



Experimental Investigation of Dynamic Density of Aluminum Powder under High Speed Loading

Behzad Mohammad Khani Haji KhajeLu^{1*}, Mojtaba Maleki²

^{1,2}Lecturer, Faculty of Chamran, Ahar Branch, Technical and Vocational University (TVU), Ahar, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.12.2020

Revised: 06.04.2020

Accepted: 06.22.2020

Keyword:

Impact loading
Dynamic powder density
Gas launcher
Aluminum powder
Neural network

***Corresponding Author:**

Behzad Mohammad Khani Haji
KhajeLu

Email:

Behzad.mohammadkhani7@gmail.com

ABSTRACT

The present paper deals with experimental and numerical investigation of the mechanical properties of a piece produced by a dynamic powder compaction process under high-rate impact loading. Experimental tests are performed on metal powders made of aluminum by a gas launcher system. To validate the results obtained from the presented mathematical functions, we compare the results of the neural network model and the experimental data. In examining the error of experimental data and prediction based on the squared mean of the errors and the coefficient of determination show that the results obtained from the mathematical functions provide mathematical models for the final properties of the segment under optimal impact loading.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفاهان

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۱، ۱۶۳-۱۴۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2020.112762

20.1001.1.23829796.1399.17.1.9.1



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

مطالعه تجربی و عددی تراکم دینامیکی پودر آلومینیوم تحت بارگذاری با سرعت بالا

بهزاد محمدخانی حاجی‌خواجهلو^{۱*}، مجتبی ملک^۲

۱-۲- مدرس، دانشکده شهید چمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، اهر، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
مقاله حاضر به بررسی تجربی و عددی خواص مکانیکی قطعه تولیدشده با فرایند تراکم دینامیکی پودر تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ بالا می‌پردازد. تست‌های تجربی روی پودرهای فلزی از جنس آلومینیوم توسط سامانه پرتابگر گازی انجام گرفته است. در بررسی تجربی تأثیرپذیری چگالی، مقاومت نیروی فشار از نظر اندازه دانه‌بندی، در سطوح انرژی متفاوتی ارائه شده است که در این راستا پودر آلومینیوم خالص در سه اندازه متفاوت به کار رفته است. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از توابع ریاضی، به مقایسه بین نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی و داده‌های تجربی پرداخته‌ایم. بررسی خطای داده‌های تجربی و پیش‌بینی بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها و ضریب تبیین نشان می‌دهد نتایج به‌دست‌آمده از توابع ریاضی برای خواص نهایی قطعه تحت بارگذاری ضربه‌ای، مطلوب است.	دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲
	کلید واژگان: بارگذاری ضربه‌ای تراکم دینامیکی پودر پرتابگر گازی پودر آلومینیوم شبکه عصبی
	*نویسنده مسئول: بهزاد محمدخانی حاجی‌خواجهلو پست الکترونیکی: Behzad.mohammadkhani7@gmail.com



© 2020 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

صنعت شکل‌دهی پودرهای فلزی یکی از صنایع شکوفا و درخشان در تولید قطعات با اشکال نسبتاً پیچیده است. محصولات حاصل از این روش اغلب از شیوه‌دانه‌بندی مطلوبی برخوردارند. همچنین این روش دستیابی به اجسام مرکب را ممکن می‌سازد. در متالورژی پودر، مراحل فرایند دارای انرژی مصرفی اندک است، اتوماتیک بوده، میزان بهره‌گیری از مواد اولیه بالا و هزینه‌ها کمتر است؛ از این رو آهنگ رشد و گسترش آن در مقایسه با دیگر فرایندها سریع‌تر است. در این فناوری نه تنها خواص شیمیایی مواد و پارامترهای عملیات حرارتی بلکه ریزساختارهای قطعه از جمله تخلخل نیز کنترل‌شدنی است. مهم‌ترین کاربردهای این روش، توانایی ترکیب کنترل‌شده پودر فلزات و مواد مختلف، توانایی تولید قطعات انبوه با اشکال هندسی پیچیده و ضایعات بسیار ناچیز است. وجود تخلخل - به‌رغم مواد رایج - از جمله ویژگی‌های منحصربه‌فرد و مفید این روش است. تخلخل روشی برای کاهش وزن در صنایع هوایی، کنترل چگالی، استحکام نهایی قطعه و روشی برای تولید یاتاقان‌های خود روان است.

رشد روزافزون دامنه کاربرد متالورژی پودر در سال‌های اخیر موجب پیدایش روش‌ها و شیوه‌های نوینی برای بهبود خواص مکانیکی قطعات ساخته‌شده از پودر فلزات شده است. شکل‌دهی دینامیکی یکی از روش‌هایی است که موجب بهبود خواص از جمله افزایش چگالی، استحکام خام بالاتر، توزیع یکنواخت چگالی و دقت ابعادی بیشتر می‌شود [۱]. در اوایل قرن بیستم میلادی، ناتوانی در تولید مذاب یکپارچه از کوره‌ها موجب استفاده صنعتی از روش تراکم پودر برای تولید کارهای فلزی شد. این روش نیز شکوفایی خود را مدیون تولید لامپ رشته‌ای تنگستن است. امکان تولید قطعات در شمار بالا با استفاده از روش تراکم پودر، موجب استفاده صنعتی از این روش شده است. قطعات تولیدی با استفاده از این روش در صنایع اتومبیل‌سازی، لوازم خانگی و الکترونیک کاربرد دارند که موجب رشد روزافزون استفاده از این حوزه فناوری شده است.

القرشی و همکاران با آزمایش روی مواد پودری با اندازه دانه‌های متفاوت، به ارائه مدلی نظری بر اساس حل متقارن تغییر شکل بزرگ پرداختند. آزمایش‌های انجام‌شده منجر به محاسبه ضریب اصطکاک بین ظروف و ذرات و همچنین بیان رابطه‌ای برای پیشگویی استحکام نهایی قطعه ساخته‌شده از مواد پودری شد [۲].

پوکلین و همکاران نیز برای درک بهتر رابطه بین نوع پودر، فشار تراکم و استحکام نهایی قطعه، دو نوع پودر آهنی با ساختار متفاوت را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مواد با ساختار متخلخل نسبت به مواد تشکیل‌شده از ذرات کروی، استحکام نهایی بهتری دارند [۳].

استاسیاک و همکاران تأثیر فشار ماکزیمم و سرعت تغییر شکل بر مدول الاستیسیته را تخمین زدند. آن‌ها این نتیجه را با بررسی اثر فشرده‌سازی چسب‌های مورد استفاده در صنعت مانند سنگ آهک، ریزسلولز و بنتونیت در لوله استوانه‌ای با نیروی تک‌محوری به دست آوردند [۴].

کدهیم و همکاران با بررسی عددی حالت پایدار ماده در حین جریان تراکم روی استوانه با روش تفاضلات محدود، مدل ساختاری دقیقی را برای توزیع فشار و چگالی در طول فرایند تراکم ارائه دادند [۵].

در آزمایش‌های انجام‌شده توسط اژدر و همکارانش، از پودر با اندازه‌های متفاوت تحت سطوح انرژی و سرعت‌های مختلف برای بررسی فرایند شکل‌دهی پودرهای پلیمری با سرعت بالا استفاده شده است. آن‌ها با تمرکز روی ویژگی‌های تراکم و استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی به تحلیل و بررسی ریزساختارهای قطعه حاصل‌شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مرحله نخست تراکم نسبت به مرحله دوم آن تأثیر بیشتری بر استحکام نهایی ماده دارد [۶].

ظهور و همکارانش با آزمایش روی پودر تنگستن از دو روش تراکم پودر انفجاری زیر آب و بدون آب به آستانه تحمل تنگستن متالورژی تحت موج انفجاری دست یافتند. آن‌ها همچنین با مقایسه تراکم انفجاری زیر آب با دیگر روش‌های

متالورژی پودر انجام گرفته روی پودر تنگستن به این نتیجه رسیدند که با روش تراکم انفجاری زیر آب می توان به بالاترین خواص و مکانیکی ممکن از پودر دست یافت [۷؛ ۸].

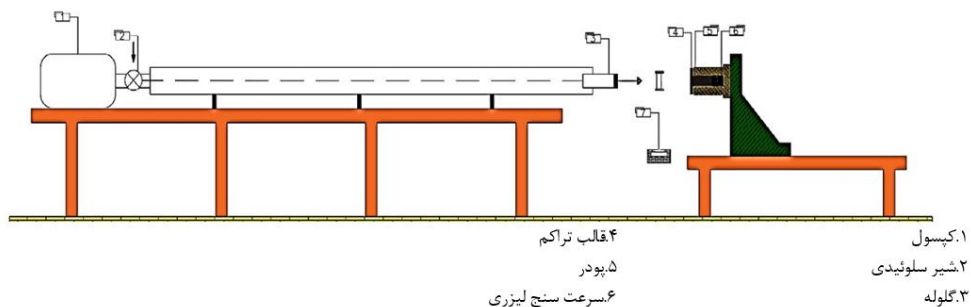
در جدیدترین تحقیقات انجام شده با سامانه چکش پرتابه‌ای، بابایی و همکارانش به بررسی تجربی و تحلیل تراکم پودر آلومینیوم با سرعت پایین پرداختند. نتیجه کار این بود که با افزایش انرژی، چگالی نیز افزایش می‌یابد [۹]. تحقیقات صورت گرفته در زمینه تراکم دینامیکی پودرهای فلزی اغلب در حوزه شبه‌استاتیکی و نرخ اعمال بارگذاری متوسط بوده است و تاکنون در پژوهش‌های دینامیکی به بررسی پارامترهای مؤثر برای دستیابی به نرخ انرژی بالا در فرایند شکل‌دهی پرداخته نشده است. هدف از این بررسی، بهبود خواص مکانیکی قطعه با فرایند تراکم پودر با سرعت بالاست که در بخش تجربی به تأثیرپذیری چگالی و مقاومت فشاری قطعه تولید شده از نظر دانه‌بندی پرداخته می‌شود. پودر مورد استفاده در این فرایند آلومینیوم خالص است. دلیل به‌کارگیری روش دینامیکی در شکل‌دهی پودرهای فلزی، توزیع یکنواخت چگالی با وارد کردن انرژی زیاد در بازه زمانی کم، و بی‌نیازی به گرما با توجه به آدیباتیک بودن تراکم است.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر اندازه ذرات پودرهای فلزی در چگالی و استحکام قطعات تولید شده به روش تراکم دینامیکی با سرعت بالاست. 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 پرتابگر گازی و با سرعت ۱۱۰ متر بر ثانیه مترآکم می‌شود. برای 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، مدل‌سازی ریاضی بر مبنای داده‌های تجربی و با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه می‌شود. مقادیر پیش‌بینی شده توسط این مدل با داده‌های تجربی مقایسه شده و در نهایت دقت مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

بررسی تجربی

دستگاه تفنگ گازی

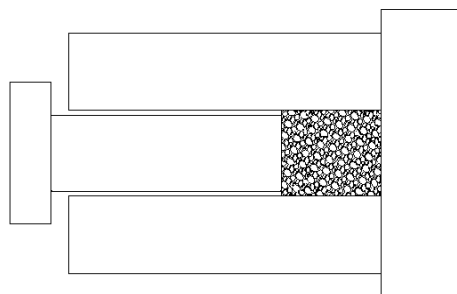
آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و قالب تراکم پودر مورد استفاده و همچنین تجهیزات مربوط به انجام فرایند تراکم پودر در دستگاه پرتابگر گازی از جمله مراحل هستند که باید پیش از انجام آزمایش مورد بررسی قرار گیرند. شکل شماره ۱ نمای از دستگاه پرتابگر گازی را نشان می‌دهد. در آزمایش انجام گرفته، از پودر آلومینیوم خالص با دانه‌بندی ۱۲۷-، ۲۵۴-۱۲۷، +۲۵۴ میکرون و شکل سوزنی و استوانه با درجه خلوص ۹۰ درصد استفاده شده است. تراکم‌پذیری پودر آلومینیوم با استفاده از پرتابگر گازی در فشار و سرعت‌های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته است. در روش تجربی، برای تولید قطعات حاصل از فرایند تراکم، ۱۵ گرم از پودر انتخابی در داخل سیلندر و پیستون استوانه‌ای ریخته شده و تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط پرتابه قرار گرفته است. بدین ترتیب انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و به صورت ضربه به پودر موجود در سیلندر وارد شده و پودر را متراکم می‌کند. برای خارج کردن نمونه تولید شده از داخل سیلندر، از جک هیدرولیکی استفاده می‌شود که با وارد کردن نیروی یکنواخت موجب سالم ماندن قطعه و همچنین یکنواخت ماندن چگالی می‌شود. همچنین برای سهولت در خارج کردن قطعه (پودر) از سیلندر، از روان‌کننده برای کاهش اصطکاک بین جداره سیلندر و قطعه تولید شده استفاده شده است. شکل شماره ۲ پرتابه و قالب تراکم پودر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. پرتابه‌گر گازی و قالب تراکم پودر



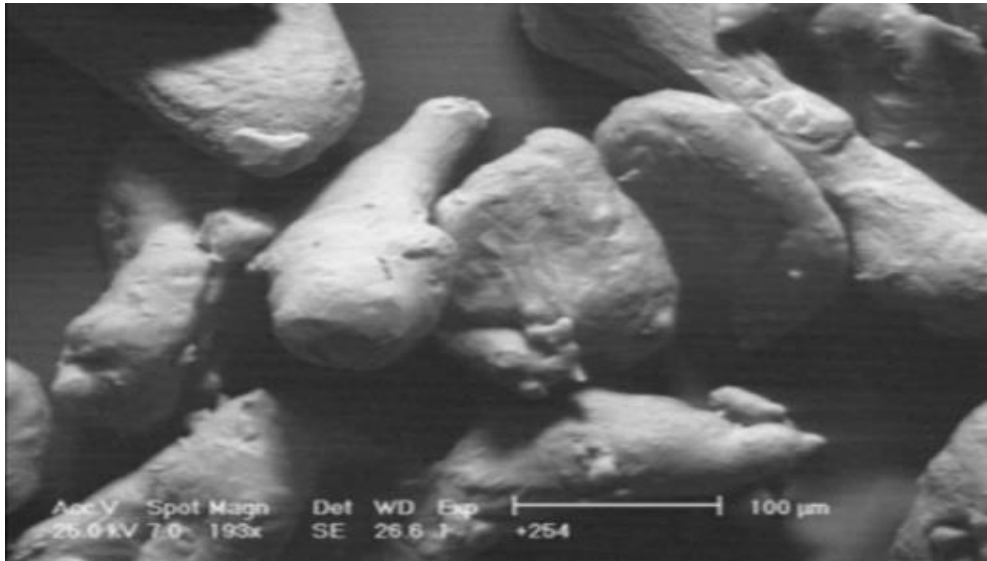
شکل ۲. ب. پرتابه فلزی



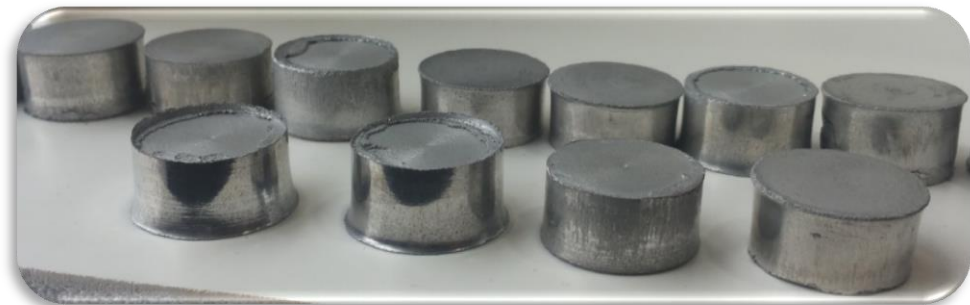
شکل ۲. الف) قالب تراکم پودر

شیوه انجام آزمایش

در آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق، پودر آلومینیوم با خلوص ۹۰ درصد با سه توزیع اندازه دانه متفاوت شامل کمتر از ۱۲۷ میکرون (پودر A)، بین ۱۲۷ تا ۲۵۴ میکرون (پودر B) و بزرگ‌تر از ۲۵۴ میکرون (پودر C) مورد استفاده قرار گرفته است. شکل شماره ۳ تصویر ذرات پودر آلومینیوم را پیش 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 ۱۵ گرم از پودر آلومینیوم با دانه‌بندی معین را درون قالب ریخته و درون اتاقک بر روی نگه‌دارنده بسته می‌شود. سپس گلوله با سرعت ۱۱۰ 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 با ظرفیت ۲۰ تن استفاده شده است. شکل شماره ۴ بخشی از نمونه‌های تولیدشده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ذرات میکروسکوپی پودر آلومینیوم



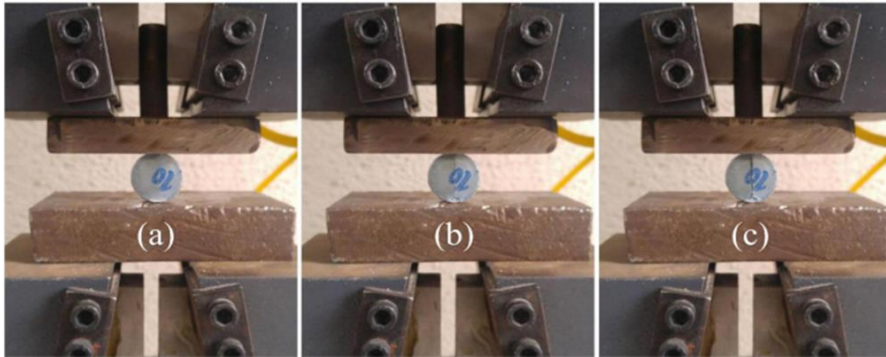
شکل ۴. قطعات ساخته شده از پودر آلومینیوم

آزمون مقاومت فشاری

نمونه‌های تولیدشده به صورت قطری بین دو فک دستگاه قرار گرفته و با فشار دکمه، فک متحرک بالایی با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را تحت فشار قرار می‌دهد (شکل شماره ۵). 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)، hf (ارتفاع نهایی قطعه) σ_t (استحکام کششی قطعه) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰].

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

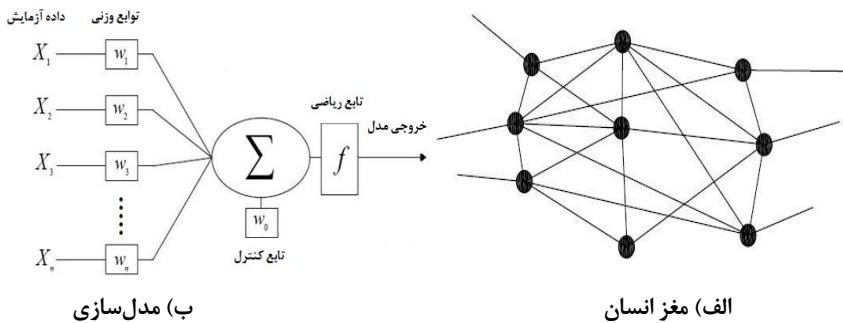
در رابطه فوق σ_t استحکام کششی غیرمستقیم قطعه، F نیروی شکست، H ارتفاع و D قطر قطعه است.



شکل ۵. مراحل انجام آزمون تست فشار

مدل‌سازی با استفاده از روش شبکه عصبی

در این تحقیق از روش مدل‌سازی شبکه عصبی در فرایند تراکم دینامیکی پودر در نرخ بارگذاری بالا استفاده شده است؛ بدین‌صورت که شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند و بر اساس محاسبات روی داده‌های عددی یا مثال‌ها، قوانین کلی را فرا می‌گیرند. در ساختار این سیستم‌ها، پارامترهایی وجود دارند که قابل تنظیم هستند. تنظیم این پارامترها برای آن است که سیستم رفتار مطلوبی را در برابر تحریکات و اطلاعات خارجی از خود نشان دهد که به اصطلاح به این عمل آموزش سیستم گفته می‌شود. در واقع این سیستم‌ها قادرند یاد بگیرند و از راه یادگیری، دانش لازم برای برخورد مناسب با یک پدیده را جمع‌آوری کرده و از آن به‌هنگام نیاز بهره‌برند. شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌رغم تنوع، از ساختار مشابهی برخوردارند و معمولاً از سه لایه ورودی، پنهان و خروجی تشکیل شده‌اند. لایه ورودی تنها اطلاعات را دریافت کرده و مشابه متغیر مستقل عمل می‌کند؛ بنابراین تعداد نرون‌های لایه ورودی بر اساس طبیعت مسئله تعیین می‌شود و بستگی به تعداد متغیرهای مستقل دارد. لایه خروجی نیز همانند متغیر وابسته عمل کرده و تعداد نرون‌های آن بستگی به تعداد متغیر وابسته دارد، اما برخلاف لایه‌های ورودی و خروجی، لایه پنهان بیانگر هیچ مفهومی نیست، بلکه وظیفه تنظیم وزن‌ها و یادگیری را بر عهده داشته و تنها یک نتیجه میانی در فرایند محاسبه ارزش خروجی است.



شکل ۶. ساختار شبکه عصبی

نتایج

بررسی نتایج تجربی چگالی و استحکام

در جدول های ۱ تا ۳ داده ها و نتایج تجربی حاصل از آزمایش های انجام شده روی ذرات آلومینیوم خالص گردآوری شده است. با توجه به جداول، چگالی نسبی از تقسیم چگالی قطعه نسبت به چگالی آلومینیوم به دست آمده است. گفتنی است چگالی آلومینیوم ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. آزمون تست فشار برای محاسبه استحکام مکانیکی پودر و مقاومت فشاری آن به کار رفته است.

جدول ۱. نتایج آزمایش های انجام شده بر پودر A

نمونه	پودر	جرم گلوله (gr)	سرعت (m/s)	چگالی (Kg/m ³)	چگالی نسبی (درصد)
۱	-۱۲۷	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۳۵/۳۵۲	۹۷/۶۰
۲	+۲۵۴-۱۲۷	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۱۰/۲۶	۹۶/۶۷
۳	+۲۵۴	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۹۰/۴۵	۹۹/۶۴

جدول ۲. نتایج آزمایش های انجام شده بر پودر B

نمونه	+۲۵۴-۱۲۷	+۲۵۴	سرعت (m/s)	جرم گلوله (gr)	چگالی (Kg/m ³)	چگالی نسبی (درصد)
۴	۹	۱	۱۱۰	۵۶۲	۲۶۴۰	۹۷/۸
۵	۸	۲	۱۱۰	۵۶۲	۲۶۴۸	۹۸
۶	۷	۳	۱۱۰	۵۶۲	۲۶۵۵	۹۸/۳۳
۷	۶	۴	۱۱۰	۵۶۲	۲۶۷۰	۹۸/۸۸
۸	۵	۵	۱۱۰	۵۶۲	۲۶۷۵	۹۹/۰۷

جدول ۳. نتایج آزمایش های انجام شده بر پودر C

نمونه	+۲۵۴-۱۲۷	-۱۲۷	جرم گلوله (gr)	۲۵۴	چگالی (Kg/m ³)	چگالی نسبی (درصد)
۹	۹	۱	۵۶۲	۱۱۰	۲۵۹۸	۹۶/۲۲
۱۰	۸	۲	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۱۵	۹۶/۸۵
۱۱	۷	۳	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۲۳	۹۷/۱۵
۱۲	۶	۴	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۳۲	۹۷/۴۸
۱۳	۵	۵	۵۶۲	۱۱۰	۲۶۵۲	۹۸/۲۲

جدول ۴. نتایج آزمون استحکام پودر A

نمونه	پودر	چگالی نسبی (درصد)	نیروی شکست (N)
۱	+۲۵۴-۱۲۷	۹۶/۶۷	۶۷۷۳
۲	-۱۲۷	۹۷/۶۰	۸۲۹۰
۳	+۲۵۴	۹۹/۶۴	۶۰۳۳

جدول ۵. نتایج آزمون استحکام پودر B

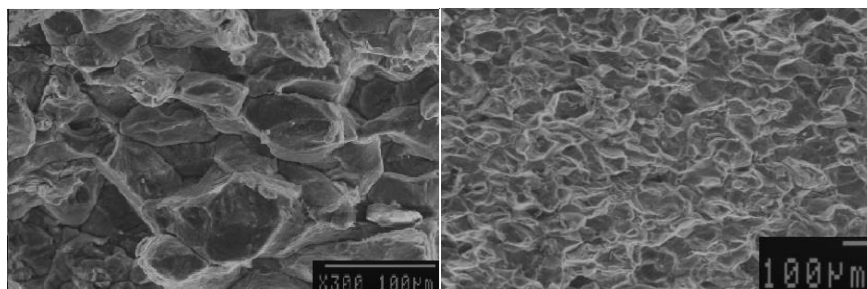
نمونه	۲۵۴، ۱۲۷ (gr) +	۲۵۴ (gr) +	چگالی نسبی (درصد)	نیروی شکست (N)
۴	۹	۱	۹۷/۸	۵۶۸۶
۵	۸	۲	۹۸	۷۲۱۰
۶	۷	۳	۹۸/۳۳	۵۴۲۰
۷	۶	۴	۹۸/۸۸	۷۲۱۶/۶۶۷
۸	۵	۵	۹۹/۰۷	۷۰۵۶/۶۶۶

جدول ۶. نتایج آزمون استحکام پودر C

نمونه	۲۵۴، ۱۲۷ (gr) +	۱۲۷ (gr) -	چگالی نسبی (درصد)	نیروی شکست (N)
۷	۹	۱	۹۶/۲۲	۹۶۲۰
۸	۸	۲	۹۶/۸۵	۵۲۶۳
۹	۷	۳	۹۷/۱۵	۷۷۶۶
۱۰	۶	۴	۹۷/۴۸	۱۰۳۸۳
۱۱	۵	۵	۹۸/۲۲	۷۳۸۰

نتایج بررسی تصاویر میکروسکوپی

شکل شماره ۷، تصویر ریزساختار پودر را پس از تراکم نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه از ساختار کاملاً یکنواختی برخوردار است و فضاهای خالی اندکی بین ذرات دیده می‌شود که نشان‌دهنده چگالی بالای نمونه است. همچنین اتصال بین ذرات پودر در مرز دانه‌ها به‌خوبی صورت گرفته است. از سویی، در ساختار نمونه ذراتی با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر از اندازه اولیه نسبت به شکل شماره ۳ مشاهده می‌شود. علت این امر برخورد شدید ذرات پودر با یکدیگر در اثر عبور امواج فشاری است که سبب خردشدن ذرات پودر می‌شود.

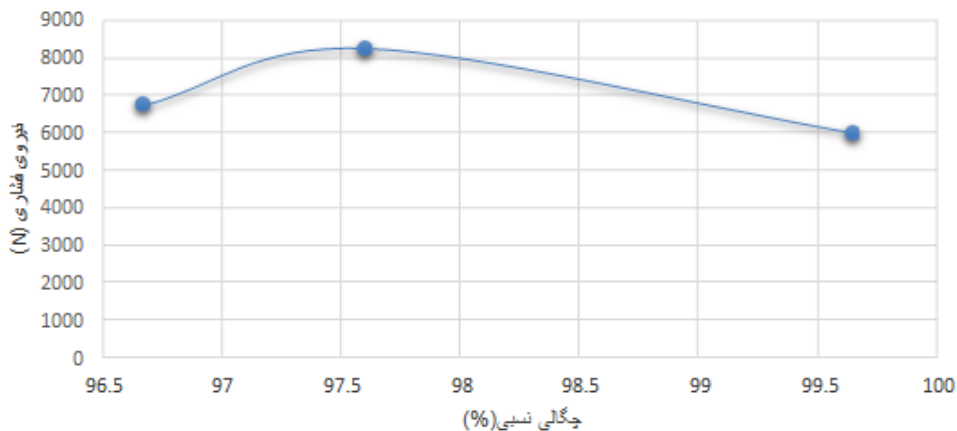


شکل ۷. ریزساختار نمونه پس از تراکم

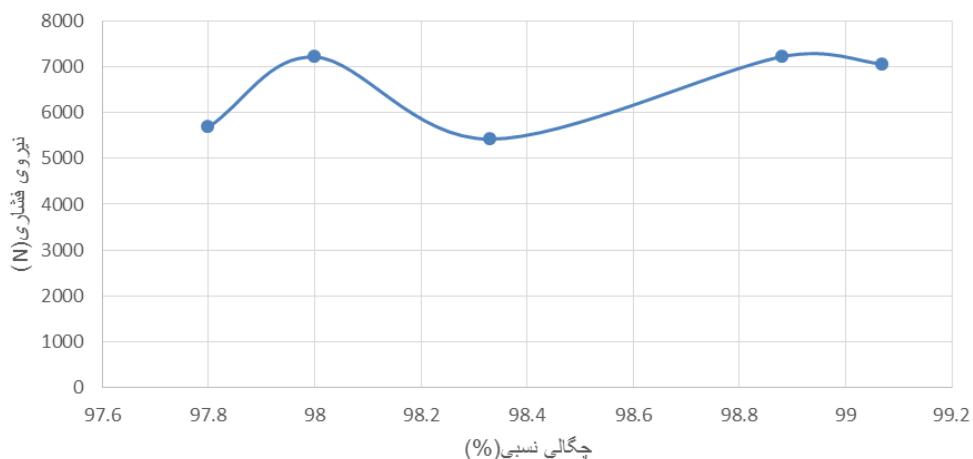
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمودار درصد چگالی نسبی بر حسب نیرو - فشار واردشده بر سطح پودر رسم شده است. این نمودار نشان‌دهنده رابطه بین اندازه ذرات و چگالی نسبی قطعات تولیدشده است؛ به‌طوری‌که قطعات تولیدشده با دانه‌بندی ۲۵۴+ بیشترین و پودر ۲۵۴-۱۲۷+ کمترین مقدار چگالی را دارند. به‌طور کلی تراکم پودر شامل سه مرحله

آرایش مجدد ذرات، تغییر شکل الاستیک پلاستیک و کار سرد و خردشدن ذرات است. با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی و نمودارهای تحلیلی مشخص شد که پودر با دانه‌بندی ۱۲۷- بیشترین استحکام مکانیکی را دارد. تمام داده‌های محاسبه‌شده در جدول‌های ۴ تا ۶ گزارش شده است.

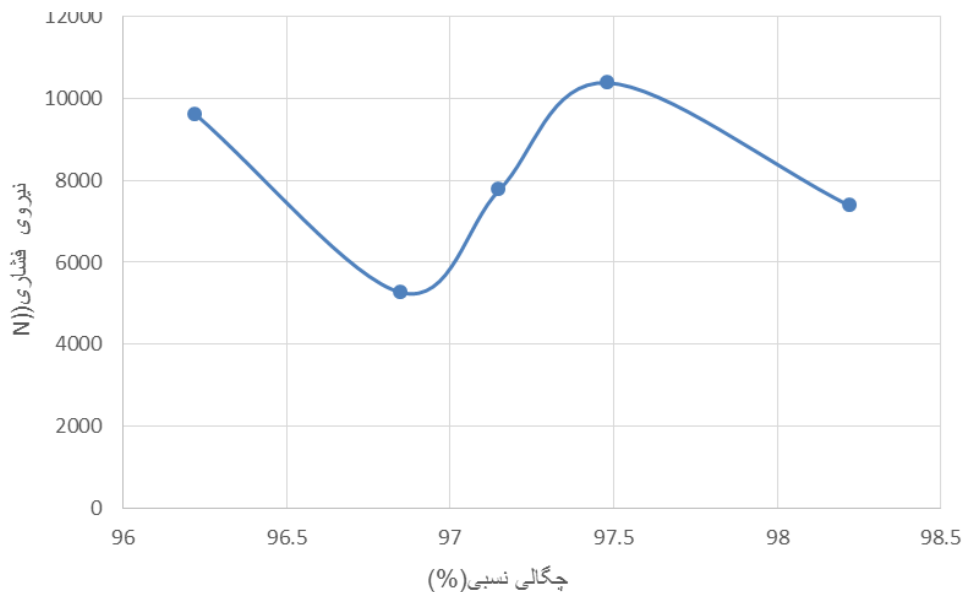
در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نمودار مربوط به مقاومت فشاری قطعه تولیدشده بر حسب چگالی نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم این خواص با رابطه مستقیمی با اندازه دانه دارند. کاهش فضای تخلخل که در مرحله نخست تراکم رخ می‌دهد، سبب کاهش حجم اشغالی توسط پودر شده و در پی آن، افزایش چگالی را به دنبال دارد.



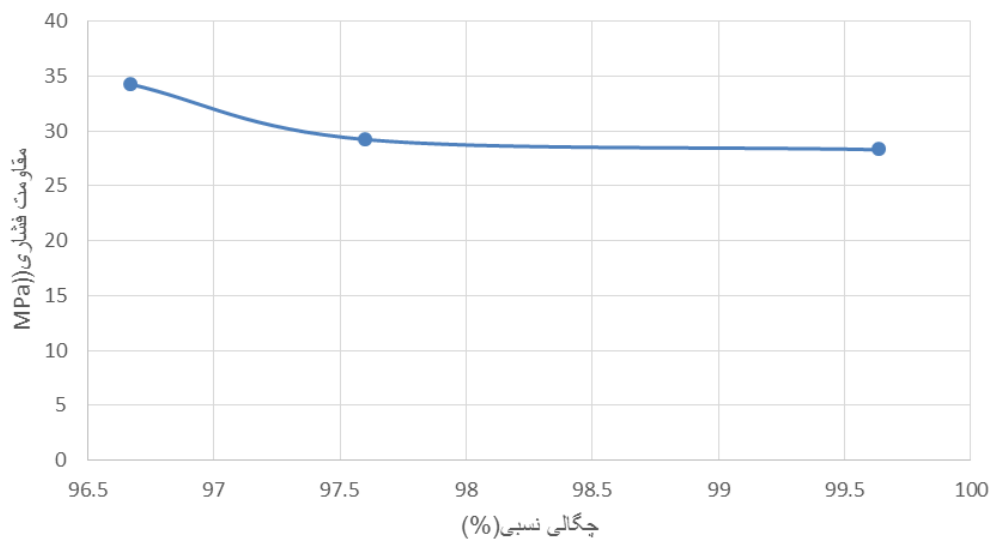
شکل ۸. نمودار نیروی فشار اعمالی بر حسب چگالی نسبی پودر A



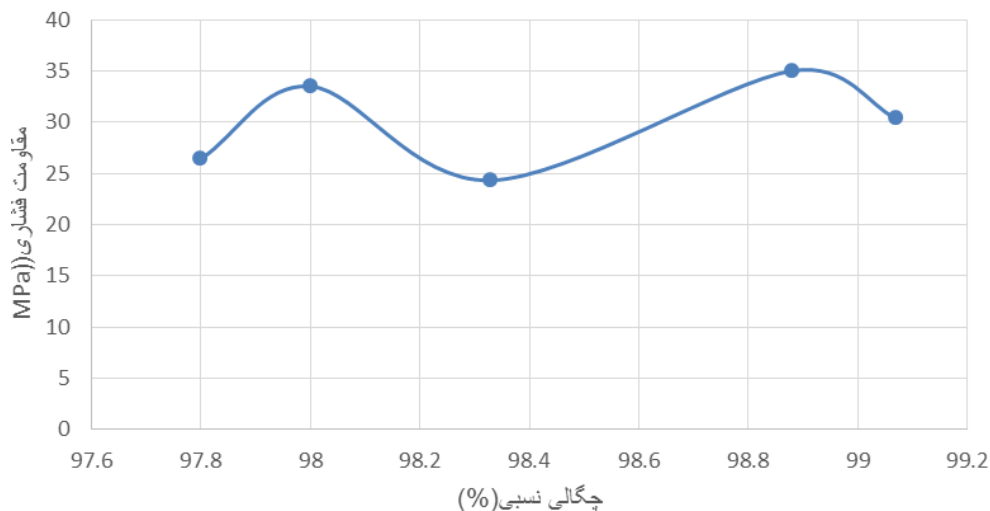
شکل ۹. نمودار نیروی فشار اعمالی بر حسب چگالی نسبی پودر B



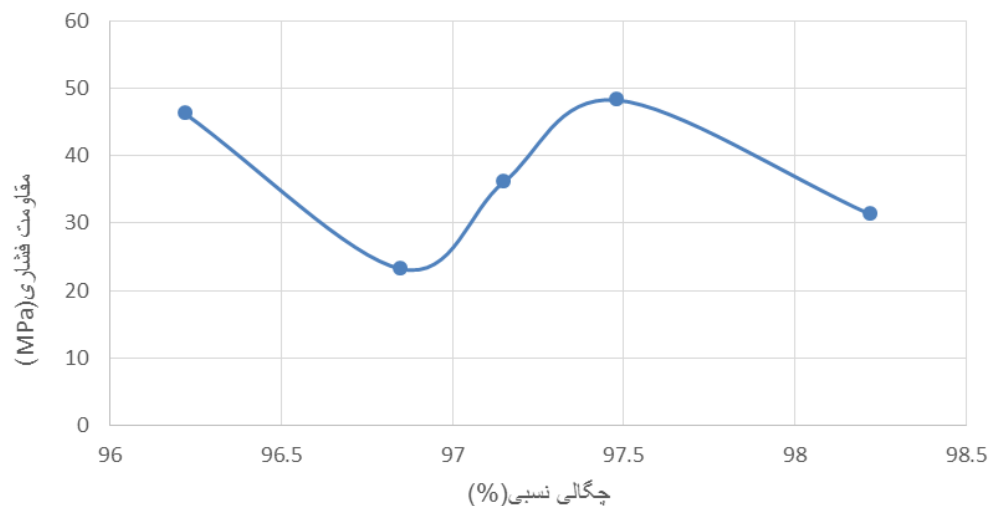
شکل ۱۰. نمودار نیروی فشار اعمالی بر حسب چگالی نسبی پودر C



شکل ۱۱. نمودار مقاومت فشاری بر حسب چگالی نسبی پودر A



شکل ۱۲. نمودار مقاومت فشاری بر حسب چگالی نسبی پودر B

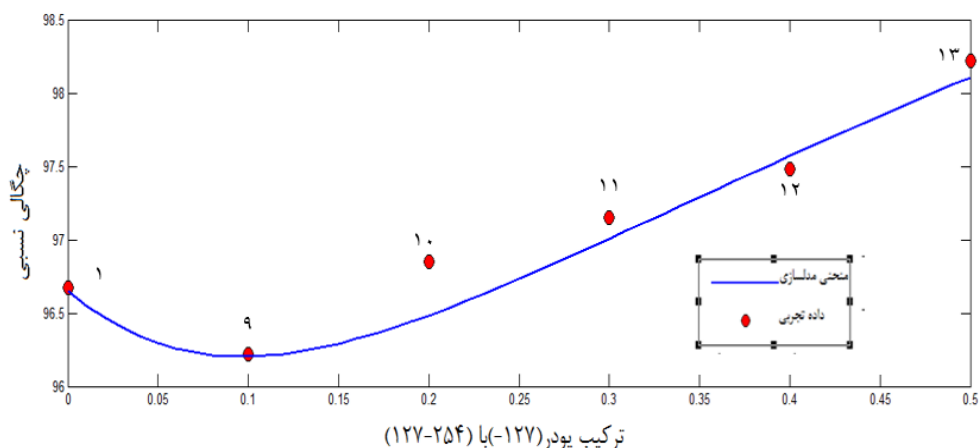


شکل ۱۳. نمودار مقاومت فشاری بر حسب چگالی نسبی پودر C

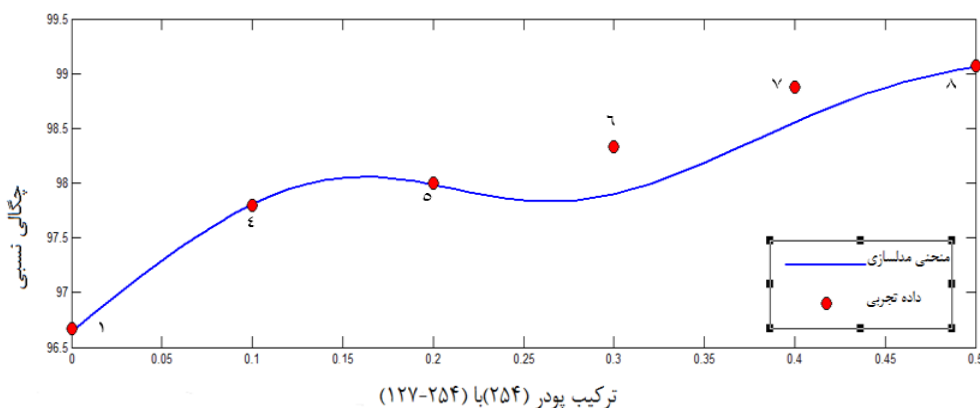
جدول بالا نتایج حاصل از ترکیب پودر با یکدیگر را نشان می‌دهد. بررسی نتایج ارائه شده نشان می‌دهد با افزایش سهم پودر B با اندازه دانه بزرگ‌تر، چگالی قطعات تولید شده افزایش یافته است. علت این امر، قرارگیری ذرات پودر A با اندازه کوچک‌تر در فضاهای خالی بین ذرات بزرگ‌تر پودر B است که این امر منجر به کاهش تخلخل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

بررسی ترکیب دانه‌بندی و مدل چگالی در فرایند تراکم دینامیکی پودر

در این بخش به بررسی اثر ترکیب دانه‌بندی و مدل چگالی در فرایند تراکم دینامیکی پودر در نرخ بارگذاری سرعت بالا پرداخته شده است؛ بدین صورت که به کمک داده‌های آزمایشگاهی، شبکه‌ای عصبی از نوع چندلایه (MLP) با یک لایه ورودی، دو لایه مخفی و یک لایه خروجی ساخته شده است. این شبکه عصبی شامل هشت نرون مخفی نیز هست. در شکل‌های زیر کارایی شبکه عصبی و همچنین ضریب همبستگی برای داده‌های آزمایشگاه به تفکیک دسته‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست نشان داده شده است. در این مدل‌سازی، ورودی‌های اولیه ترکیب دانه‌بندی پودر است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج تجربی و مدل شبکه عصبی وجود دارد.



الف) مدل چگالی پودر آلومینیوم با ترکیب (۱۲۷-۲۵۴) با (۱۲۷-۲۵۴)



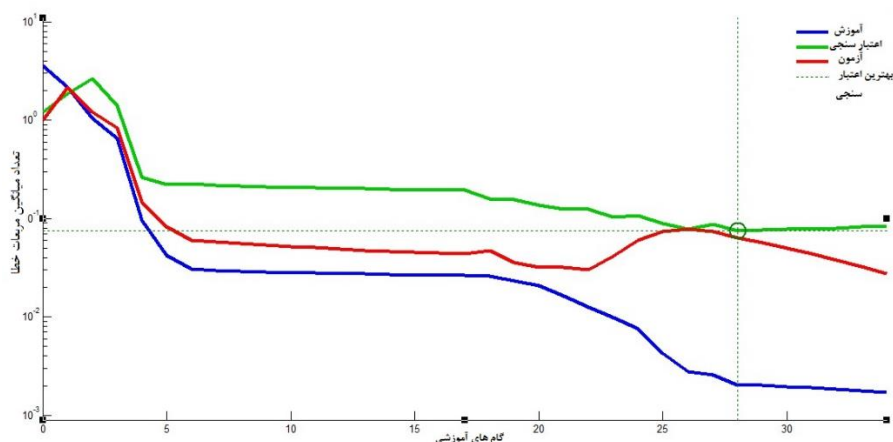
ب) مدل چگالی پودر آلومینیوم با ترکیب (۲۵۴) با (۱۲۷-۲۵۴)

شکل‌های ۱۴ و ۱۵. نمودار مقایسه پیش‌بینی مدل و مقادیر اندازه‌گیری چگالی نسبی قطعات

بررسی خروجی نمودار میانگین تغییرات در طول گام‌های آموزشی با ورودی چگالی در فرایند تراکم پودر در مدل‌سازی شبکه عصبی

در این قسمت تغییرات میانگین خطا در طول آموزش با ورودی میزان چگالی در ذیل ارائه شده است. محور آبی مربوط به آموزش، محور سبز اعتبارسنجی، محور قرمز آزمون و نقطه چین مربوط به بهترین اعتبارسنجی است که در شکل شماره ۱۶ مشاهده می‌شود.

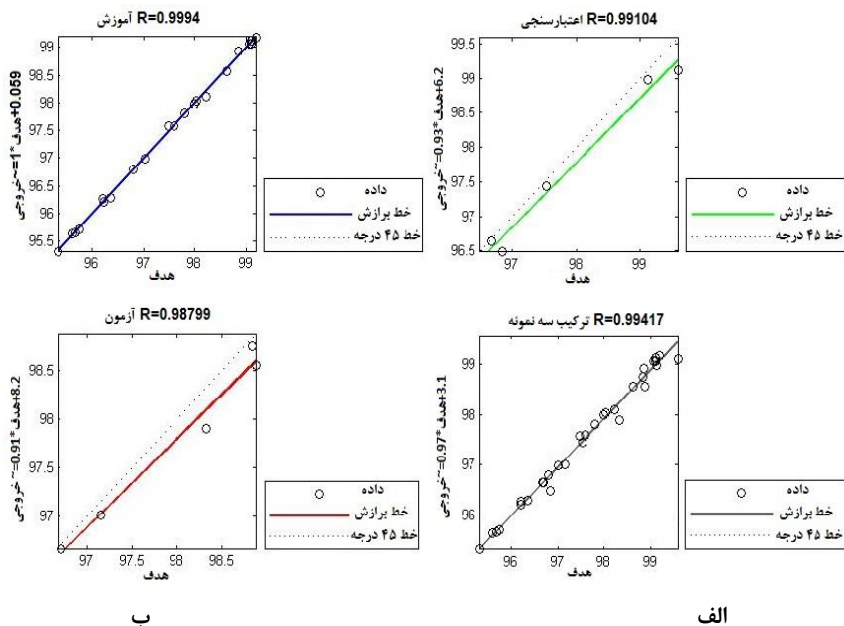
الگوریتم شبکه عصبی طی شش گام آموزشی، نخستین خروجی بهینه را به نمایش می‌گذارد. محور عمودی بیانگر میانگین مربعات خطا، و محور افقی بیانگر تعداد گام آموزش است.



شکل ۱۶. نمودار خروجی میانگین مربعات خطا با ورودی نیرو

تعیین متغیرهای ورودی مدل چگالی

در این مرحله از پژوهش، به تعیین متغیرهای ورودی مدل چگالی در اعتبارسنجی داده‌های تجربی فرایند تراکم دینامیکی و مقایسه داده‌های تجربی با مدل عددی پرداخته شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند توسعه مدل‌های شبکه عصبی، تعیین متغیرهای ورودی مؤثر است. معمولاً همه متغیرهای ورودی دارای اهمیت یکسان نبوده و مقادیر برخی از آن‌ها ممکن است با ناطمینانی همراه بوده یا هیچ رابطه معنی‌داری با متغیر خروجی نداشته باشند. در این پژوهش ابتدا مقادیر تجربی (چگالی و نیرو فشار) به عنوان ورودی‌های مدل مد نظر قرار گرفتند. جداول مربوط به آموزش الگوریتم شبکه عصبی با سه زیر نمودار داده ورودی، نیروی شکست مقادیر، منحنی برازش شده و خط ۴۵ درجه که بیانگر مقدار بهینه است به نمایش درآمده است. همچنین در شکل شماره ۱۷ نمودارهای تعیین متغیرهای ورودی مدل چگالی قابل مشاهده است.

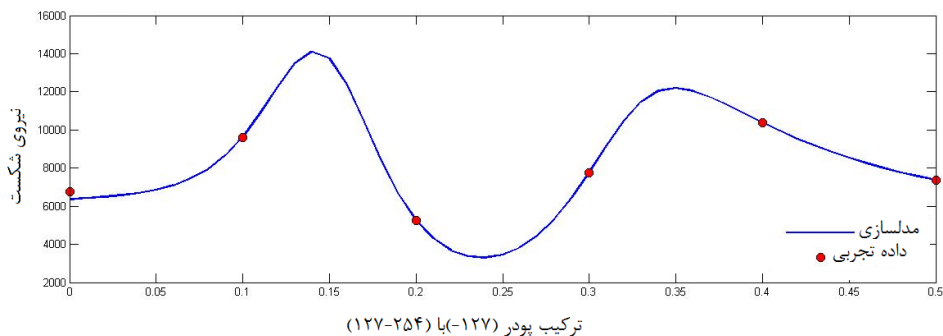


شکل ۱۷. الف) نمودار تعیین متغیرهای ورودی مدل چگالی آموزش و آزمون

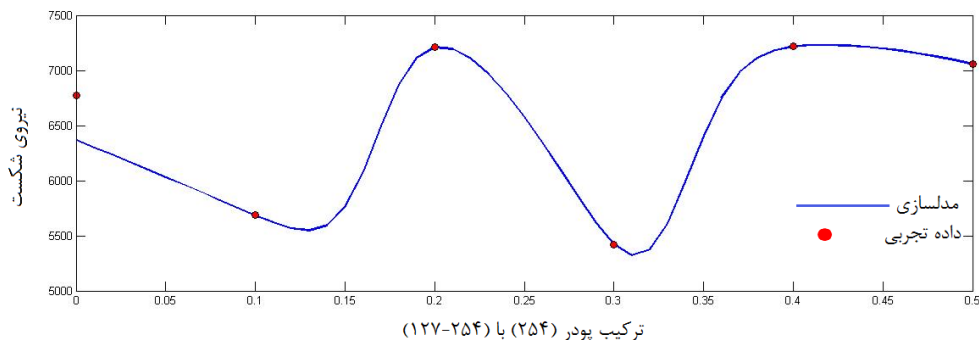
شکل ۱۷. ب) نمودار تعیین متغیرهای ورودی مدل چگالی اعتبارسنجی و ترکیب سه نمونه

بررسی مدل ماکزیمم نیرو

در این مرحله، به کمک داده‌های آزمایشگاهی یک شبکه عصبی مانند شبکه عصبی چگالی ارائه می‌دهیم. بررسی داده‌های تجربی با مدل شبکه عصبی در ترکیب با دانه‌بندی پودر آلومینیوم نشان می‌دهد تطابق خوبی با هم دارند که در شکل شماره ۱۸ مشاهده می‌شود. ورودی این نمودار، چگالی و مقدار ماکزیمم نیرو است. مقدار ضریب همبستگی برای داده‌های آزمایشگاه به تفکیک دسته‌های آموزشی و اعتبارسنجی برابر است با: $R=0.9993$



شکل ۱۸. الف) نمودار مدل ماکزیمم نیرو برای ترکیب دانه‌بندی (۲۵۴) با (۱۲۷-۲۵۴)



ب

شکل ۱۸. ب) نمودار مدل ماکزیمم نیرو برای ترکیب دانه‌بندی (۱۲۷-۲۵۴)

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، بررسی‌های تجربی و شبکه عصبی روی فرایند تراکم دینامیکی پودر آلومینیوم تحت نرخ بارگذاری با سرعت بالا با استفاده از قالب تحت ضربه محوری، انجام شده و به بررسی اثر ترکیب دانه‌بندی پودر در سرعت یکسان بر روی پودر آلومینیوم پرداخته شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های تجربی و مدل شبکه عصبی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- با افزایش فشار مخزن، سرعت گلوله‌ها افزایش می‌یابد و میزان افزایش سرعت به جرم گلوله وابسته است؛
- ۲- با افزایش سرعت گلوله، میزان تراکم پودر افزایش می‌یابد. از نمودارها و جداول ارائه‌شده به روش تجربی تراکم دینامیکی پودر بدون ترکیب دانه‌بندی مشخص می‌شود با افزایش انرژی، چگالی نیز به‌طور محسوسی افزایش یافته است؛
- ۳- با توجه به ترکیب دانه‌بندی ذرات، مقاومت فشاری بر دانه‌بندی‌های ریز بالاتر است؛ به‌طوری‌که در شرایط اعمال سرعت یکسان، چگالی بیشتری را داراست؛
- ۴- با توجه به تصاویر میکروسکوپی مشاهده می‌شود ساختار فیزیکی پودر تغییر شکل یافته و سبب اتصال بین دانه‌بندی پودر (جوش سرد) شده است؛
- ۵- برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از توابع ریاضی ارائه‌شده، مقایسه‌های بین این نتایج و داده‌های تجربی انجام گرفته و بررسی خطای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها و ضریب تبیین نشان داد نتایج به‌دست‌آمده از توابع ریاضی رفتار قابل‌قبولی (دقت ۹۹/۴ درصد) را در نمونه ترکیبی دارند.
- ۶- مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی چگالی نهایی قطعات با استفاده از روش شبکه‌های عصبی با نتایج تجربی به‌دست‌آمده، انطباق بسیار مناسبی را نشان می‌دهد؛ بنابراین با توجه به ماهیت پیچیده فرایند تراکم دینامیکی و دشواری روش‌های تحلیلی برای مدل‌سازی آن، روش شبکه‌های عصبی می‌تواند ابزار کارآمدی برای مدل‌سازی این پدیده باشد.
- ۷- روش تراکم دینامیکی با سرعت بالا، باعث افزایش موضعی حرارت در سطح ذرات پودر، شکسته شدن لایه اکسید حول ذرات و بروز پدیده نرم‌شدگی موضعی می‌شود که مجموعه این عوامل به افزایش جریان پلاستیک و ایجاد اتصالات مستحکم بین ذرات پودر می‌انجامد [۱۰].

References

- [1] Wang, J. Z., Qu, X. H., Yin, H. Q., Yi, M. J., & Yuan, X. J. (2009). High velocity compaction of ferrous powder. *Powder Technology*, 192(1), 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.12.007>
- [2] Al-Qureshi, H., Galiotto, A., & Klein, A. (2005). On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(1), 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.009>
- [3] Poquillon, D., Baco-Carles, V., Tailhades, P., & Andrieu, E. (2002). Cold compaction of iron powders - Relations between powder morphology and mechanical properties: Part II. Bending tests: Results and analysis. *Powder Technology*, 126(1), 75-84. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00035-9)
- [4] Stasiak, M., Tomas, J., Molenda, M., Rusinek, R., & Mueller, P. (2010). Uniaxial compaction behaviour and elasticity of cohesive powders. *Powder Technology*, 203(3), 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.06.010>
- [5] Kadhim, K. M. J., Alwan, A. A., & Abed, I. J. (2011). Simulation of cold die compaction Alumina powder. *Trends in Mechanical Engineering & Technology*, 1(1), 1-21. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.599.6967&rep=rep1&type=pdf>
- [6] Azhdar, B., Stenberg, B., & Kari, L. (2005). Development of a High-Velocity Compaction process for polymer powders. *Polymer Testing*, 24(7), 909-919. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.06.008>
- [7] Zohoor, M., & Mehdipoor, A. (2007). Comparative study on particles bonding of tungsten samples which were produced by powder metallurgy method and underwater explosive compaction technique. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia, Metalurgija-Journal of Metallurgy*, 13(3), 197-202. <http://www.metalurgija.org.rs/mjom/vol13/No%203/MZOHOOR.pdf>
- [8] Zohoor, M., & Mehdipoor, A. (2009). Explosive compaction of tungsten powder using a converging underwater shock wave. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 4201-4206. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.031>
- [9] Babaei, H., Darvizeh, A., Alitavoli, M., & Mirzababaie Mostofi, T. (2015). Experimental and Analytical Investigation into Plastic Deformation of Circular Plates Subjected to Hydrodynamic Loading. *Modares Mechanical Engineering*, 15(2), 305-312. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=422478>
- [10] Namazi, N., Alitavoli, M., Darvizeh, A., Babaei, H., Abdoli Kamali, F., & Rajabiehfarid, R. (2016). Experimental investigation and numerical modelling of dynamic compaction process of pure iron powder with ceramic particles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 3(3), 20-28. http://www.iranjme.ir/article_52017.html?lang=en