



## بررسی تجربی و عددی تأثیر اندازه ذرات پودر فلزی بر خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات تولیدی به روش تراکم دینامیکی با نرخ بارگذاری بالا

بهزاد محمدخانی حاجی خواجه لو<sup>1</sup>، رامین مشک آبادی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران و نخبگان، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر

\* اهر، صندوق پستی 545116714، r-meshkabadi@iau-ahar.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق، اثر توزیع اندازه ذرات پودرهای فلزی بر چگالی و استحکام قطعات تولیدشده تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمون‌های تجربی بر روی پودر آلومینیوم توسط سامانه تفنگ گازی انجام شده است. در این راستا، پودر آلومینیوم خالص با سه اندازه ذره متفاوت، تحت تراکم قرار گرفته و چگالی و استحکام قطعات متراکم‌شده، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار چگالی، مربوط به بزرگ‌ترین توزیع اندازه ذرات است. به‌منظور ارزیابی اثر مخلوط کردن ذرات پودر با توزیع اندازه‌های متفاوت در خواص قطعات متراکم‌شده، سه پودر اولیه با نسبت‌های وزنی متفاوت، با یکدیگر ترکیب شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش سهم پودر با اندازه ذرات بزرگ‌تر، چگالی قطعه مرکب افزایش می‌یابد ولی این امر تأثیر مشخصی بر استحکام ندارد. در ادامه یک مدل‌سازی ریاضی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی چگالی قطعات متراکم‌شده، ارائه گردیده است. در این روش، مقادیر تجربی به‌دست‌آمده، به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط این مدل با نتایج بدست‌آمده از آزمایش، انطباق بسیار مناسبی را نشان می‌دهد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 16 فروردین 1398  
پذیرش: 21 خرداد 1398  
ارائه در سایت: بهمن 1398

### کلیدواژه‌ها:

تراکم دینامیکی پودر  
پودر آلومینیوم  
تفنگ گازی  
بارگذاری ضربه‌ای  
شبکه عصبی مصنوعی

## Experimental and numerical investigation of the effect of metal powder particle size on the physical and mechanical properties of the components produced by high rate dynamic powder compaction

Behzad Mohammadkhani Hajikhajehloo<sup>1</sup>, Ramin Meshkabadi<sup>2\*</sup>

1- Young Researchers and Elite Club, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

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

\* P.O.B. 545116714 Ahar, Iran, r-meshkabadi@iau-ahar.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 5 April 2019  
Accepted 11 June 2019  
Available February 2020

### Keywords:

Dynamic powder compaction  
Aluminum powder  
Gas gun  
Impact loading  
Artificial neural network

### Abstract

The effect of size distribution of metal powder particles on the density and strength of fabricated parts under high velocity impact loading has been investigated in this paper. Experiments have been performed on aluminum powder using gas gun apparatus. To do so, pure aluminum powder with three different sizes has been compacted and both density and strength of compacts have been compared. The obtained results show that the coarsest particle size, has the maximum value of density. To evaluate the effect of mixing powder particles with different size distributions on properties of compacts, three initial powders with different weight ratios have been mixed together. The obtained results show that the density of composite part increases as the content of powder with greater particle sizes increases, but this has no particular effect on strength. Next, a mathematical modelling using neural network method has been presented to predict the density of compacts. Through this method, obtained experimental values are used as input by the neural network method. Comparison of values predicted using this model with those obtained by experiments, represents an appropriate level of adjustment.

### 1- مقدمه

بخش پزشکی به‌سرعت در حال گسترش است. دلیل این استقبال گسترده، مزایای فوق‌العاده‌ای است که متالوژی پودر در مقایسه با سایر روش‌های تولید قطعات صنعتی از آن برخوردار است. این مزایا شامل دستیابی به دقت ابعادی نهایی در قطعاتی

امروزه کاربرد روش‌های متالوژی پودر در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی همچون صنایع خودروسازی، هوا-فضا، تولید ماشین‌آلات صنعتی، ساخت سخت‌افزار در صنایع الکترونیک و

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Mohammadkhani Hajikhajehloo, R. Meshkabadi, Experimental and numerical investigation of the effect of metal powder particle size on the physical and mechanical properties of the components produced by high rate dynamic powder compaction, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 45-53, 2019 (in Persian)

[6] و تفنگ گازی [7-11] توسط محققان برای محدوده وسیعی از پودرهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین استفاده از انرژی پتانسیل حاصل از رها کردن یک وزنه سنگین از ارتفاع [12]، انرژی حاصل از تخلیه ناگهانی جریان الکتریکی در ستون پودر [13] و انرژی الکترومغناطیسی [14] سایر روش‌های تراکم دینامیکی هستند که در تحقیقات مختلف مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند.

مطالعات صورت گرفته در زمینه تأثیر اندازه ذرات بر خواص قطعات حاصل از تراکم پودر، محدود به روش‌های متالوژی پودر رایج است که به‌صورت شبه استاتیکی انجام شده و با عملیات حرارت‌دهی در کوره تکمیل می‌گردد. نتیجه این مطالعات نشان می‌دهد که اندازه ذرات پودر یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خواص مختلف قطعات همچون چگالی، استحکام و سختی محسوب می‌شود [15-17]. علیرغم این نکته، بررسی اثر اندازه ذرات در خواص قطعات تولیدی یکی از موضوعاتی است که در حوزه تراکم دینامیکی مورد غفلت واقع شده است.

تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در پدیده تراکم دینامیکی همچون مؤلفه هیدرو استاتیکی تنش، سخت‌شوندگی، نرخ کرنش و دما، سبب می‌شود تا استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر تئوری پلاستیسیته برای مدل‌سازی این پدیده با پیچیدگی‌های فراوانی مواجه شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر، روش‌های عددی متنوعی برای مدل‌سازی پدیده تراکم دینامیکی توسط محققان به کار رفته است. بابایی و همکاران با ترکیب روش تحلیل ابعادی و روش تجزیه مقادیر منفرد، روابطی را جهت پیش‌بینی چگالی و استحکام قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودرهای آلومینیومی در دو حالت خالص و مخلوط شده با پودر سرامیک، ارائه نمودند [18]. طاولی و همکاران به بررسی تجربی اثر بارگذاری دینامیکی بر چگالی، استحکام و ریزساختار قطعات خالص و مرکب تولیدشده از پودر آهن پرداخته و از روش تحلیل ابعادی و الگوریتم ژنتیک جهت پیش‌بینی چگالی قطعات خالص تولیدشده استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش فشار تراکم، چگالی و استحکام قطعات خالص در سه محدوده فشارهای پایین، متوسط و بالا با نرخ‌های متفاوت، افزایش می‌یابد. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط این رابطه با مقادیر تجربی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این مدل، از انطباق بسیار مناسبی با نتایج تجربی برخوردار هستند [19].

گنجی و همکاران به منظور دست‌یابی به چگالی بالاتر به جای استفاده از نیروی پرس از انرژی آزاد شده انفجار یک ماده

با اشکال پیچیده هندسی بدون نیاز به عملیات ماشین‌کاری، استفاده بهینه از مواد اولیه و جلوگیری از اتلاف آن، قابلیت اتوماسیون‌سازی با ماشین‌آلات با هزینه پایین‌تر و قابلیت کنترل تخلخل در قطعات تولیدی خاص همچون فیلترهای صنعتی و ایمپلنت‌های دندانپزشکی است [1].

در روش‌های متداول متالوژی پودر در صنعت، ذرات پودر پس از تراکم درون قالب و خارج شدن از آن، درون کوره‌هایی با اتمسفر کنترل‌شده تحت عملیات حرارت‌دهی قرار می‌گیرند که این فرآیند ضمن نیاز به انرژی زیاد برای تأمین حرارت موردنظر، مدت‌زمان لازم برای تولید قطعات را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده و منجر به کاهش بازده تولید می‌شود [1].

همین امر سبب شده تا در سال‌های اخیر، تلاش در زمینه بهبود روش‌های متالوژی پودر و همچنین ابداع روش‌های مکمل و جایگزین، به یکی از موضوعات تحقیقاتی موردتوجه محققین در حوزه‌های علمی و صنعتی تبدیل شود. ایده تراکم دینامیکی ذرات پودر با نرخ بارگذاری بالا، به‌عنوان یکی از روش‌های جایگزین روش متالوژی پودر در سال‌های اخیر موردتوجه محققان قرار گرفته است. در این روش مقدار زیادی از انرژی تراکم در یک مدت‌زمان کوتاه، به درون ستون ذرات پودر محبوس در قالب تخلیه می‌شود که این امر باعث ایجاد اتصال بین ذرات پودر می‌گردد. مزیت عمده این روش، حذف عملیات حرارت‌دهی است که موجب صرفه‌جویی در انرژی مصرفی و زمان فرآیند می‌شود. از طرفی نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از این روش موجب بهبود خواص، از جمله افزایش چگالی، استحکام خام بالاتر، توزیع یکنواخت چگالی و دقت ابعادی بیشتر می‌شود [1].

لاروکا و پیروسن در سال 1958، برای نخستین بار یک روش شکل‌دهی دینامیکی مؤثر را جهت تراکم ذرات پودر ابداع کردند که در آن، انرژی حاصل از انفجار مواد منفجره، باعث شتاب گرفتن یک پرتابه و برخورد شدید آن با ذرات پودر درون قالب می‌شد [2]. برجکا در سال 1962، با قرار دادن یک لوله بین منبع انفجار و قالب، روش فوق را بهبود بخشید. از آنجاکه لوله فرصت بیشتری را برای شتاب گرفتن پرتابه فراهم می‌نمود، انرژی حاصل از برخورد پرتابه و ذرات پودر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یافت [3]. در ادامه با توجه به مشکلات دسترسی به مواد منفجره و خطراتی که استفاده از این مواد به همراه داشت، کاربرد انرژی سیال متراکم شده درون یک مخزن به‌جای انرژی حاصل از انفجار، موردتوجه محققان قرار گرفت. این ایده تاکنون در قالب دستگاه تفنگ هیدرولیکی [4]-

درجه خلوص 99 درصد با سه توزیع اندازه دانه متفاوت، شامل اندازه ذرات کمتر از 125 میکرون (پودر A)، اندازه ذرات بین 125 تا 250 میکرون (پودر B) و اندازه ذرات بزرگ‌تر از 250 میکرون (پودر C) مورد استفاده قرار گرفته است.



Fig. 1 General schema of the gas gun

شکل 1 نمای کلی دستگاه تفنگ گازی



Fig. 2 (a) The mold (b) the projectile

شکل 2 (الف) قالب، (ب) پرتابه

شکل 3 تصویر هر سه نوع پودر مورد استفاده را قبل از تراکم نشان می‌دهد که با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی تهیه شده است. دانه‌بندی پودر آلومینیوم با استفاده از دستگاه الک با مش‌بندی متفاوت و مجهز به لرزاننده انجام شده است. برای انجام هر آزمایش، مقدار 10 گرم از پودر آلومینیوم با دانه‌بندی معین، درون قالب ریخته شده و سپس قالب در درون اتاقک بر روی نگه‌دارنده بسته می‌شود. گلوله با سرعت 96 متر بر ثانیه به سنبه برخورد کرده و ذرات پودر را متراکم می‌کند. پس از انجام هر آزمایش برای خارج کردن قطعه متراکم‌شده از درون قالب، از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت 10 تن استفاده شده است. شکل 4 بخشی از نمونه‌های تولیدشده را نشان می‌دهد.

منجر به برای شکل دادن و تف جوشی همزمان پودر استفاده کردند. نتایج نشان داد با استفاده از روش انفجاری دیسک‌هایی از پودر با چگالی 44% چگالی تئوری تولید شد [20].

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر توزیع اندازه ذرات پودرهای فلزی در چگالی و استحکام قطعات تولیدشده به روش تراکم دینامیکی با سرعت بالا است. برای این منظور پودر آلومینیوم با سه اندازه دانه متفاوت به صورت خالص و همچنین به صورت ترکیبی از ذرات با اندازه‌های متفاوت با استفاده از دستگاه تفنگ گازی و با سرعت 96 متر بر ثانیه متراکم می‌شود. به منظور ارزیابی تأثیر روش تراکم دینامیکی بر ریزساختار و استحکام قطعات به دست آمده، به ترتیب از دستگاه میکروسکوپ الکترونی و آزمون فشار قطری استفاده شده است. همچنین در ادامه یک مدل‌سازی ریاضی بر مبنای داده‌های تجربی و با استفاده از روش شبکه‌های عصبی ارائه می‌گردد. مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط این مدل با داده‌های تجربی مقایسه شده و در نهایت دقت مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند تفاوت اثر توزیع اندازه دانه ذرات پودر متراکم شده به روش شبه استاتیکی و دینامیکی را در خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات به دست آمده مشخص کند.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- دستگاه تفنگ گازی

برای انجام آزمایش‌های موردنظر از سامانه تفنگ گازی موجود در موسسه آموزش عالی احرار رشت استفاده شده است که نمای کلی آن در شکل 1 نشان داده شده است. همچنین در شکل 2 پرتابه و قالب مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. مطابق شکل 2، پرتابه دوقسمتی به جرم 562 گرم و قطر 40 میلی‌متر شامل یک قسمت فلزی از جنس فولاد ضد زنگ است که به منظور کاهش اصطکاک آن با جداره داخلی لوله تفنگ، این قسمت درون یک پوشش از جنس ارتالون قرار گرفته است. همچنین قالب استوانه‌ای شکل از همان جنس پرتابه ساخته شده و با قطر داخلی 20 میلی‌متر بر روی یک قاب نگه‌دارنده مهار شده است. به منظور حفظ ایمنی در حین آزمایش، پرتابه پس از خروج از لوله تفنگ وارد یک اتاقک شده و در درون این محفظه، با ضربه به قالب اصابت می‌کند. به منظور اندازه‌گیری سرعت پرتابه در لحظه برخورد با سنبه، از یک سرعت‌سنج لیزری استفاده شده است.

### 2-2- نحوه انجام آزمایش‌ها

در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، پودر آلومینیوم با

آن‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی استحکام نمونه‌های تولید شده، از آزمایش فشار قطری استفاده می‌شود. دستگاه بکار رفته برای این منظور، دستگاه STM-250 است که از یک فک ثابت پایینی و یک فک متحرک بالایی تشکیل شده است. نمونه‌های تولید شده به صورت قطری بین دو فک دستگاه قرار گرفته و با فشار دکمه، فک متحرک بالایی با نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را تحت فشار قرار می‌دهد. افزایش نیروی فشاری توسط فک بالایی تا زمانی ادامه می‌یابد که قطعه دچار شکست شود. نیروی متناظر با شروع ترک در قطعه، به عنوان نیروی شکست قطعه ثبت می‌شود. با داشتن  $F$  (نیروی شکست)،  $D$  (قطر نهایی قطعه)،  $h_f$  (ارتفاع نهایی قطعه)،  $\sigma_t$  (استحکام کششی قطعه از رابطه (1) محاسبه می‌شود [19]:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dh_f} \quad (1)$$

همچنین به منظور بررسی تأثیر روش تراکم دینامیکی در سرعت‌های تراکم بالا بر ریزساختار نمونه‌های تولید شده، تصاویری از قسمت‌های مختلف نمونه با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی تهیه شده است.

### 3- مدل‌سازی با استفاده از روش شبکه عصبی

تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در پدیده تراکم دینامیکی و تغییرات غیرخطی این پارامترها در حین تراکم از یک سو و دشوار بودن اندازه‌گیری و تعیین ثوابت تجربی موجود در مدل‌های تحلیلی از سوی دیگر، عواملی هستند که سبب می‌شوند ارائه مدل‌های ساختاری مرتبط با این پدیده، با پیچیدگی‌های فراوانی همراه باشد. این پیچیدگی سبب می‌شود تا ضرورت استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی به عنوان یک راهکار مناسب در جهت پیش‌بینی خواص فیزیکی قطعات حاصل از تراکم دینامیکی مطرح گردد.

در این تحقیق از روش مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی در فرآیند تراکم دینامیکی پودر در نرخ بارگذاری بالا جهت پیش‌بینی مقادیر چگالی قطعات متراکم شده استفاده شده است. مدل‌سازی عددی به روش شبکه‌های عصبی، یکی از ابزارهای قدرتمند ریاضی است که با الهام از ساختار شبکه‌های عصبی مغز انسان به ارتباط بین یک سری از داده‌های ورودی پی برده و بر اساس آن مقادیر خروجی را پیش‌بینی می‌کند [21]. شکل 5- الف اساس کار این روش را نشان می‌دهد. قسمت الف این شکل ساختار شبکه عصبی مغز انسان را نشان می‌دهد. همان‌طور که

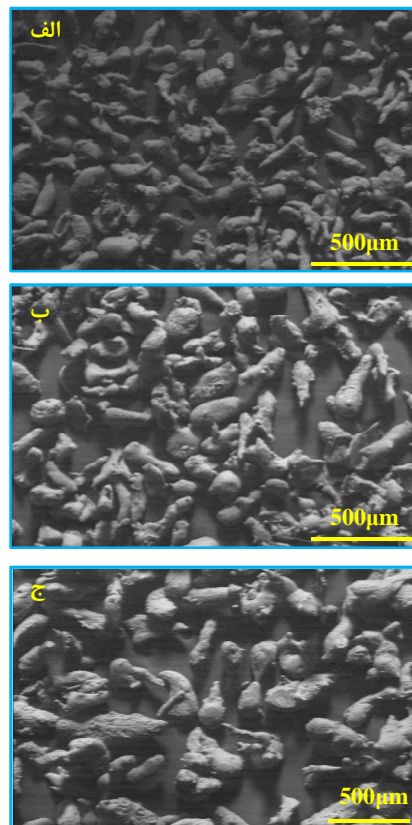


Fig. 3 Microstructure of the Al powder particles before compaction (a) powder A, (b) powder B and (c) powder C

شکل 3 ریزساختار ذرات پودر Al قبل از تراکم (الف) پودر A، (ب) پودر B و (ج) پودر C

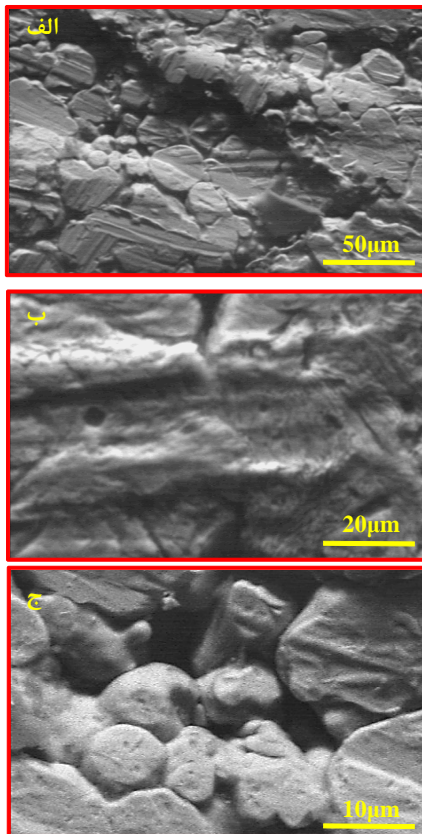


Fig. 4 Fabricated samples by dynamic compaction method

شکل 4 نمونه‌های تولید شده به روش تراکم دینامیکی

به منظور اندازه‌گیری چگالی نهایی قطعات تولید شده، از آنجا که قطر کلیه نمونه‌ها یکسان است، ابتدا حجم نمونه با اندازه‌گیری ارتفاع نهایی محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه مقداری از پودر اولیه در حین ریختن به درون قالب و یا در اثر چسبندگی به سطح قالب هدر می‌رود، جرم نهایی قطعه، اندازه‌گیری شده و با تقسیم جرم بر حجم، چگالی نهایی قطعه محاسبه می‌شود. در ادامه چگالی به دست آمده از این روش، بر چگالی تئوری آلومینیم تقسیم می‌شود تا چگالی نسبی آنها تعیین گردد. چگالی قطعات تولید شده بر حسب چگالی نسبی

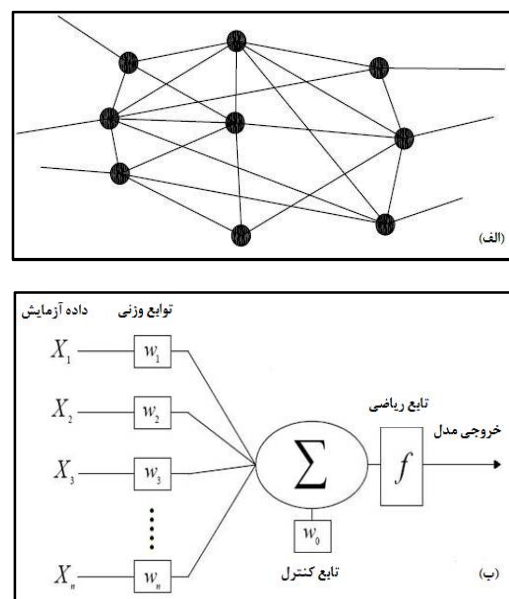
اتصال بین آن‌ها در مرز دانه‌ها به خوبی صورت گرفته است. از طرفی در ساختار نمونه ذراتی با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر از اندازه اولیه (در مقایسه با شکل 3) مشاهده می‌شوند. علت این امر برخورد شدید ذرات پودر با یکدیگر در اثر عبور امواج فشاری است که باعث خرد شدن ذرات پودر می‌گردد.



**Fig 6.** Microstructures of the samples after dynamic compaction (a) Powder A (b) Powder B (c) Powder C  
شکل 6 ریزساختار نمونه‌ها بعد از تراکم دینامیکی (الف) پودر A (ب) پودر B (ج) پودر C

نحوه اتصال بین ذرات پودر که در اثر پدیده قفل‌شدگی مکانیکی (جوش سرد) پدید می‌آید نیز در شکل 6 مشخص است. این پدیده در اثر افزایش موضعی حرارت در لایه سطحی ذرات پودر که منجر به شکسته شدن لایه اکسید حول ذرات می‌شود، به وجود می‌آید. در واقع عبور موج تنش فشاری از درون ذرات پودر، هم از جهت برخورد شدید ذرات با یکدیگر و افزایش اصطکاک در سطوح برخورد و هم از جهت برخورداری از انرژی زیاد، باعث افزایش حرارت در پیرامون پودر می‌گردد. این افزایش حرارت باعث بروز پدیده نرم‌شوندگی موضعی و تغییر شکل پلاستیک در سطح ذرات پودر شده و آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند. لازم به ذکر است که سرعت انتشار موج در لحظه

ملاحظه می‌شود، هر سلول عصبی به نام نرون، اطلاعات ورودی را پس از دریافت و پردازش از طریق رشته‌های عصبی به نام سیناپس، به سایر نرون‌ها منتقل می‌کند. تبادل اطلاعات در این شبکه، منجر به کشف رابطه بین آن‌ها و فرآیند یادگیری توسط مغز می‌گردد. مطابق قسمت شکل 5-ب، در مدل‌سازی ریاضی به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، ابتدا یک مجموعه از جفت داده‌های ورودی و خروجی به‌عنوان داده آموزشی، در نظر گرفته می‌شوند. سپس داده‌های آموزشی به‌عنوان مقادیر ورودی  $X_1, X_2, \dots, X_n$  در ضرایب وزنی  $w_1, w_2, \dots, w_n$  ضرب می‌شوند. ضرایب وزنی در واقع ضرایب ثابتی هستند که در هر نرون، بر روی داده‌های ورودی اعمال می‌شوند. نتیجه حاصل از عملیات وزن‌دار کردن داده‌ها، با یک پارامتر به نام تابع کنترل  $w_0$  جمع می‌شود. تابع کنترل در واقع یک تابع ریاضی است که ضرایب وزنی را کنترل می‌کند تا خروجی حاصل تا حد ممکن به خروجی واقعی نزدیک باشد.



**Fig. 5** Neural network structure (a) Human brain (b) Mathematical modeling  
شکل 5 ساختار شبکه عصبی (الف) مغز انسان (ب) مدل‌سازی ریاضی [22, 21]

#### 4- نتایج و بحث

##### 4-1- بررسی ریز ساختار نمونه

شکل 6 تصاویر ریزساختاری قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودرها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود فضاهای خالی اندکی بین ذرات دیده می‌شود که این نشان‌دهنده چگالی بالای نمونه‌ها است. همچنین تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر و



بررسی نتایج ارائه شده در جدول 2 نشان می‌دهد که با افزایش سهم پودر C با اندازه دانه بزرگ‌تر، چگالی قطعات تولیدشده افزایش یافته است. علت این امر، قرارگیری ذرات پودر B با اندازه کوچک‌تر در فضاهای خالی بین ذرات بزرگ‌تر پودر C است که منجر به کاهش تخلخل قطعه و افزایش چگالی آن می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که بین توزیع اندازه ذرات پودر و استحکام قطعه حاصل رابطه مشخصی وجود ندارد.

اتصال بین ذرات پودر و تبدیل آن به یک ماده جامد به روش متالورژی پودر، شامل سه مرحله جابجایی مجدد ذرات در فشارهای پایین، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در فشارهای متوسط و در نهایت کار-سختی و تکه تکه شدن در فشارهای تراکم بالاست [19]. بر این اساس مشاهده می‌گردد که مکانیسم غالب در پدیده تراکم دینامیکی با استفاده از سامانه تفنگ گازی نیز شامل سه مرحله فوق است. این سه مرحله را به این صورت می‌توان از لحاظ فیزیکی تعبیر نمود که در مرحله اول افزایش ناگهانی فشار ناشی از بارگذاری ضربه‌ای و حرکت سنبه به سمت پودر داخل قالب، سبب جابجایی ذرات پودر و برخورد شدید این ذرات با یکدیگر می‌گردد.

در پودر گروه B به دلیل قرار گرفتن ذرات پودر در فضاهای خالی بین یکدیگر و برقراری نیروهای مولکولی بین ذرات مجاور، افزایش قابل ملاحظه‌ای در استحکام نمونه صورت می‌گیرد. در مرحله دوم از آنجا که فضایی برای جابجایی و برخورد بین ذرات پودر باقی نمانده است، فشار تراکم سبب افزایش اصطکاک و حرارت موضعی در سطح ذرات شده و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک آغاز می‌شود. این امر تأثیر چندانی بر روی افزایش چگالی ندارد ولی از آنجا که سبب ایجاد اتصال بین ذرات پودر می‌گردد، تأثیر آن بر افزایش استحکام قابل ملاحظه است. در مرحله سوم، بروز پدیده سخت-شوندگی در ذرات پودر باعث می‌شود که ادامه روند تغییر شکل پلاستیک ذرات، در فشار تراکم بالاتری رخ دهد.

این در حالی است که در پدیده تراکم دینامیکی در سرعت‌های بالا، سرعت انتشار امواج تنش از سرعت انتشار صوت از درون ذرات پودر فراتر رفته و حالت شوک پدید می‌آید. 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 ذوب شدن موضعی در لایه سطحی ذرات پودر و جوش خوردن آنها به یکدیگر می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که روند افزایش چگالی و استحکام در مورد آن کاملاً یکنواخت باشد. [19].

برخورد از نظر تجربی قابل اندازه‌گیری نیست اما شواهد موجود در شکل 6 که پدیده جوش سرد و از بین رفتن لایه اکسید را نشان می‌دهد می‌تواند تأییدی بر بالا بودن سرعت انتشار موج تنش از سرعت انتشار صوت باشد [19].

#### 4-2- چگالی و استحکام

جدول 1 نتایج حاصل از چگالی و استحکام قطعات حاصل از تراکم سه نوع پودر آلومینیوم را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج ارائه‌شده در این جدول مشخص می‌گردد که با افزایش توزیع اندازه ذرات پودر، چگالی قطعه افزایش می‌یابد، به طوری که پودر C و پودر A به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار چگالی نسبی هستند. همچنین پودر B و پودر A به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار استحکام کششی می‌باشند. از آنجا که چگالی و استحکام مهم‌ترین مشخصه‌های تعیین‌کننده کیفیت قطعات تولیدشده به روش تراکم پودر محسوب می‌شوند، به منظور بررسی اثر ترکیب کردن ذرات پودر با توزیع اندازه‌های متفاوت بر روی خواص قطعات مرکب حاصل، ذرات پودر C که بالاترین میزان چگالی را دارند و نیز پودر B که بیشترین مقدار استحکام را دارند، با نسبت‌های وزنی متفاوت با یکدیگر ترکیب شده و تحت تراکم دینامیکی با همان سرعت و انرژی به کاررفته در آزمون‌های قبلی قرار می‌گیرند. جدول 2 نتایج حاصل از ترکیب این دو پودر با یکدیگر را نشان می‌دهد.

جدول 1 چگالی نسبی و استحکام نمونه‌ها پس از تراکم دینامیکی ذرات

Table 1. Relative density and strength of the samples after the dynamic compaction of particles

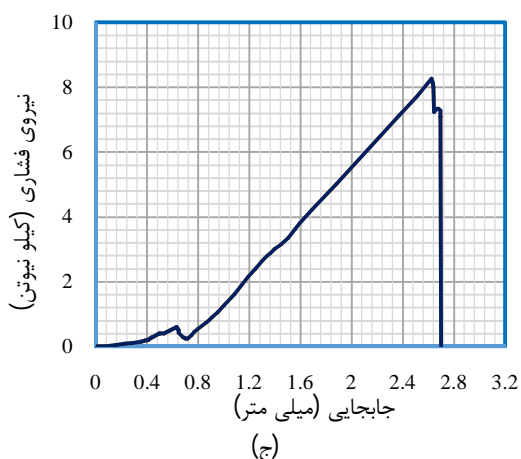
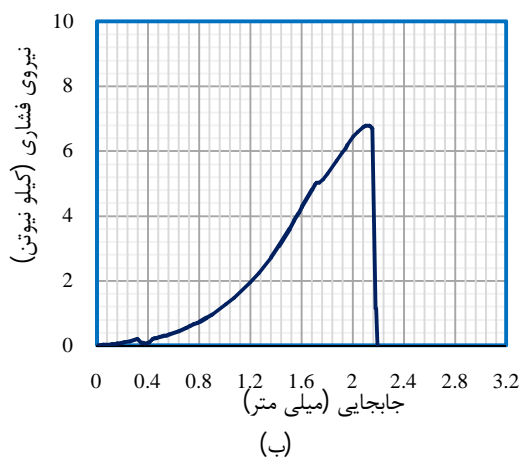
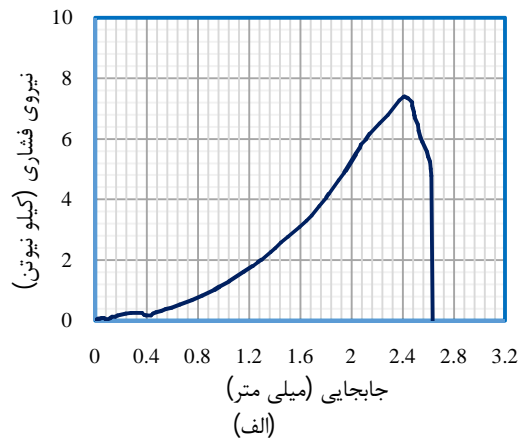
نمونه	پودر	اندازه ذرات ( $\mu\text{m}$ )	چگالی نسبی (%)	استحکام (Mpa)
1	A	-125	96/67	18/74
2	B	+125 - 250	97/61	34/27
3	C	+250	99/64	27/29

جدول 2 چگالی نسبی و استحکام نمونه‌های حاصل از مخلوط کردن پودرهای B و C

Table 2. Relative density and strength of the samples obtained by mixing powders B and C

نمونه	نسبت پودر (%) B	نسبت پودر (%) C	چگالی نسبی (%)	استحکام (Mpa)
4	90	10	97/86	26/41
5	80	20	98/24	33/49
6	70	30	98/33	24/32
7	60	40	98/88	35/11
8	50	50	99/07	30/35

توسط روش شبکه عصبی، از انطباق بسیار مناسبی با مقادیر تجربی برخوردار هستند که این امر کارایی روش شبکه عصبی را در مدل سازی پدیده تراکم دینامیکی پودر با سرعت بالا نشان می دهد.



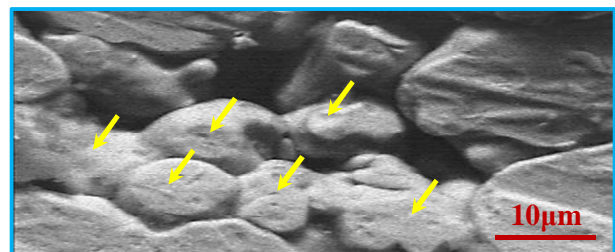
**Fig.8** Force-displacement diagrams of compression test for compacted samples according to Table 1 (a) Powder A (b) Powder B (c) Powder C  
**شکل 8** نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار قطری برای نمونه های متراکم شده مطابق جدول 1 (الف) پودر A (ب) پودر B و (ج) پودر C

همچنین شکل 7 ریزساختار نمونه 4 که حاصل مخلوط کردن 90 درصد وزنی از پودر B با 10 درصد وزنی از پودر C است را نشان می دهد. نکته مشهود در این شکل توزیع غیریکنواخت چگالی و همچنین توزیع ناهمگون ذرات با اندازه های مختلف در ساختار قطعه است. موجی از تنش فشاری از سمت چپ به راست ساختار عبور می کند. همان طور که ملاحظه می شود در راستای عبور موج تنش، چگالی کاهش یافته و تعداد ذرات با اندازه بزرگ تر، کم تر می شود. علت توزیع غیریکنواخت چگالی، اصطکاک بین ذرات پودر با دیواره قالب است که منجر به اتلاف انرژی امواج تنش فشاری در حین عبور از ستون ذرات پودر می شود. به نظر می رسد علت توزیع ناهمگون اندازه ذرات در ساختار نمونه نیز به این نکته برمی گردد که ذرات با اندازه کوچک تر، به دلیل برخورداری از وزن کم تر، در اثر عبور امواج تنش با ذرات بزرگ تر و سنگین تر برخورد کرده و همراه با پیشانی موج تنش جابجا می شوند.

شکل 8 نمونه ای از نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار قطری را برای نمونه های پودری متراکم شده مطابق جدول 1 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.

#### 3-4- مدل سازی

شکل 9 نتایج حاصل از مقایسه بین منحنی مدل سازی شده به روش شبکه عصبی را با نتایج تجربی، برای ترکیب پودرهای B و C با درصد وزنی متفاوت نشان می دهد.



**Fig 6.** Microstructure of sample 4 after compaction

**شکل 7** ریزساختار نمونه 4 بعد از تراکم

همان طور که در شکل ملاحظه می شود، مقادیر پیش بینی شده

استفاده از روش شبکه‌های عصبی با نتایج تجربی به دست آمده، انطباق بسیار مناسبی را نشان می‌دهد؛ بنابراین با توجه به ماهیت پیچیده فرآیند تراکم دینامیکی و دشواری روش‌های تحلیلی برای مدل‌سازی آن، روش شبکه‌های عصبی می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد جهت مدل‌سازی این پدیده مورد استفاده قرار گیرد.

## 6- مراجع

- [1] P. Skoglund, M. Kezjalman. "High Density PM Components by High Velocity Compaction" *PM TEC* 2002.
- [2] T. Z. Blazynski, Explosive Welding, Forming and Compaction. Springer, Netherlands, 2012.
- [3] E. W. LaRocca, J. Pearson, Explosive press for use in impulsive loading studies. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 29, No.10, pp. 848-851, 1958.
- [4] R. J. Brejcha, S. W. McGee, Compaction with a 0.38 cal. Blank. *Am Machinist*, Vol. 106, pp. 63-65, 1962.
- [5] B. Azhdar, B. Stenberg, L. Kari, Development of a high-velocity compaction process for polymer powders. *Polymer Testing*, Vol. 24, No.7, pp. 909-919, 2005.
- [6] J. Z. Wang, X. H. Qu, H. Q. Yin, M. J. Yi, X. J. Yuan, High velocity compaction of ferrous powder. *Powder Technology*, Vol. 192, No.1, pp. 131-136, 2009.
- [7] H. Yin, H. Li, X. Qu, M. Khan, S. Ali, M. Z. Iqbal, Compaction of Ti-6Al-4V powder using high velocity compaction technique. *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 479-483, 2013.
- [8] D. J. Benson, W. J. Nellis, Dynamic compaction of copper powder: Computation and experiment. *Applied Physics Letters*, Vol. 65, No.4, pp. 418-420, 1994.
- [9] T. J. Vogler, M. Y. Lee, D. E. Grady, Static and dynamic compaction of ceramic powders. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, No. 2, pp. 636-658, 2007.
- [10] D. A. Fredenburg, N. N. Thadhani, T. J. Vogler, Shock consolidation of nanocrystalline 6061-T6 aluminum powders. *Materials Science and Engineering*, Vol. 527, No. 15, pp. 3349-3357, 2010.
- [11] C. A. Braun, M. Schumaker, J. Rice, P. Borg, Comparison of Static and Dynamic Powder Compaction: Experiment and Simulation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 138, No. 1, 011003, 2016.
- [12] H. Babaei, T. M. Mostofi, M. Alitavoli, N. Namazi, A. Rahmanpoor, Dynamic compaction of cold die aluminum powders. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 109-124, 2016.
- [13] M. Dzmity, B. Klimenty, A porous materials production with an electric discharge sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 30, No. 59, pp. 67-77, 2016.
- [14] A. Vivek, J. D. DeFouw, G. S. Daehn, Dynamic

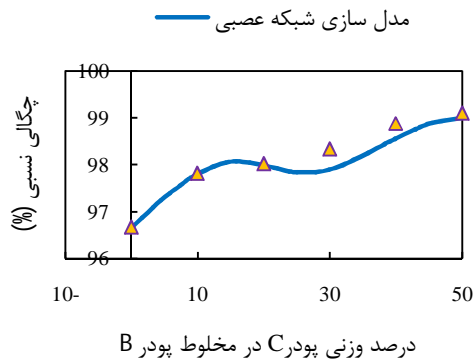


Fig. 9 Comparison between modeling and experimental values

شکل 9 مقایسه بین نتایج مدل‌سازی و مقادیر تجربی

## 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر توزیع اندازه ذرات پودرهای فلزی بر خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات تولیدشده به روش تراکم دینامیکی در محدوده سرعت‌های بالا، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:

- مخلوط کردن ذرات پودرهای فلزی با توزیع اندازه دانه متفاوت، می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای کنترل خواص قطعات تولیدشده به روش تراکم دینامیکی محسوب شود در حالی که در روش تراکم استاتیکی اندازه ذرات پودر یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خواص مختلف قطعات همچون چگالی، استحکام و سختی محسوب می‌شود.

- نتایج حاصل از مخلوط کردن ذرات پودر با اندازه متفاوت نشان می‌دهد افزایش سهم ذرات با اندازه بزرگ‌تر در مخلوط پودر، منجر به افزایش چگالی قطعه حاصل می‌شود اما تأثیر مشخصی بر استحکام آن‌ها ندارد.

- عبور موج تنش فشاری از ستون ذرات پودر در روش تراکم دینامیکی با سرعت بالا، باعث خرد شدن ذرات پودر و افزایش چگالی قطعه می‌گردد و منجر به تولید قطعاتی با ریزساختار کاملاً یکنواخت می‌شود. همچنین در اثر این برخورد، ذرات ریزتر با سرعت بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر در پیشانی موج تنش جابجا می‌شوند که این امر موجب توزیع غیریکنواخت اندازه ذرات پودر در ساختار قطعات حاصل می‌گردد.

- روش تراکم دینامیکی با سرعت بالا، باعث افزایش موضعی حرارت در سطح ذرات پودر، شکسته شدن لایه اکسید حول ذرات و بروز پدیده نرم شدگی موضعی شده که مجموعه این عوامل سبب افزایش جریان پلاستیک و ایجاد اتصالات مستحکم بین ذرات پودر می‌گردد.

5- مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی چگالی نهایی قطعات با



- Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 357-366, 2015 (In Persian).
- [19] N. Namazi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, H. Babaei, F. Abdoli Kamali, R. Rajabiehfard, 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).
- [20] M. Ganji, et al., Numerical and Experimental Investigation of Explosive Powder Compaction Process. *Journal of Energetic Materials*, Vol. 10, No. 3, pp. 59-67, 2016 (in Persian).
- [21] A. Canakci, S. Ozsahin, and T. Varol, Modeling the influence of a process control agent on the properties of metal matrix composite powders using artificial neural networks. *Powder technology*, Vol. 228, pp. 26-35, 2012.
- [22] V. Nooraefar, Multi-objective optimum design of four-bar linkage with joint clearance for path generation with parametric uncertainty". Master's Thesis in Applied Mechanics, University of Guilan, 2010.
- compaction of titanium powder by vaporizing foil actuator assisted shearing. *Powder Technology*, Vol. 254, pp. 181-186. 2014.
- [15] T. S. Yeh, M. D. Sacks, Effect of particle size distribution on the sintering of alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 71, No. 12, pp. 484-487, 1988.
- [16] M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. R. Baharvandi, The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites made by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No14, pp. 5387-93, 2009.
- [17] R. Bjørk, V. Tikare, H. L. Frandsen, N. Pryds, The effect of particle size distributions on the microstructural evolution during sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 96, No1, pp. 103-110, 2013.
- [18] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, M. Namdari, Experimental investigation and model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading,