



## بررسی تجربی و مدل‌سازی عددی فرایند تراکم دینامیکی پودر آهن خالص و مخلوط پودر آهن با ذرات سرامیک

نصیر نمازی<sup>1</sup>، مجید علی طاوولی<sup>2\*</sup>، ابوالفضل درویزه<sup>3</sup>، هاشم بابایی<sup>4</sup>، فرید عبدلی کمالی<sup>5</sup>، رضا رجبیه فرد<sup>1</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد بندر انزلی

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

5- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی احرار رشت

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

### چکیده

### کلیدواژگان

مقاله حاضر به بررسی تجربی و مدل‌سازی عددی اثر بارگذاری دینامیکی بر چگالی، استحکام و ریزساختار قطعات خالص و مرکب تولیدشده از پودر آهن می‌پردازد. آزمون‌های تجربی بر روی پودرها توسط سامانه چکش پرتابه‌ای انجام شده است. به‌منظور ارزیابی استحکام قطعات تولیدی، از آزمون فشار قطری استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی اثر بارگذاری ضربه‌ای بر ریزساختار قطعات متراکم شده، تصاویر متعددی از ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی تهیه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش فشار تراکم، چگالی و استحکام قطعات خالص در سه محدوده فشارهای پایین، متوسط و بالا با نرخ‌های متفاوت، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از تراکم پودر مرکب آهن و سرامیک با درصدهای وزنی متفاوت نشان می‌دهد که افزودن بیش از 5 درصد وزنی پودر سرامیک، چگالی قطعات مرکب حاصل را به‌شدت کاهش می‌دهد. بررسی تصاویر حاصل از ریزساختار قطعات، نشان می‌دهد در روش تراکم دینامیکی، عبور امواج تنش فشاری از میان ستون پودر، باعث تغییر شکل پلاستیک آن‌ها و ایجاد اتصال بین ذره‌ای از نوع قفل‌شدگی مکانیکی در یک ساختار کاملاً یکنواخت می‌گردد. علاوه بر این، با استفاده از روش تحلیل ابعادی و الگوریتم ژنتیک، یک رابطه ریاضی جهت پیش‌بینی چگالی قطعات خالص تولیدشده ارائه گردیده است. در این روش پس از تشکیل اعداد بدون بعد بر مبنای روش تحلیل ابعادی، این اعداد به‌عنوان ورودی روش الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط این رابطه با مقادیر تجربی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این مدل، از انطباق بسیار مناسبی با نتایج تجربی برخوردار هستند.

تراکم دینامیکی پودر  
پودر آهن  
چکش پرتابه‌ای  
بارگذاری ضربه‌ای  
الگوریتم ژنتیک

## Experimental investigation and numerical modelling of dynamic compaction process of pure iron powder with ceramic particles

Nasir Namazi<sup>1</sup>, Majid Alitavoli<sup>1\*</sup>, Abolfazl Darvizeh<sup>2</sup>, Hashem Babaei<sup>1</sup>, Farid Abdoli Kamali<sup>3</sup>, Reza Rajabiehfarid<sup>1</sup>

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

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University - Bandar Anzali Branch, Bandar Anzali, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran

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

### Keywords

Dynamic Powder Compaction  
Iron Powder  
Drop Hammer  
Impact Loading  
Genetic Algorithm

### Abstract

Experimental investigation and numerical modelling of dynamic loading effect on the density, strength and microstructure of the pure and composite parts fabricated from iron powder has been studied in the present paper. Experimental tests have been performed using drop hammer apparatus. Diametral compression test has been used to evaluate the strength of fabricated parts. Also, numerous micrographs have been provided using scanning electron microscopy to investigate the influence of impact loading on the microstructure of compacts. The obtained results show that with increasing compaction energy, density and strength of pure parts increase in three ranges of low, medium and high pressures with different rates. Also, the obtained results by compaction of iron powder with different ceramic powder contents under equal pressure reveal that adding more than 5 percent of ceramic content, sharply decreases the density of composite parts. Examination of graphs taken from the microstructure of compacts reveals that propagation of compressive stress waves through the powder column, causes plastic deformation of particles and forms mechanical inter-locking on a completely uniform structure. Furthermore, a mathematical expression has been presented using dimensional analysis along with genetic algorithm method to predict the values of density of produced pure parts. In this method, after constructing dimensionless numbers based on dimensional analysis approach, these numbers have been used as the inputs of genetic algorithm modelling method. Comparison of the values predicted by this equation with those obtained by experimental values, shows that the results obtained by this model, agree with experimental results surprisingly.

Please cite this article using:

N. Namazi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, H. Babaei, F. Abdoli Kamali, R. Rajabiehfarid, Experimental investigation and numerical modelling of dynamic compaction process of pure iron powder with ceramic particles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 20-28, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

متالوژی پودر یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید قطعات صنعتی به‌ویژه قطعاتی با اشکال پیچیده هندسی و یا تخلخل بالا محسوب می‌شود. ویژگی‌های ممتاز این روش همچون میزان بهره‌گیری بالا از مواد اولیه، قابلیت اتوماسیون‌سازی و سرعت بالا در تولید قطعات با تعداد زیاد، قابلیت کنترل خواص فیزیکی همچون تخلخل در قطعات تولیدی، قابلیت تولید قطعات مرکب و در نهایت نیاز به ماشین‌آلات با هزینه پایین و ایمنی بالای روش، باعث گسترش روزافزون کاربرد آن در حوزه‌های مختلف از جمله صنایع اتومبیل‌سازی، الکترونیک و هوا-فضا گردیده است.

روش متالوژی پودر شامل قرار دادن ذرات پودر درون یک قالب و تراکم آن به روش‌های مختلف همچون پرس یک‌طرفه، دو طرفه و یا پرس هیدرو استاتیک گرم و سرد است. قطعات حاصل از تراکم پس از خروج از قالب از آنجاکه دارای استحکام مکانیکی ضعیفی بوده و جهت کاربردهای صنعتی مناسب نیستند، وارد کوره شده و تا 70 الی 80 درصد دمای ذوب فلز پایه، حرارت داده می‌شوند. در اثر حرارت‌دهی به قطعات در کوره، پیوندهای ضعیف مکانیکی بین ذرات پودر، به پیوندهای مستحکم فلزی تبدیل شده و خواص فیزیکی همچون چگالی و خواص مکانیکی همچون استحکام، افزایش فراوانی می‌یابند. روش متالوژی پودر با وجود ویژگی‌های برجسته‌ای که بدان اشاره گردید، دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. به‌عنوان مثال پودرهای فلزی همچون تنگستن و تیتانیوم دارای دمای ذوب بسیار بالایی هستند که فراهم نمودن آن مستلزم صرف زمان، هزینه و انرژی زیاد در مرحله حرارت‌دهی به قطعه است. از سوی دیگر در تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی به روش متالوژی پودر، معمولاً از پودرهای سرامیکی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده می‌شود. از آنجاکه مواد سرامیکی دارای سختی زیادی هستند، متراکم نمودن آن‌ها نیازمند تأمین فشارهای بالا در مرحله تراکم و با استفاده از دستگاه‌های پرس سنگین است. وجود چنین محدودیت‌هایی در کنار پتانسیل بالای این روش سبب شده تا در سال‌های اخیر، معرفی و ابداع روش‌های مکمل متالوژی پودر به یکی از حوزه‌های مطالعاتی پرطرفدار در میان محققان تبدیل شود.

تراکم دینامیکی، یکی از این دسته از روش‌ها محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر مورد توجه حوزه‌های تحقیقات صنعتی و دانشگاهی قرار گرفته است. ایده تراکم دینامیکی پودر، نخستین بار در سال 1968 میلادی توسط هیجمیر مطرح گردید [1]. این تکنیک مبتنی بر استفاده از انرژی حاصل از انفجار ماده

منفجره و یا انرژی سیال تحت‌فشار، برای شتاب دادن به یک پرتابه و برخورد سریع آن با ذرات پودر است که منجر به تراکم پودر می‌گردد. امروزه مشخص‌شده است که استفاده از روش تراکم دینامیکی پودر در مقایسه با روش‌های متداول تراکم استاتیکی، منجر به تولید قطعاتی با توزیع چگالی یکنواخت‌تر، چگالی نسبی بالاتر و مقاومت بیشتر می‌شود [2]. مزیت دیگر روش تراکم دینامیکی پودر در این است که با توجه به نرخ بالای بارگذاری در این روش، حرارت ایجادشده در حین فرایند تراکم باعث اتصال بین ذرات پودر شده و این امر موجب حذف عملیات حرارت‌دهی در کوره می‌شود و راندمان تولید را افزایش می‌دهد [3]. کاسیراج در سال 1984 تراکم دینامیکی پودرهای فولادی به‌وسیله امواج شوک حاصل از برخورد یک پرتابه را مورد بررسی قرارداد و به این نتیجه رسید که فشار تراکم به‌شدت بر مقاومت تسلیم کششی قطعات حاصل تأثیرگذار است، درحالی‌که تأثیر چندانی بر سختی ندارد [4]. در سال 1988 درووزه و الحسنی روش تراکم دینامیکی پودر با استفاده از تخلیه الکتریکی را مورد بررسی قرار داده و از این روش برای تولید مواد کامپوزیتی استفاده کردند [5]. در این روش ستون پودر درون قالب، تحت اثر تخلیه انرژی الکتریکی قرار گرفته و متراکم می‌گردد. در سال 1997 شیک و میلیگان تراکم دینامیکی نانو پودرهای فلزی را با استفاده از روش آهنگری، مورد مطالعه قرار دادند [6]. آن‌ها در این مطالعه، اثر نرخ کرنش و دما را در به وجود آمدن عیوب و نابجایی بین ذرات و همچنین کیفیت سطح قطعات تولیدشده به این روش، مورد مطالعه قرار دادند. تراکم دینامیکی پودرهای فلزی به روش‌های متنوع و با استفاده از دستگاه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. تراکم دینامیکی تحت بار ضربه‌ای معمولاً توسط سامانه چکش پرتابه‌ای [7-9] و یا دستگاه ضربه - زننده هیدرولیکی [10-12] انجام می‌شود.

با توجه به کاربرد گسترده قطعات از جنس آهن در صنایع مختلف، جنبه‌های گوناگون تراکم پودرهای پایه آهن همچون اثر اندازه و شکل ذرات پودر بر خواص مکانیکی [13]، اثر فرایند حرارت‌دهی بر ریزساختار قطعات [14] و اثر افزودن ذرات اتصال‌دهنده بر خواص فیزیکی [15]، تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته است. نکته قابل توجه این است که بیشتر این تحقیقات محدود به روش‌های متالوژی پودر رایج است که به‌صورت شبه استاتیکی انجام شده و با عملیات حرارت‌دهی در کوره تکمیل می‌گردد و فرایند تراکم دینامیکی پودرهای پایه آهن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در معدود مطالعات انجام شده در این زمینه، وانگ و همکاران، تراکم دینامیکی پودر آهن خالص را با

## 2- مطالعه تجربی

### 2-1- سامانه چکش پرتابه‌ای

در این تحقیق، به منظور تراکم دینامیکی ذرات پودر آهن، از سامانه چکش پرتابه‌ای موجود در موسسه آموزش عالی احرار رشت استفاده شده است که نمای کلی آن در شکل 1 نشان داده شده است. این سامانه به منظور ایجاد نرخ‌های پایین در فرایندهای شکل‌دهی دینامیکی استفاده می‌شود. مطابق شکل 1، سامانه چکش پرتابه‌ای از یک وزنه به جرم 55 کیلوگرم تشکیل شده است که ارتفاع آن تا 9 متر قابل تنظیم است. با رها کردن چکش از ارتفاع معین، انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در آن به انرژی جنبشی تبدیل شده و به صورت بار ضربه‌ای به سنبه برخورد می‌کند که این امر باعث تراکم ذرات پودر درون قالب می‌گردد. تنظیم ارتفاع وزنه توسط یک سیستم بالابر الکتریکی انجام می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت وزنه به هنگام برخورد با سنبه، از یک سرعت‌سنج لیزری استفاده شده است. مجموعه قالب و سنبه در پایین‌ترین نقطه دستگاه، به یک سندان متصل می‌گردد.

### 2-2- نحوه انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های موردنظر، پودر آهن با خلوص 99 درصد و با توزیع اندازه ذرات کمتر از 60 میکرومتر مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور تولید قطعات مرکب، پودر آهن با درصد‌های وزنی مختلف با پودر سرامیک اکسید آلومینیوم با توزیع اندازه ذرات کمتر از 30 میکرومتر مخلوط شده است. شکل‌های 2 و 3 به ترتیب تصویر ذرات پودر آهن و سرامیک مورد استفاده را قبل از تراکم، نشان می‌دهد.

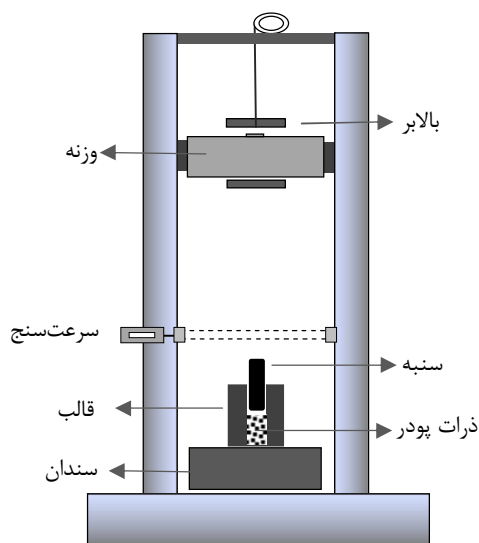


Fig. 1 Schematic of drop hammer apparatus

شکل 1 نمای کلی سامانه چکش پرتابه‌ای

استفاده از دستگاه ضربه زننده هیدرولیکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که امواج شوک ایجادشده در حین تراکم، از نظر ساختار کلی مشابه هستند و تفاوت آن‌ها در مدت زمان عبور موج از درون ذرات پودر است [16].

در سال‌های اخیر، ایده استفاده از مدل‌سازی عددی به عنوان یک روش مؤثر در پیش‌بینی خواص فیزیکی قطعات حاصل از فرایندهای شکل‌دهی با نرخ بارگذاری بالا توسط برخی از محققان بکار رفته است. در سال 2002 نریمان زاده و همکاران با مدل‌سازی عددی نتایج به دست آمده از تراکم انفجاری پودرهای فلزی به روش شبکه‌های عصبی، تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی چگالی نسبی و انرژی حاصل از تراکم بررسی کردند و در نهایت مدلی برای پیش‌بینی این دو مؤلفه ارائه نمودند [17]. در سال 2013 بابایی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد و تحلیل ابعادی، فرایند تراکم پودر به روش انفجاری را مورد بررسی قرار داده و مدلی ارائه نمود که با استفاده از آن می‌توان انرژی موردنیاز برای تراکم و میزان چگالی نهایی را پیش‌بینی نمود [18]. این مدل در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش از دقت مطلوبی برخوردار می‌باشد.

مطالعات جدید در حوزه تراکم دینامیکی پودر، به موضوعاتی از قبیل استفاده از منابع نوین انرژی همچون لیزر [19] و یا تبخیر فویل فلزی [20] و همچنین بهبود خواص و تولید قطعات مرکب با کاربردهای خاص صنعتی [21] و پزشکی [22] اختصاص یافته است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی فرایند تراکم دینامیکی پودر خالص آهن و پودر مرکب آهن و سرامیک است. برای این منظور، پودر آهن به صورت خالص و همچنین به صورت مخلوط شده با پودر سرامیک با نسبت‌های وزنی متفاوت، با استفاده از دستگاه چکش پرتابه‌ای تحت بار ضربه‌ای قرار می‌گیرد. حاصل از تراکم پس از خروج از قالب، تحت آزمون فشار قطری قرار می‌گیرند تا استحکام کششی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین به منظور بررسی تأثیر روش تراکم دینامیکی بر ریزساختار قطعات، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. در ادامه یک مدل‌سازی ریاضی بر مبنای داده‌های تجربی و با استفاده از روش تحلیل ابعادی و الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد. مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط این مدل با داده‌های تجربی مقایسه شده و در نهایت دقت مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



Fig. 4 Samples fabricated using dynamic compaction method

شکل 4 نمونه‌های تولیدشده به روش تراکم دینامیکی

این انرژی جنبشی در واقع همان انرژی تراکمی است که به صورت ضربه از طریق وزنه به سنبه منتقل می‌شود. حال با داشتن انرژی تراکم و ارتفاع قطعه قبل و بعد از تراکم، فشار تراکم ( $P$ ) مطابق رابطه (2) محاسبه می‌شود:

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

در رابطه (2)،  $\Delta V$  تغییر حجم نمونه قبل و بعد از تراکم است. لازم به ذکر است در کلیه آزمایش‌ها، جرم پودر ریخته شده در قالب، قطر قالب و جرم چکش ثابت در نظر گرفته شده و تنها ارتفاع چکش تغییر می‌کند. با توجه به اینکه همه نمونه‌ها دارای شکل استوانه‌ای بوده و قطر یکسان دارند، به منظور اندازه‌گیری چگالی نهایی قطعات، ابتدا ارتفاع نهایی قطعه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود. از آنجاکه در هر آزمایش مقداری از پودر به دلیل چسبیدن به سطح قالب و یا هنگام خروج قطعه از درون قالب هدر می‌رود، جرم نمونه‌های تولیدشده نیز با استفاده از ترازو اندازه‌گیری می‌شود. حال با داشتن جرم و ارتفاع نهایی قطعات و با تقسیم جرم بر حجم، چگالی نهایی قطعه محاسبه می‌شود. مقدار چگالی محاسبه‌شده به این روش، در نهایت بر چگالی تئوری آلومینیم (2700 کیلوگرم بر مترمکعب) تقسیم شده و کمیتی به نام چگالی نسبی بر حسب درصد محاسبه می‌شود که به‌عنوان یک معیار برای مقایسه چگالی نهایی قطعات تولیدشده به کار می‌رود.

همچنین در این تحقیق از آزمون فشار قطری موسوم به آزمایش برزیلی برای ارزیابی استحکام قطعات متراکم استفاده می‌شود. برای این منظور، از دستگاه STM-250 استفاده شده است. نمونه موردنظر به صورت جانبی بین یک فک ثابت پایینی و یک فک متحرک بالایی قرار می‌گیرد. با شروع آزمایش، فک متحرک بالایی با نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را در راستای قطری تحت فشار قرار می‌دهد. نیروی فشاری فک بالایی به‌طور فزاینده افزایش می‌یابد تا زمانی که قطعه با ایجاد ترک دچار شکست شود. در لحظه شروع ترک و واماندگی قطعه، نیرو کاهش می‌یابد و ماکزیمم

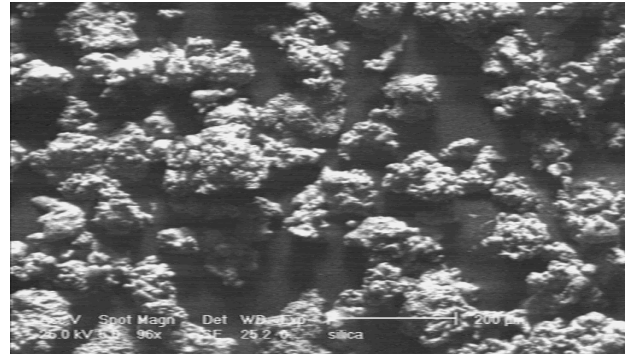


Fig. 2 Iron powder particles before compaction

شکل 2 ذرات پودر آهن قبل از تراکم

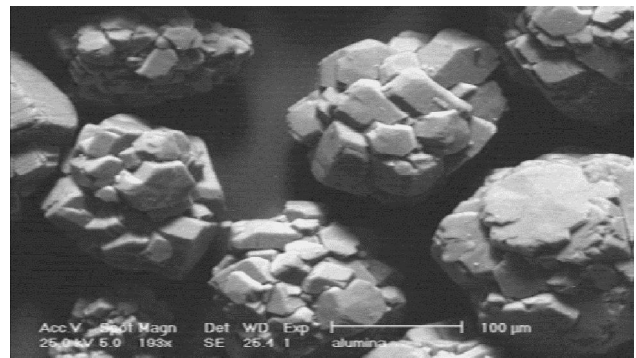


Fig. 3 Ceramic powder particles before compaction

شکل 3 ذرات پودر سرامیک قبل از تراکم

برای انجام هر آزمایش، مقدار 30 گرم پودر آهن یا مخلوط پودر آهن-سرامیک با درصد‌های وزنی متفاوت، درون قالب قرار ریخته می‌شود. قالب استوانه‌ای به قطر 21 میلی‌متر، پس از قرار گرفتن سنبه درون آن، بر روی سندان در زیر دستگاه چکش پرتابه‌ای مهار می‌شود. پس از تنظیم ارتفاع چکش توسط سیستم بالابر، چکش از ارتفاع معین، رها شده و با سنبه برخورد می‌کند. برخورد چکش با سنبه باعث تولید امواج تنش فشاری با دامنه بسیار زیاد در مدت‌زمان بسیار کوتاه می‌گردد. پس از اتمام هر آزمایش، به‌منظور خارج کردن قطعه متراکم شده از درون قالب، از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت 10 تن استفاده شده است. شکل 4 بخشی از نمونه‌های تولیدشده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

انرژی جنبشی وزنه به هنگام برخورد با سنبه ( $E$ ) از رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $M$  جرم وزنه و  $v$  سرعت وزنه به هنگام برخورد با سنبه است که توسط سرعت‌سنج اندازه‌گیری می‌شود.

$$\pi_0 = \rho \quad (6)$$

$$\pi_1 = \frac{H}{D} \quad (7)$$

$$\pi_2 = \frac{h_f}{h_0} \quad (8)$$

$$\pi_3 = \frac{v_{fe} m_0}{v M} \quad (9)$$

پارامتر  $v_{fe}$  در رابطه (9) سرعت عبور صوت از آهن است.

### 3-2- روش الگوریتم ژنتیک

کاربرد روش الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار کارآمد ریاضی برای مدل سازی پدیده های پیچیده فیزیکی همچون تراکم پودر در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. علت استقبال محققان در حوزه های مختلف مهندسی از این روش، دقت آن در پیش بینی مقادیر واقعی حاصل از فرایند از یک سو و توانایی در نظر گرفتن خطای اندازه گیری به عنوان جز لاینفک داده های حاصل از آزمایش از سوی دیگر است [24]. الگوریتم ژنتیک در واقع یک روش بهینه سازی مبتنی بر ساختار درختی است. بدین معنی که در این روش توابع و عملگرهای اعمال شده بر پارامترهای ورودی به عنوان میوه و ارتباط بین آنها به عنوان شاخه درخت در نظر گرفته می شود. به عنوان یک مثال ساده، رابطه ریاضی  $\sin(3x) + \sqrt{y-2}$  در فرم ساختار درختی به صورت شکل 5 نمایش داده می شود. در مدل سازی به روش الگوریتم ژنتیک، ابتدا تعداد مشخصی از جفت داده های ورودی-خروجی که به آنها داده آموزش اطلاق می شود، در نظر گرفته شده و یک ساختار درختی تصادفی با استفاده از داده های آموزشی ورودی ساخته می شود. این ساختار که جمعیت اولیه نامیده می شود با داده های خروجی مقایسه شده و به منظور انطباق بهتر، مجدداً جمعیت دیگری تولید شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد. این روند تکاملی تا حصول انطباق مطلوب بین داده های پیش بینی شده و داده های واقعی ادامه می یابد.

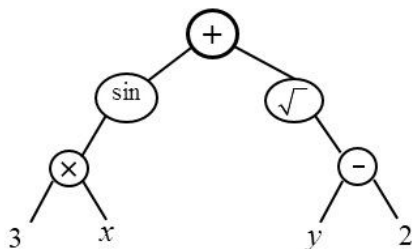


Fig. 5 Representation of expression  $\sin(3x) + \sqrt{y-2}$  in tree structure

شکل 5 نمایش عبارت  $\sin(3x) + \sqrt{y-2}$  در ساختار درختی

در این مرحله، به منظور ارائه یک مدل تجربی برای پیش بینی

نیروی ثبت شده توسط دستگاه، به عنوان نیروی شکست قطعه در نظر گرفته می شود. با داشتن نیروی شکست ( $F$ )، قطر نهایی قطعه ( $D$ ) و ارتفاع نهایی قطعه ( $h_f$ )، استحکام کششی قطعه ( $\sigma_t$ ) از رابطه (3) محاسبه می شود [23]:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi D h_f} \quad (3)$$

همچنین به منظور بررسی اثر روش تراکم دینامیکی بر ریزساختار نمونه های تولید شده، تصاویر مختلفی از نمونه های خالص و مرکب با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی تهیه شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

### 3- فرایند مدل سازی عددی

تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در پدیده تراکم دینامیکی و تغییرات غیرخطی این پارامترها در حین تراکم از یک سو و دشوار بودن اندازه گیری و تعیین ثوابت تجربی موجود در مدل های تحلیلی از سوی دیگر، عواملی هستند که سبب می شوند ارائه مدل های ساختاری مرتبط با این پدیده، با پیچیدگی های فراوانی همراه باشد. این پیچیدگی سبب می شود تا ضرورت استفاده از روش های مدل سازی عددی به عنوان یک راهکار مناسب در جهت پیش بینی خواص فیزیکی قطعات حاصل از تراکم دینامیکی مطرح گردد.

### 3-1- کاربرد روش تحلیل ابعادی

در روش تحلیل ابعادی، اعداد بی بعد با استفاده از پارامترهای مؤثر مسئله ساخته می شود که این امر منجر به کاهش تعداد این پارامترها شده و باعث تسهیل فرایند مدل سازی می گردد. پارامترهای ورودی مؤثر در فرایند تراکم دینامیکی با استفاده از سامانه چکش پرتابه ای شامل ارتفاع وزنه ( $H$ )، جرم وزنه ( $M$ )، ارتفاع اولیه پودر ( $h_0$ )، جرم اولیه پودر ( $m_0$ )، ارتفاع نهایی نمونه ( $h_f$ )، جرم نهایی نمونه ( $m_f$ )، قطر نمونه ( $D$ ) و سرعت تراکم ( $v$ ) می باشند؛ بنابراین چگالی نسبی نهایی قطعات ( $\rho$ ) بر مبنای این پارامترها توسط رابطه (4) قابل بیان است:

$$\rho = f(H, M, h_0, m_0, h_f, m_f, D, v) \quad (4)$$

حال به منظور کاهش تعداد پارامترها و همچنین یکسان سازی ابعاد پارامترها در دو سمت تساوی، رابطه (4) به صورت رابطه (5) بازنویسی می شود:

$$\pi_0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $\pi_0, \pi_1, \pi_2$  و  $\pi_3$  اعداد بی بعدی هستند که به صورت روابط (6-9) تعریف شده اند:

نمی‌شود.

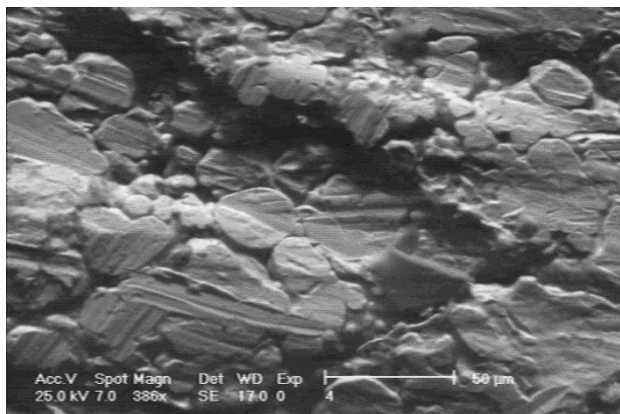


Fig. 6 Microstructure of pure part after compaction

شکل 6 ریزساختار قطعه خالص بعد از تراکم

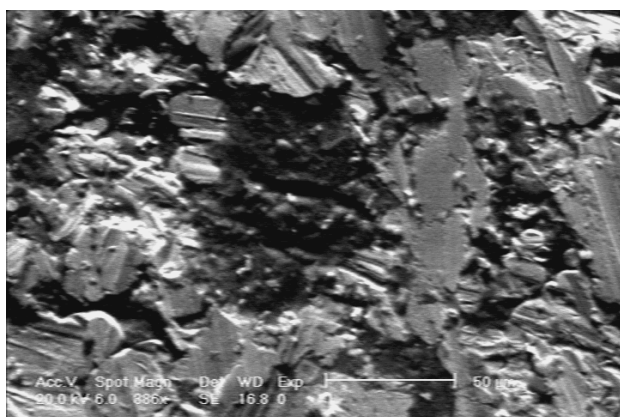


Fig. 7 Microstructure of composite part after compaction

شکل 7 ریزساختار قطعه مرکب بعد از تراکم

#### 4-2- چگالی و استحکام

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نمودار تغییرات چگالی نسبی و استحکام قطعات تولیدشده از پودر آهن خالص را بر حسب فشار تراکم نمایش می‌دهند. همان‌طور که در این دو شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار تراکم، چگالی و استحکام قطعات افزایش می‌یابند؛ اما نکته مشهود در هر دو نمودار این است که شیب این تغییرات در 3 محدوده فشارهای پایین (30 تا 70 مگا پاسکال)، فشارهای متوسط (70 تا 140 مگا پاسکال) و فشارهای بالا (بیشتر از 140 مگا پاسکال) متفاوت است به طوری که به عنوان نمونه در مورد چگالی نسبی، این شیب ابتدا افزایش سپس کاهش و در نهایت افزایش می‌یابد. از آنجاکه مکانیسم ایجاد اتصال بین ذرات پودر و تبدیل آن به یک ماده جامد به روش متالوژی پودر متداول در صنعت، شامل 3 مرحله جابجایی مجدد ذرات در فشارهای پایین، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در فشارهای متوسط و در نهایت کار-سختی و تکه‌تکه

چگالی قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودر آهن، تابع  $f$  در رابطه (5) به صورت رابطه (10) در نظر گرفته می‌شود:

$$\pi_0 = a (\pi_1)^b (\pi_2)^b (\pi_3)^b \quad (10)$$

حال مجموعه داده‌های ورودی-خروجی مربوط به ارتفاع‌های 2، 3، 7 و 9 متر به عنوان داده‌های آموزش و بقیه داده‌ها به عنوان داده پیش‌بینی توسط روش الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین ضرایب مجهول در رابطه (10) به گونه‌ای تعیین می‌گردند تا داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل، کمترین اختلاف را با مقادیر واقعی داشته باشد.

#### 4- بحث و بررسی نتایج

##### 4-1- بررسی ریزساختار نمونه

شکل 6 تصویر ریزساختار پودر آهن خالص را پس از تراکم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، نمونه از ساختار کاملاً یکنواختی برخوردار است و فضاهای خالی اندکی بین ذرات پودر مشاهده می‌شود.

نحوه اتصال بین ذرات پودر که در اثر پدیده قفل‌شدگی مکانیکی پدید می‌آید نیز در این شکل مشخص است. همچنین اتصال بین ذرات پودر در مرز دانه‌ها به خوبی صورت گرفته است. از طرفی در ساختار نمونه، ذراتی با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر از اندازه اولیه نسبت به شکل 2 مشاهده می‌شوند. علت این امر برخورد شدید ذرات پودر با یکدیگر در اثر عبور امواج فشاری است که باعث خرد شدن ذرات پودر می‌گردد.

همچنین شکل 7 تصویر ریزساختار قطعه مرکب حاصل از مخلوط کردن پودر آهن و سرامیک را نشان می‌دهد. نواحی با رنگ روشن‌تر در این تصویر، ذرات پودر سرامیک هستند که در حین فرایند مخلوط کردن، بین ذرات پودر آهن قرار گرفته‌اند اما به دلیل اختلاف اندازه و چگالی ذرات دو نوع پودر، توزیع همگنی از ذرات سرامیک در ساختار ملاحظه نمی‌شود. از آنجاکه چگالی سرامیک کمتر از پودر آهن است، برخورد شدید ذرات پودر در اثر عبور موج تنش در حین تراکم، سبب می‌شود تا تجمع ذرات سرامیک در بالای قطعه (سمت چپ تصویر) بیشتر از پایین قطعه (سمت راست تصویر) باشد. علت این امر این است که بالای قطعه که در تماس مستقیم با سنبه است، بیشترین مقدار انرژی تراکم را دریافت می‌کند. اصطکاک بین ذرات پودر و قالب، سبب اتلاف انرژی تراکم شده و در نتیجه پایین قطعه انرژی به مراتب کمتری را دریافت کرده و چگالی در این ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین هیچ‌گونه واکنشی از جمله تغییر فاز فلزی در اثر پدیده تراکم دینامیکی در ساختار نمونه ملاحظه

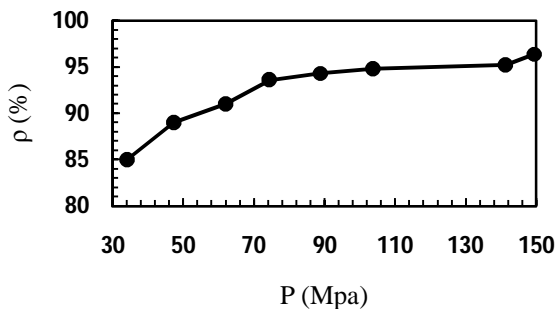


Fig. 8 Variations of relative density versus compaction pressure  
 شکل 8 تغییرات چگالی نسبی بر حسب فشار تراکم

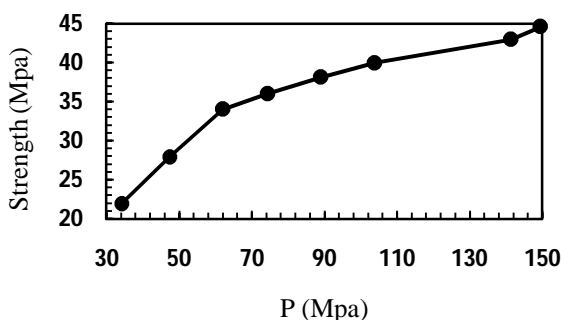


Fig. 9 Variations of strength versus compaction pressure  
 شکل 9 تغییرات استحکام بر حسب فشار تراکم

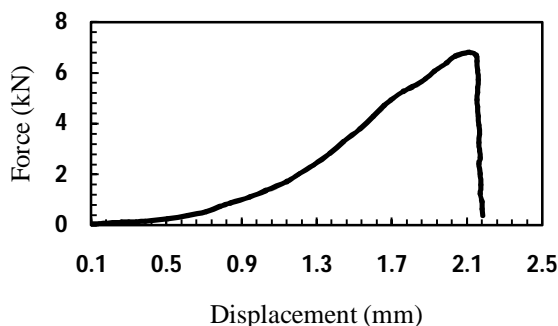


Fig. 10 Force-displacement graph in diametral compression test  
 شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی در آزمون فشار قطری

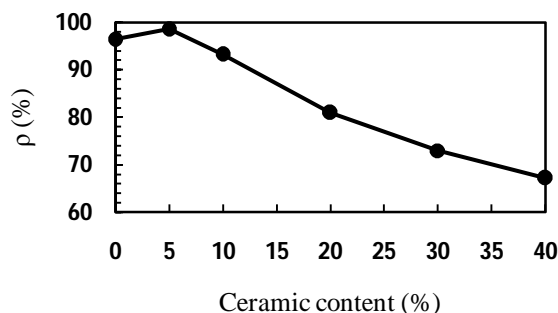


Fig. 11 Effect of adding ceramic on relative density  
 شکل 11 تأثیر افزودن سرامیک بر چگالی نسبی

شدن در فشارهای تراکم بالاست، این نتیجه حاصل می شود که مکانیسم قالب در پدیده تراکم دینامیکی با استفاده از سامانه چکش پرتابه ای نیز شامل سه مرحله فوق است. این سه مرحله را به این صورت می توان از لحاظ فیزیکی تعبیر نمود که در مرحله اول افزایش ناگهانی فشار ناشی از بارگذاری ضربه ای و حرکت سنبه به سمت پایین قالب، سبب جابجایی ذرات پودر و برخورد شدید این ذرات با یکدیگر می گردد. در این مرحله به دلیل قرار گرفتن ذرات پودر در فضاهای خالی بین یکدیگر و برقراری نیروهای مولکولی بین ذرات مجاور، شاهد افزایش قابل ملاحظه در مقادیر چگالی و استحکام هستیم. در مرحله دوم از آنجا که فضایی برای جابجایی و برخورد بین ذرات پودر باقی نمانده، فشار تراکم سبب افزایش اصطکاک و حرارت موضعی در سطح ذرات شده و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک آغاز می شود. این امر تأثیر چندانی بر روی افزایش چگالی ندارد ولی از آنجا که سبب ایجاد اتصال بین ذرات پودر می گردد، تأثیر آن بر افزایش استحکام قابل ملاحظه است. در مرحله سوم، بروز پدیده سخت-شوندگی در ذرات پودر سبب می شود ادامه روند تغییر شکل پلاستیک ذرات، در فشار تراکم بالاتری رخ دهد.

این در حالی است که در پدیده تراکم دینامیکی در سرعت های بالا، سرعت انتشار امواج تنش از سرعت انتشار صوت از درون ذرات پودر فراتر رفته و حالت شوک پدید می آید. عبور امواج شوک از درون ذرات پودر، باعث افزایش موضعی حرارت و بروز پدیده نرم شوندگی مکانیکی در سطح ذرات شده که این امر موجب بروز پدیده ذوب موضعی در لایه سطحی ذرات پودر و جوش خوردن آن ها به یکدیگر می گردد. بنابراین انتظار می رود که روند افزایش چگالی و استحکام در مورد آن کاملاً یکنواخت باشد.

شکل 10 یکی از نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار قطری را نشان می دهد. همان طور که در شکل ملاحظه می شود، افزایش نیروی فشاری تحمل شده توسط نمونه تا رسیدن به یک مقدار ماکزیمم ادامه می یابد و سپس با شروع ترک، نمونه دچار واماندگی می شود. در آزمون فشار قطری، در واقع نیروی فشاری در راستای قطر نمونه، به نیروی کششی غیرمستقیم تبدیل می شود؛ بنابراین بالاتر بودن نیروی شکست یک نمونه، به معنای مستحکم تر بودن اتصالات بین ذرات پودر در آن نمونه است.

تأثیر افزودن سرامیک با درصدهای وزنی متفاوت به پودر آهن، بر چگالی قطعه مرکب حاصل در شکل 11 نمایش داده شده است.

تراکم 4/5-9/5 متر بر ثانیه بر چگالی، استحکام و ریزساختار قطعات خالص و مرکب حاصل از تراکم پودر آهن و همچنین مخلوط پودر آهن و سرامیک با درصدهای وزنی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:

1- افزایش چگالی و استحکام قطعات حاصل از تراکم پودر آهن خالص در سه محدوده فشارهای پایین، متوسط و بالا نشان می‌دهد اتصال بین ذرات در محدوده سرعت‌های مورد مطالعه در این تحقیق، در سه مرحله جابجایی مجدد ذرات، تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک و در نهایت کار-سختی و تکه‌تکه شدن آن‌ها صورت گرفته است.

2- بررسی ریزساختار قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودر آهن خالص نشان می‌دهد اتصال از نوع قفل‌شدگی مکانیکی به‌خوبی بین ذرات ایجاد شده ولی پدیده اتصال ذرات در اثر ذوب شدن موضعی در ریزساختار قطعات مشاهده نگردیده است.

3- عبور امواج تنش فشاری از ستون ذرات پودر در روش تراکم دینامیکی، باعث خرد شدن ذرات پودر و افزایش تغییر شکل پلاستیک آن‌ها شده و منجر به تولید قطعاتی با ریزساختار کاملاً یکنواخت و چگالی نسبی بالا می‌شود. از طرفی سرعت عبور این امواج به حدی نیست که باعث بروز پدیده ذوب موضعی در ذرات پودر گردد.

4- توزیع ناهمگن و تجمع موضعی ذرات پودر سرامیک در ریزساختار قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودرهای آهن و سرامیک مشاهده می‌شود که این امر به دلیل تفاوت در اندازه و کمتر بودن چگالی ذرات پودر سرامیک نسبت به ذرات پودر آهن رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد استفاده از ذرات پودر سرامیک با ابعاد نانو می‌تواند منجر به توزیع یکنواخت‌تر این ذرات در امتداد محوری گردد.

5- افزایش بیش از 5 درصد وزنی سرامیک به پودر آهن باعث افت شدید چگالی قطعات می‌گردد. علت این امر جذب مقدار زیادی از فشار تراکم توسط ذرات سخت سرامیک و کاهش فشار دریافتی توسط ذرات آهن است که مانع از ایجاد تراکم مطلوب در ساختار پودر می‌گردد.

6- مقایسه مقادیر چگالی پیش‌بینی شده توسط رابطه ارائه شده با نتایج تجربی به‌دست آمده، انطباق بسیار مناسبی را با مجذور میانگین مربعات معادل 0/71 نشان می‌دهد؛ بنابراین با توجه به ماهیت پیچیده فرایند تراکم دینامیکی و دشواری روش‌های تحلیلی برای مدل‌سازی آن، استفاده از روش تحلیل ابعادی و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد و دقیق برای مدل‌سازی این پدیده مورد استفاده قرار گیرد.

همان‌طور که در شکل 11 ملاحظه می‌گردد، افزودن 5 درصد سرامیک به پودر آهن باعث افزایش چگالی قطعه مرکب شده است، زیرا ذرات سبک‌تر سرامیک مابین حفره‌های ذرات پودر آهن قرار گرفته و منجر به افزایش چگالی شده‌اند؛ اما در ادامه با افزایش درصد وزنی سرامیک، چگالی قطعه مرکب به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش فراوان به این دلیل رخ می‌دهد که بخشی از فشار تراکم، توسط ذرات سرامیک دریافت می‌شود و در نتیجه مقدار فشار دریافت‌شده توسط ذرات پودر آهن برای تغییر شکل این ذرات و کاهش تخلخل بین آن‌ها کافی نیست.

#### 3-4- ارائه مدل چگالی

با اعمال روش الگوریتم ژنتیک بر روی رابطه (10) مقادیر ضرایب مجهول، تعیین شده و بنابراین این رابطه به‌صورت رابطه (11) برای پیش‌بینی مقادیر چگالی به دست می‌آید:

$$\rho = 2.22 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.1} \left(\frac{h_f}{h_0}\right)^{1.14} \left(\frac{v_{fe} m_0}{v M}\right)^{0.215} \quad (11)$$

رابطه (11)، یک رابطه جهت پیش‌بینی چگالی قطعات حاصل از تراکم پودر آهن خالص است که با اعمال روش تحلیل ابعادی و الگوریتم ژنتیک بر روی داده‌های تجربی به‌دست‌آمده است. به‌منظور ارزیابی دقت رابطه ارائه‌شده، مقادیر چگالی نسبی پیش‌بینی‌شده توسط این رابطه با داده‌های تجربی در شکل 12 مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، مقادیر پیش‌بینی‌شده از انطباق بسیار مناسبی با مقادیر تجربی برخوردار هستند، به‌طوری‌که مجذور میانگین مربعات خطاها معادل 0/71 به دست می‌آید که این امر کارایی این روش را در مدل‌سازی پدیده تراکم دینامیکی پودر نشان می‌دهد.

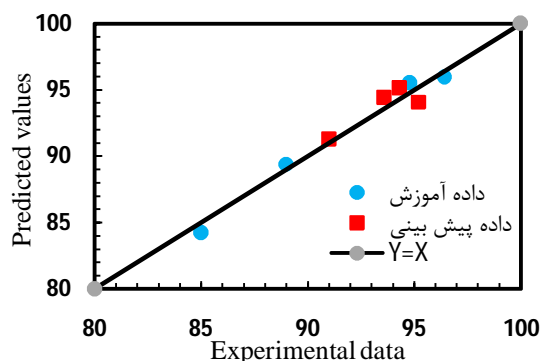


Fig. 12 Comparison between values predicted by equation 11 with experimental data

شکل 12 مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط رابطه 11 و مقادیر تجربی

#### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر پدیده تراکم دینامیکی در محدوده سرعت



## 6- مراجع

- [13] D. Poquillon, V. Baco-Carles, P. Tailhades, E. Andrieu, Cold compaction of iron powders-relations between powder morphology and mechanical properties: Part II. Bending tests: results and analysis, *Powder technology*, Vol. 126, pp. 75-84, 2002.
- [14] A. Simchi, and H. Pohl, Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder, *Materials Science and Engineering*, Vol. 359, pp. 119-128, 2003.
- [15] S. Ahn, S. J. Park, S. Lee, S. V. Atre, R.M. German, Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process, *Powder Technology*, Vol. 193, pp. 162-169, 2009.
- [16] JZ Wang, XH Qu, HQ Yin, MJ Yi, XJ Yuan, High velocity compaction of ferrous powder, *Powder technology*, Vol. 192, pp. 131-136, 2009.
- [17] N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, M. Felezi, and H. Gharababaei, Polynomial modelling of explosive compaction process of metallic powders using GMDH-type neural networks and singular value decomposition, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 10, p. 727, 2002.
- [18] H. Garehbabaei, Modeling of compaction process of metallic powders using dimensionless analysis and singular value decomposition, *Adv Appl Sci Res*, Vol. 4, pp. 107-114, 2013.
- [19] C. Deng, M. Liu, P. Molian, Nandiamond powder compaction via laser shockwaves: Experiments and finite element analysis, *Powder Technology*, Vol. 239, pp. 36-46, 2013.
- [20] A. Vivek, J. D. DeFouw, G. S. Daehn, Dynamic compaction of titanium powder by vaporizing foil actuator assisted shearing, *Powder Technology*, Vol. 20, pp. 181-186, 2009.
- [21] C. A. Braun, M. Schumaker, J. Rice, J. P. Borg, Comparison of static and dynamic powder compaction: Experiment and simulation. *Engineering Materials and Technology*, Vol. 138, 011003, 2016.
- [22] M. Dzmityr, B. Klimenty, A porous materials production with an electric discharge sintering, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 59, pp. 67-77, 2016.
- [23] M. Çelik, *Pharmaceutical Powder Compaction Technology*, Second Edition: CRC Press, 2016.
- [24] A. Jamali, E. Khaleghi, I. Gholaminejad, N. Nariman-Zadeh, B. Gholaminia, A. Jamal-Omidi, Multi objective genetic programming approach for robust modeling of complex manufacturing process having probabilistic uncertainty in experimental data, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 28, pp. 149-163, 2017.
- [1] J. Hagemeyer, J. Regalbutto, Dynamic compaction of metal powders with a high velocity impact device, *Int. J. Powder Met*, Vol. 4, pp. 19-25, 1968.
- [2] P. Skoglund, High density PM parts by high velocity compaction, *Powder metallurgy*, Vol. 44, pp. 199-202, 2001.
- [3] M. J. Yi, H. Q. Yin, J. Z. Wang, X. J. Yuan, X. H. Qu, Comparative research on high-velocity compaction and conventional rigid die compaction, *Frontiers of Materials Science in China*, Vol. 3, pp. 447-451, 2009.
- [4] P. Kasiraj, T. Vreeland, R. Schwarz, and T. Ahrens, Shock consolidation of a rapidly solidified steel powder, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 1235-1241, 1984.
- [5] T. Alp, A. Darvizeh, and S. Al-Hassani, Preforming of Metal—Polymer Composites by Electrical Discharge Compaction of Powders, *Powder metallurgy*, Vol. 31, pp. 173-177, 1988.
- [6] G. R. Shaik and W. Milligan, Consolidation of nanostructured metal powders by rapid forging: Processing, modeling, and subsequent mechanical behavior, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 28, pp. 895-904, 1997.
- [7] H. Babaei, T. M. Mostofi, M. Alitavoli, and M. 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, pp. 357-366, 2015 (in Persian فارسی).
- [8] M. Alitavoli, H. Babaei, A. Mahmoudi, A. Golbaf, and T. M. 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, pp. 22-30, 2015 (in Persian فارسی).
- [9] H. M. Babaei, T.M. Majid Alitavoli, M. Namazi, N. Rahmanpoor, A. Dynamic compaction of cold die Aluminum powders, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 10, pp. 109-124, 2016.
- [10] B. Azhdar, B. Stenberg, and L. Kari, Development of a high-velocity compaction process for polymer powders, *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 909-919, 2005.
- [11] M. J. Yi, H. Q. Yin, J. Z. Wang, X. J. Yuan, and X. H. Qu, Comparative research on high-velocity compaction and conventional rigid die compaction, *Frontiers of Materials Science in China*, Vol. 3, pp. 447-451, 2009.
- [12] H. Yin, H. Li, X. Qu, M. Khan, S. Ali, and M. Z. Iqbal, Compaction of Ti-6Al-4V powder using high velocity compaction technique, *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 479-483, 2013.