بدین‌معنا که فراوانی حفره‌های موجود در قطعات تولیدشده وابسته به‌اندازه پودر است. با رجوع به نمودار شکل 5، قطعات تولیدشده از پودر A که کوچک‌ترین اندازه دانه را نسبت به پودرهای B و C



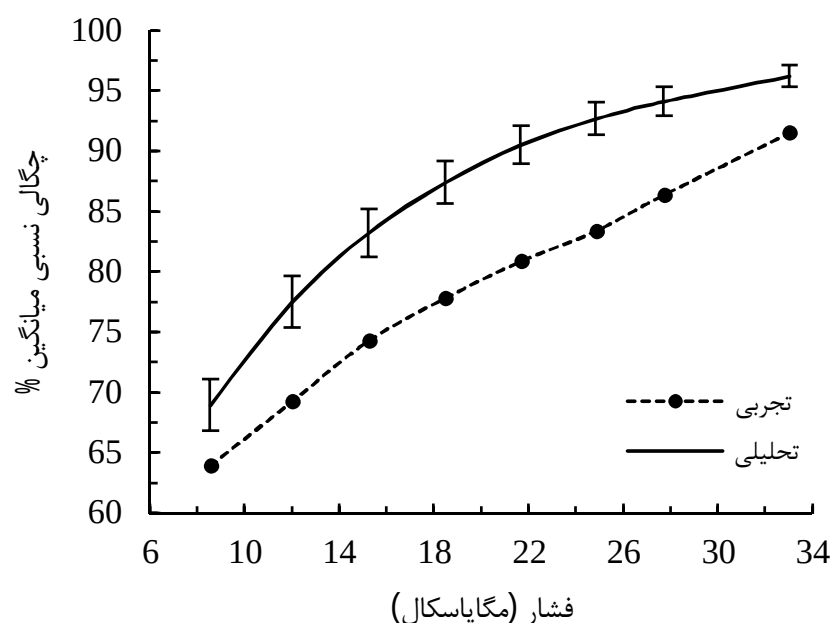
شکل 12 چگالی نسبی میانگین برحسب فشار اعمالی برای پودرهای A، B و C

میانگین چگالی‌های نسبی متناظر با ضریب اصطکاک‌های مختلف حاصل از حل تحلیلی، برحسب فشار نشان داده‌شده و با مقادیر تجربی آن مقایسه شده است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد برای ضریب اصطکاک نمی‌توان مقدار مشخصی در نظر گرفت و این ضریب در قالب بازه‌ای در نظر گرفته می‌شود. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن مقادیر منفی خطا، کران بالای بازه ضریب اصطکاک 0/11 و برای رسیدن ضریب تبیین به مقدار مطلوب بیش از 0/96، کران پایین ضریب اصطکاک 0/06 در نظر گرفته‌شده است. بازه خطایی که در نمودارها مشخص شده است حاصل تحلیل آماری بوده که در آن اگر به ضریب اصطکاک مقادیری بین 0/06 تا 0/11 نسبت داده شود، با احتمال 97/5 درصد چگالی نسبی در این بازه قرار خواهد گرفت. در واقع این بازه، بازه تغییرات چگالی نسبی ناشی از تغییرات ضریب اصطکاک است.

نکته حائز اهمیت در بررسی اشکال 9-11 این است که اثر ضریب اصطکاک بر چگالی نهایی قطعات در فشارهای پایین در مقایسه با فشارهای بالا، بیشتر است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش فشار می‌توان اثر ضریب اصطکاک را تقلیل داد. با توجه به نمودارهای یادشده با افزایش فشار، طول بازه تغییرات چگالی، که روی نمودار مشخص است در حال کاهش است که کاهش طول آن‌ها با افزایش فشار نمایانگر کاهش اثر تغییرات ضریب اصطکاک روی چگالی نهایی قطعه است و همچنین با افزایش اندازه دانه، میزان تطابق نتایج حاصل از حل تحلیلی با نتایج تجربی بهبودیافته است.



شکل 9 مقایسه چگالی نسبی میانگین برحسب فشار اعمالی برای پودر A ($n = 1, \lambda = 1$)

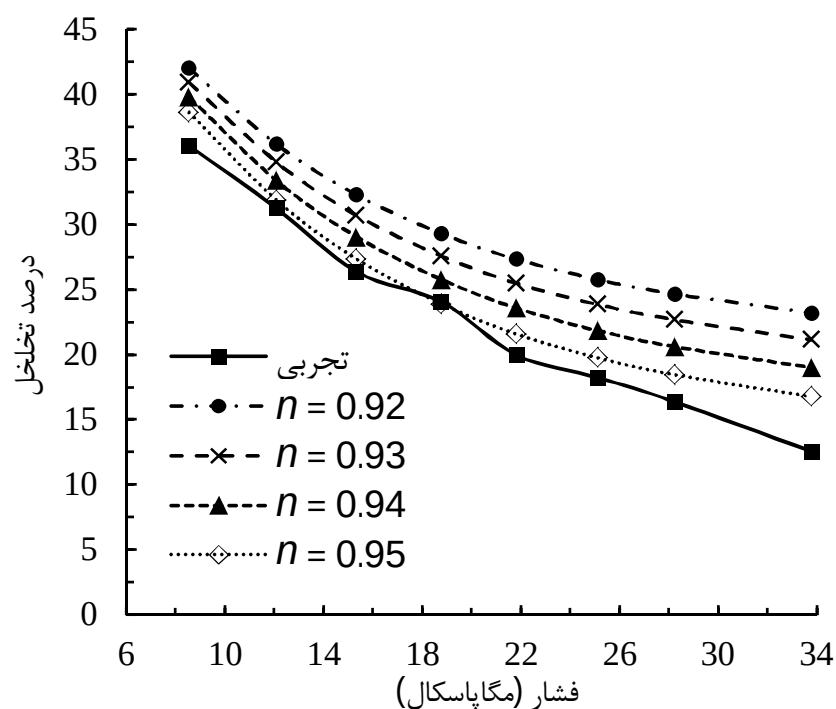


شکل 10 مقایسه چگالی نسبی میانگین برحسب فشار اعمالی برای پودر B ($n = 1, \lambda = 1$)

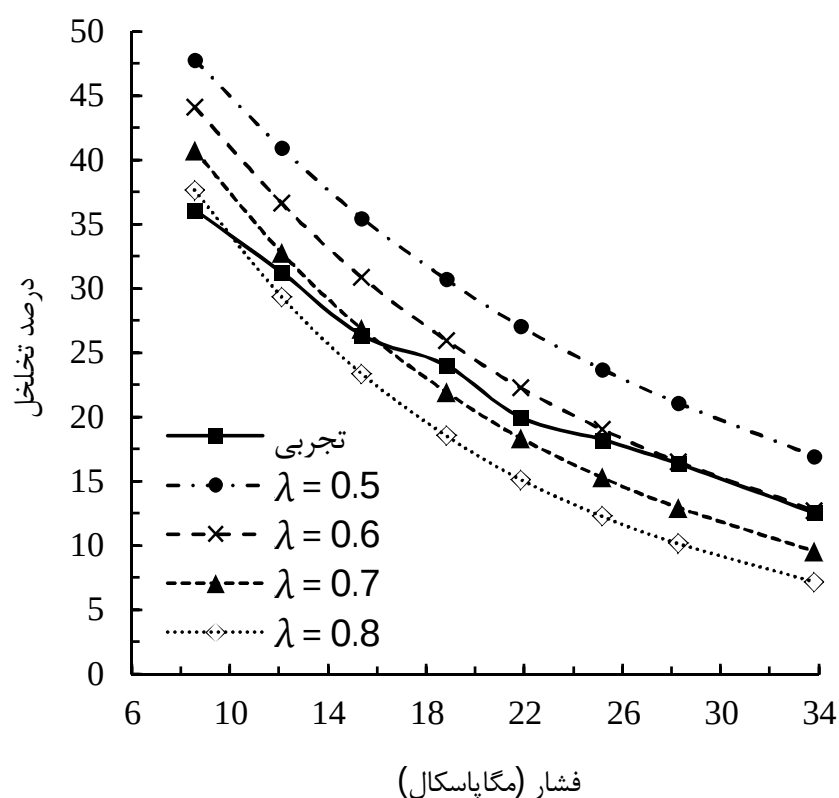
دارند، در شرایط یکسان تراکم، چگالی نهایی کمتر و در نتیجه تخلخل بیشتری دارند.

ذرات پودری که در فرآیند تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرند، شکل‌های هندسی متفاوتی دارند. به این منظور ضریبی به عنوان ضریب شکل برای پودرها تعریف می‌شود. این ضریب به صورت عددی ثابت در رابطه تنش مؤثر ظاهر شده و بر چگالی نسبی نهایی و به تبع آن بر تخلخل قطعه تولید شده تأثیر می‌گذارد. در شکل‌های (16-18)، تأثیر ضریب شکل بر تخلخل نهایی قطعات تولید شده از پودرهای A، B و C بررسی شده است.

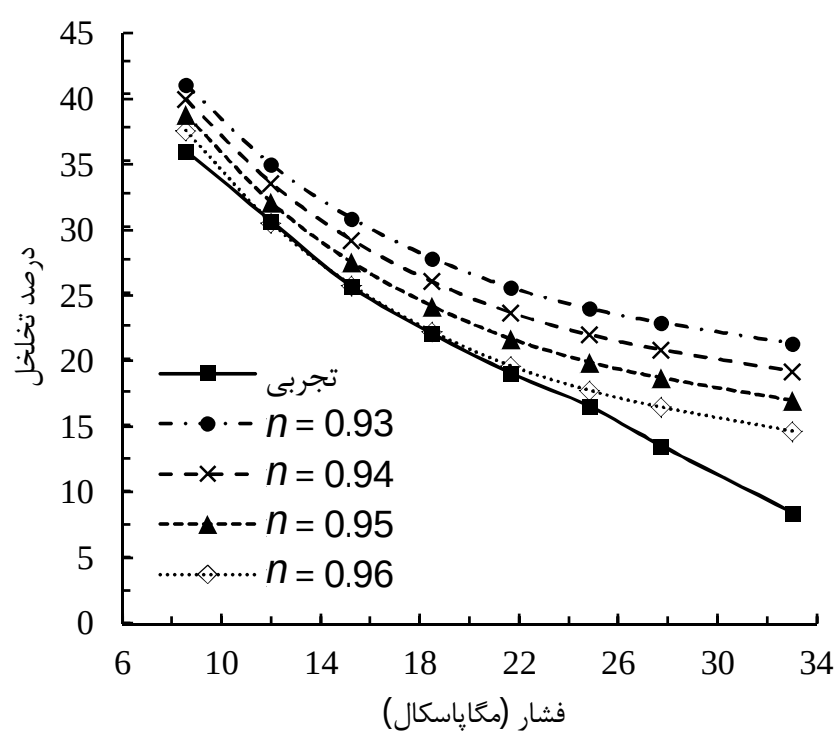
با بررسی شکل‌های (16-18)، می‌توان بهترین ضریب شکل برای هر نوع پودر را در یک کار سختی و ضریب اصطکاک مشخص به دست آورد. مقدار تقریبی این ضریب برای پودر A، 0/6، برای پودر B، 0/7 و برای پودر C، 0/8 است. با توجه به اشکال ارائه شده مشخص است که با افزایش ضریب شکل درصد تخلخل کاهش یافته و به تبع آن چگالی قطعه زیاد شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، برای پیش‌بینی دقیق‌تر تخلخل قطعات تولید شده، با



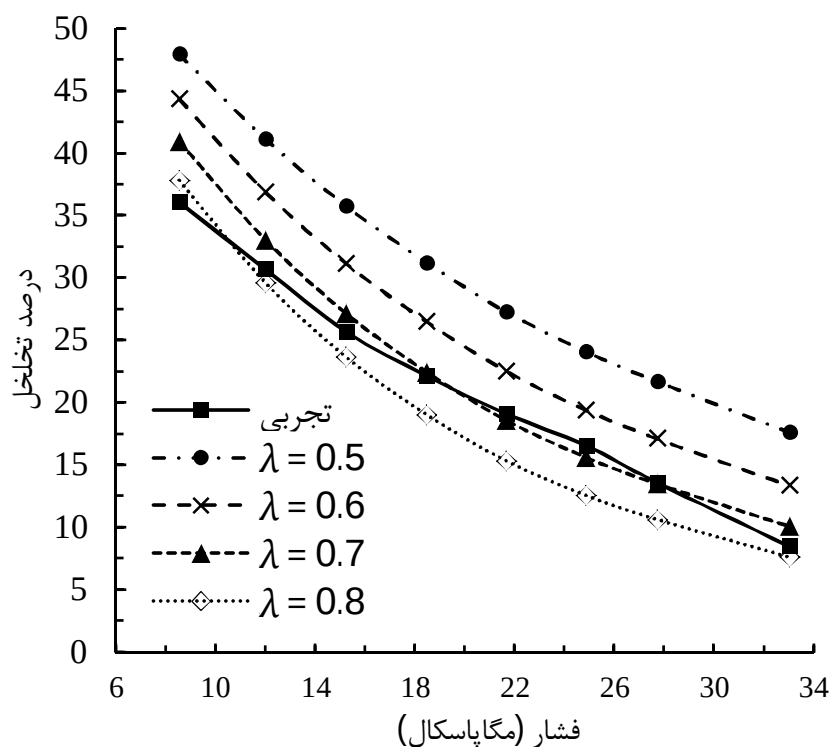
شکل 13 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه بر حسب فشار اعمالی برای پودر A به‌ازای کار سختی‌های مختلف



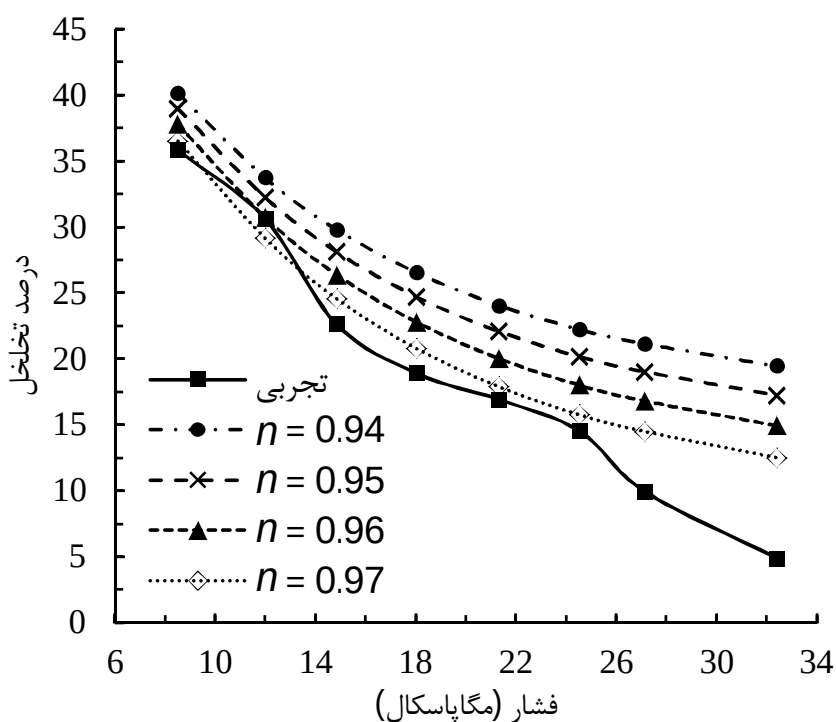
شکل 16 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه بر حسب فشار اعمالی برای پودر A به‌ازای ضریب شکل‌های مختلف



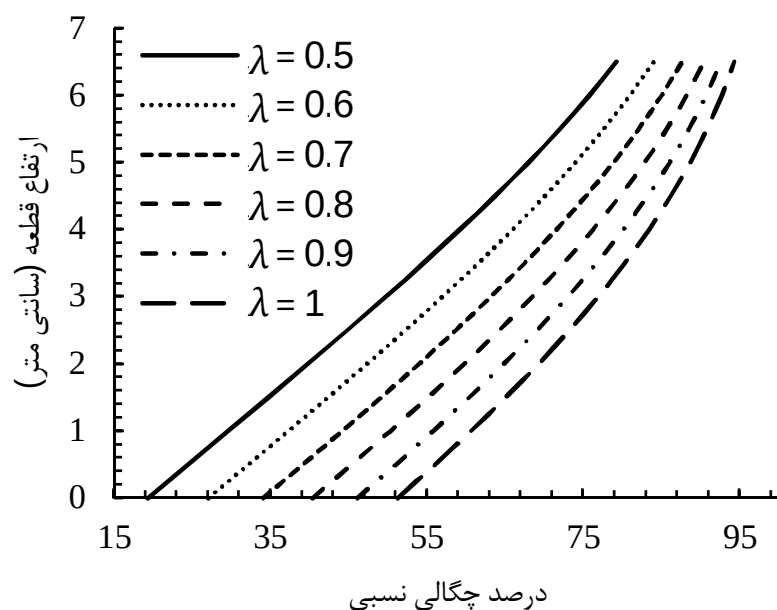
شکل 14 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه بر حسب فشار اعمالی برای پودر B به‌ازای کار سختی‌های مختلف



شکل 17 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه بر حسب فشار اعمالی برای پودر B به‌ازای ضریب شکل‌های مختلف



شکل 15 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه بر حسب فشار اعمالی برای پودر C به‌ازای کار سختی‌های مختلف



شکل 20 چگالی نسبی نهایی حاصل از حل تحلیلی در راستای طول قطعه به‌ازای ضریب شکل‌های مختلف برای پودر C

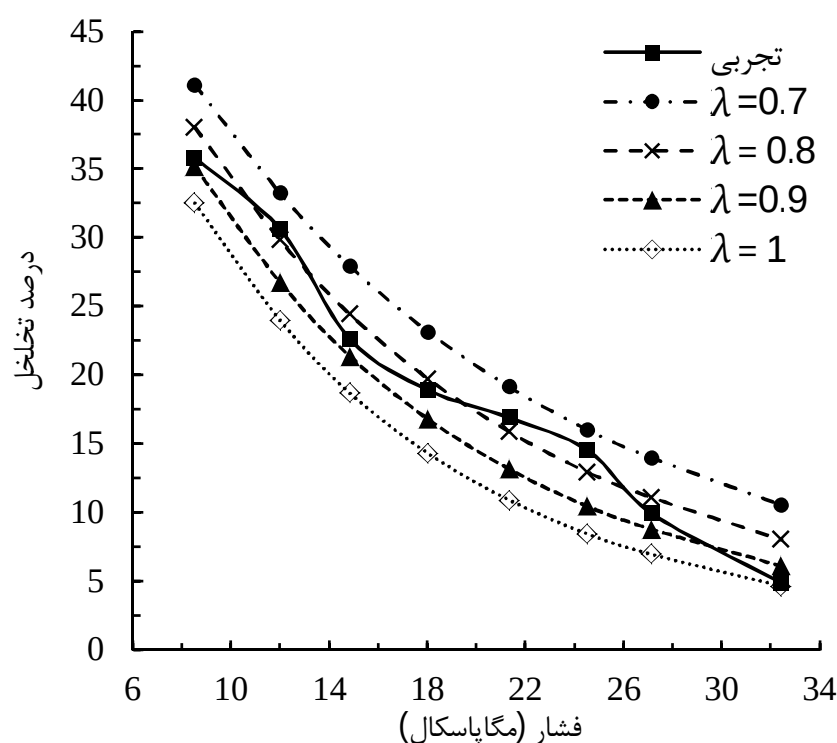
تحلیلی پرداخته شد. بررسی‌های تجربی با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای و به‌تبع آن با رهاسازی چکش از ارتفاع‌های مختلف انجام شد. از نمودارهای ارائه‌شده در بخش تجربی می‌توان دریافت که با افزایش توأمان اندازه دانه و سطح انرژی، قطعه نهایی به تراکم نسبی بالاتری می‌رسد. همچنین با بهره‌گیری از آزمون فشار مشخص شد که اندازه دانه با میزان تردی قطعه رابطه مستقیمی دارد بدین معنا که با افزایش اندازه دانه، قطعه در کرنش کمتری به تسلیم می‌رسد.

در بخش تحلیلی، با به‌کارگیری عوامل مؤثر بر فرآیند تراکم پودر به‌صورت ضریبی ثابت در معادلات، رابطه‌ای برای چگالی نهایی قطعه و درصد تخلخل ارائه شد.

در بررسی عوامل مؤثر بر فرآیند، اثر ضریب اصطکاک به‌عنوان نخستین عامل تأثیرگذار مشخص کرد که اثر این کمیت بر چگالی نهایی قطعات در فشارهای پایین در مقایسه با فشارهای بالا، بیشتر است و همچنین با افزایش اندازه دانه، نتایج تجربی و تحلیلی تطابق بهتری دارند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده رابطه مستقیم اندازه دانه و کار سختی را نشان داد که به‌تبع آن با افزایش کار سختی، اختلاف بین نتایج تحلیلی و تجربی تقلیل یافت. نمودارهای ارائه‌شده در بررسی اثر ضریب شکل بر تخلخل نشان‌دهنده رابطه عکس بین ضریب شکل و درصد تخلخل است.

با توجه به اهمیت بالای یکنواختی توزیع خواص مکانیکی در تمام پیکره قطعه، چگونگی تأثیرگذاری ضریب شکل و ضریب اصطکاک بر نحوه توزیع چگالی در امتداد طولی قطعه به‌صورت مبسوط موردبررسی قرار گرفت و نشان داده شد که کاهش ضریب اصطکاک، به بهبود یکنواختی چگالی کمک می‌کند. این در حالی است که با تغییر دادن ضریب شکل، یکنواختی چگالی، تغییرات ملموسی را تجربه نمی‌کند. یکی از کاستی‌های نمودارهای ارائه‌شده این است که تنها چگالی نهایی را موردبحث قرار داده و با توجه به آن نمی‌توان مقاومت قطعه تولیدی را در برابر بارهای خمشی یا ضربه‌های احتمالی پیش‌بینی کرد.

استفاده از روش شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین و دستیابی به نتایجی نظیر شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا با توجه به کاهش هزینه‌های تولید و ساده‌تر شدن فرآیند از نوآوری‌های پژوهش حاضر در بخش تجربی است. همچنین استفاده از نیروی گرانشی زمین در مقایسه با جک هیدرولیکی که مصرف انرژی الکتریکی و خرابی احتمالی قطعات تشکیل‌دهنده را در پی دارد، از دیگر نوآوری‌های این بخش است. از نوآوری‌های بخش تحلیلی می‌توان به



شکل 18 مقایسه درصد تخلخل نهایی قطعه برحسب فشار اعمالی برای پودر C به‌ازای ضریب شکل‌های مختلف

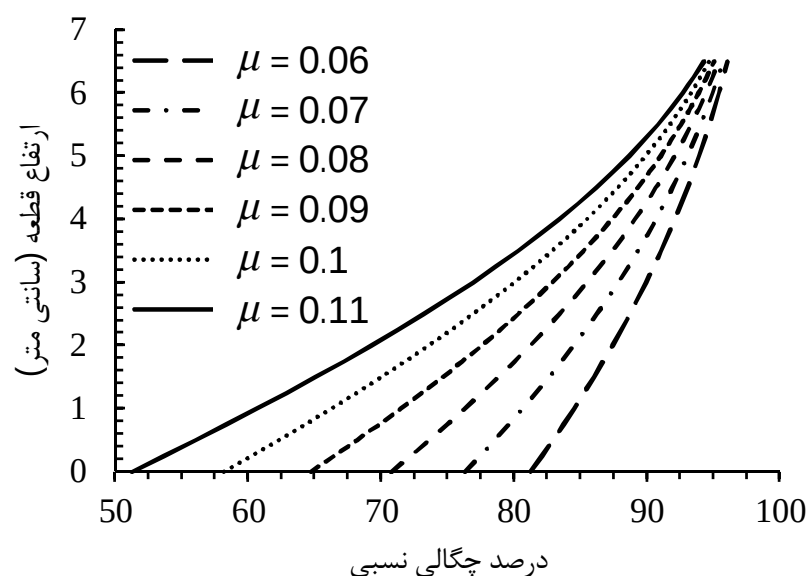
توجه به‌اندازه ذرات باید از پودری استفاده شود که ضریب شکل مطلوب را داراست. برای نمونه برای نمونه C ضریب شکل مطلوب 0/8 است.

یکنواخت بودن خواص مکانیکی در پیکره قطعات تولیدشده همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اهداف بخش تولید مطرح بوده است. به این منظور در این قسمت به بررسی توزیع چگالی در امتداد طولی قطعه پرداخته‌شده است. در شکل‌های 19 و 20 تأثیر ضریب اصطکاک و ضریب شکل روی توزیع چگالی در راستای طولی قطعه نشان داده‌شده است.

از شکل 19 مشخص است که افزایش ضریب اصطکاک، اختلاف چگالی بالا و پایین قطعه را افزایش داده است. در بیان دلیل این پدیده می‌توان به مفهوم نیروهای اصطکاکی اشاره کرد که با افزایش ضریب اصطکاک، نیروهای اصطکاکی افزایش‌یافته و به لایه‌های پایینی پودر نیروی کمتری وارد می‌شود که این امر موجب کاهش چگالی در لایه‌های پایینی قطعه می‌شود. همچنین شیب‌های یکسان در نمودار شکل 20، نشان‌دهنده این است که ضریب شکل در اختلاف چگالی بالا و پایین قطعه تأثیر چندانی ندارد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی اثر اندازه دانه و سطح انرژی بر چگالی نهایی قطعات تولیدی به روش تراکم پودر، تحت بارگذاری ضربه‌ای به‌صورت تجربی و



شکل 19 توزیع چگالی نسبی نهایی حاصل از حل تحلیلی در راستای طول قطعه به‌ازای ضریب اصطکاک‌های مختلف برای پودر C

اولیه	p	تولید قطعات براساس مقادیر بهینه عوامل مؤثر بر فرآیند نظیر اندازه دانه،
شعاعی	r	ضریب اصطکاک، ضریب شکل و کار سختی با توجه به تعریف ویژگی‌های
خالص	t	موردنظر مانند چگالی، تخلخل، یکنواختی خواص مکانیکی و تردی برای
راستای ارتفاع	z	آن‌ها، اشاره کرد.

شعاعی	r
برشی	rz
محیطی	θ
برشی	θ_z

7- مراجع

- [1] H. A. AL-Qureshi, A. Galiotto, A. N. Klein, On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 1, pp. 135-143, 2005.
- [2] Zh. Yan, F. Chen, Y. Cai, High-velocity compaction of titanium powder and process characterization, *Powder Technology*, Vol. 208, No. 3, pp. 596-599, 2011.
- [3] S. Berg, P. Jonsén, H. Å. Häggblad, Experimental characterisation of CaCO₃ powder mix for high-pressure compaction modelling, *Powder Technology*, Vol. 203, No. 2, pp. 198-205, 2010.
- [4] S. Berg, P. Jonsén, H. Å. Häggblad, Experimental characterization of CaCO₃ powder for use in compressible gaskets up to ultra-high pressure, *Powder Technology*, Vol. 215, pp. 124-131, 2012.
- [5] S. Berg, P. Jonsén, H. Å. Häggblad, Frictional behaviour of CaCO₃ powder compacts, *Powder Technology*, Vol. 228, pp. 429-434, 2012.
- [6] M. Shoaib, L. Kari, B. Azhdar, Simulation of high-velocity compaction process with relaxation assists using the discrete element method, *Powder Technology*, Vol. 217, pp. 394-400, 2012.
- [7] K. M. J. Kadhim, A. A. Alwan, I. J. Abed, Simulation of cold die compaction Alumina powder, *STM journals*, Vol 1, No. 1, pp.1-21, 2011.
- [8] H. Babaei, A. Darvizeh, M. Alitavoli, T. Mirzababaie Mostofi, Experimental and Analytical Investigation into Plastic Deformation of Circular Plates Subjected to Hydrodynamic Loading, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 305-312, 2015. (In Persian).
- [9] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Experimental Study and Analytical Modeling for Inelastic Response of Rectangular Plates under Hydrodynamic Loads, *Journal of Modares Mechanical Engineering*. Vol. 15, No. 4, pp. 361-368, 2015. (In Persian).
- [10] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Mojtaba Namdari, Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading, *Journal of Modares Mechanical Engineering*. Vol. 15, No. 5, pp. 357-366, 2015. (In Persian).
- [11] H.A. Al-Qureshi, M.R.F. Soares, D. Hotza, M.C. Alves, A.N. Klein, Analyses of the fundamental parameters of cold die compaction of powder metallurgy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 417-424, 2008.

6- فهرست علائم

E	انرژی پتانسیل ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)
g	شتاب گرانش زمین (ms^{-2})
h	ارتفاع چکش (m)
H	ارتفاع قطعه در هر لحظه (m)
M	جرم چکش (kg)
n	کار سختی
P	فشار وارد بر پیستون ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
r	شعاع قطعه (m)
U	تخلخل
V	میزان تغییرات حجم (m^3)
Z	ارتفاع از سطح پایینی قطعه (m)

علائم یونانی

β	ضریب چگالی
ε	کرنش مؤثر
λ	ضریب شکل
μ	ضریب اصطکاک
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	تنش ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

بالا نویس‌ها

—	مؤثر
---	------

زیر نویس‌ها

a	سطح بالایی قطعه
c	افزایش یافته
g	نهایی