



## بررسی تجربی و پیش‌بینی شبکه عصبی خواص نانو کامپوزیت Al-SiC تولید شده به روش تراکم دینامیکی

نصیر نمازی<sup>۱</sup>، مجید علی طاوولی<sup>۲\*</sup>، هاشم بابایی<sup>۳</sup>

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

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

\* رشت، صندوق پستی ۴۱۶۳۵-۳۷۵۶، tavoli@guilan.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۶ اسفند ۱۳۹۷

پذیرش: ۱ تیر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: فروردین ۱۳۹۹

### کلیدواژگان:

تراکم دینامیکی

تفنگ گازی

کامپوزیت آلومینیوم-سرامیک

متالورژی پودر

شبکه‌های عصبی مصنوعی

کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با فاز سرامیک در صنایع مختلف به سرعت در حال گسترش است. اخیراً تراکم دینامیکی به عنوان یکی از روش‌های مکمل متالورژی پودر در تولید مواد کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این آلومینیوم به عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات صنعتی، به طور گسترده در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شود. در این تحقیق، اثرات تراکم دینامیکی بر پودرهای خالص و کامپوزیتی آلومینیوم مطالعه می‌شود. به منظور تولید نمونه‌های کامپوزیتی، پودرهای آلومینیوم خالص و نانو کاربید سیلیسیوم به ترتیب به عنوان زمینه و تقویت‌کننده استفاده می‌شوند. آزمایش‌های تراکم دینامیکی با استفاده از دستگاه تفنگ گازی در سرعت‌های مختلف انجام می‌شوند. سپس چگالی، استحکام و ریزساختار نمونه‌های متراکم‌شده، ارزیابی می‌گردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد چگالی، استحکام و بازگشت فنری نمونه‌های خالص با افزایش سرعت تراکم افزایش می‌یابد. ذرات سرامیک تخلخل را در ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی افزایش می‌دهند. افزودن یک درصد وزنی سرامیک استحکام نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و منجر به توزیع یکنواخت ذرات در زمینه فلزی می‌گردد در حالی که افزایش بیش از یک درصد، موجب کاهش شدید استحکام می‌گردد. در ادامه تحقیق، نتایج تجربی حاصل از تراکم دینامیکی و اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده به ترتیب به عنوان ورودی و تابع هدف برای روش بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی در نظر گرفته می‌شوند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این روش مدل‌سازی تجربی- عددی قادر است چگالی نمونه‌های حاصل از تراکم دینامیکی را با دقت مناسبی پیش‌بینی نماید.

## Experimental investigation and ANN prediction of Al-SiC nano-composite properties produced using dynamic compaction method

Nasir Namazi, Majid Alitavoli\*, Hashem Babaei

1- 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 6 March 2019

Accepted 22 June 2019

Available March 2020

### Keywords:

Dynamic compaction

Gas-gun

Aluminum-ceramic composite

Power metallurgy

Artificial neural networks

### Abstract

Application of metal matrix composites reinforced by ceramic phase is increasing rapidly in different industries. Recently, dynamic compaction has been considered as one of the complementary methods of powder metallurgy in production of composite materials. Moreover, aluminum, as one of the most important industrial metals, is widely used in manufacture of metal matrix composites. In this study, the effects of dynamic compaction on pure and composite aluminum powders are studied. To produce composite specimens, pure aluminum and nano-silicon carbide powders are used as matrix and reinforcement respectively. Dynamic compaction experiments are performed using gas-gun apparatus in different velocities. Afterwards, density, strength and microstructure of compacted samples are evaluated. The obtained results show density, strength and spring back of pure samples are increased with increasing compaction velocity. Ceramic particles increase porosity in microstructure of composite samples. Adding 1 weight percentage of ceramic increases the strength of samples and leads to uniform distribution of particles into metal matrix, whereas adding more than 1% causes significant decrease in strength. In the following of the study, experimental results obtained from dynamic compaction and the difference between experimental and predicted results are considered as input and objective function of artificial neural networks optimization method. The obtained results show that this empirical-numerical method is able to predict density of specimens obtained from dynamic compaction with a good accuracy.

### ۱- مقدمه

از جمله خودروسازی، هوا-فضا، الکترونیک و صنایع نظامی

محسوب می‌گردند. این قطعات به روش‌های متنوعی تولید

امروزه قطعات خالص و کامپوزیتی تولیدشده از آلیاژهای

آلومینیوم به عنوان پرکاربردترین مواد در حوزه‌های مختلف

Please cite this article using:

N. Namazi, M. Alitavoli, H. Babaei, Experimental investigation and ANN prediction of Al-SiC nano-composite properties produced using dynamic compaction method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 13- 25, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پیچیده‌تر (تأمین منبع انرژی برای شتاب دادن به ضربه زننده) از معایب تراکم دینامیکی در مقایسه با متالورژی پودر محسوب می‌شوند [۵].

افزودن ذرات پودر سرامیک همچون آلومینا ( $Al_2O_3$ )، کاربید بور ( $B_4C$ )، دی بوراید تیتانیوم ( $TiB_2$ ) و کاربید سیلیسیوم ( $SiC$ ) به‌عنوان فاز تقویت‌کننده به ذرات پودر آلومینیوم به‌عنوان زمینه فلزی، سبب می‌شود تا کامپوزیت پایه فلزی حاصل از خواص مطلوب آلومینیوم (نسبت استحکام به وزن بالا) و سرامیک (مقاومت در برابر سایش، خوردگی و حرارت) به‌صورت هم‌زمان بهره‌مند گردد. باوجود اهمیت و کاربردهای متنوع پودر SiC در حوزه‌های مختلف، مطالعات انجام‌شده با موضوع ساخت و بررسی خواص کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با تقویت‌کننده SiC به روش تراکم دینامیکی پودر، محدود است. در این میان لی و همکاران امکان ساخت کامپوزیت Al-SiC با استفاده از امواج شوک ناشی از انفجار در زیر آب را مورد بررسی تجربی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که این روش در محدوده فشار ۵-۱۵ گیگا پاسکال منجر به تولید نمونه‌هایی با کیفیت مناسب و فاقد عیوب ریزساختاری می‌گردد [۶]. اسکندری و همکاران از روش انفجار مستقیم جهت تولید این نوع از کامپوزیت استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در نمونه‌های تولیدشده به این روش، گرادیان چگالی اندک بوده و هیچ نوع تغییر فاز و واکنشی بین زمینه و تقویت‌کننده رخ نمی‌دهد [۷]. سینق و همکاران موفق به تولید کامپوزیت Al-SiC با استفاده از روش افشانش حرارتی سریع شدند [۸]. در این روش زمینه آلومینیومی به‌عنوان زیرلایه قرار گرفته و ذرات پودر سرامیک از طریق نازل و با سرعت و دمای بالا به آن برخورد می‌کنند. اخیراً مجدوبی و همکاران در یک سری از مطالعات تجربی تأثیر برخی از پارامترهای مؤثر را در پدیده تراکم دینامیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهد حرارت‌دهی هم‌زمان به پودر در حین تراکم دینامیکی، باعث ایجاد ریزساختار یکنواخت‌تر و بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها می‌شود [۹]. همچنین اعمال تراکم شبه استاتیکی قبل از تراکم دینامیکی باعث بهبود اتصال بین ذرات در کامپوزیت Al-SiC می‌شود ولی از طرفی احتمال ایجاد ترک در نمونه‌ها را افزایش می‌دهد [۱۰].

در سال‌های اخیر، کاربرد روش مدل‌سازی تجربی-عددی برای غلبه بر محدودیت‌های موجود در زمینه مدل‌سازی تحلیلی فرایندهای شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا، در حال گسترش است.

می‌شوند که در این میان، روش متالورژی پودر<sup>۱</sup> به‌خاطر مزایایی همچون دستیابی به تلورانس ابعادی نهایی بدون نیاز به عملیات اضافی، امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده، قابلیت کنترل توزیع خواص فیزیکی و مکانیکی در ساختار قطعه (به‌عنوان مثال تخلخل در تولید فیلترهای صنعتی) و امکان ترکیب ذرات پودر مختلف و تولید گستره وسیعی از قطعات کامپوزیتی با خواص متنوع، برطرف‌دارترین روش برای تولید قطعات پایه آلومینیوم محسوب می‌شود [۱]. این روش شامل آماده‌سازی و ترکیب ذرات پودر، متراکم نمودن ذرات درون قالب و درنهایت حرارت‌دهی به قطعات به‌دست‌آمده در مرحله تفجوشی است.

تولید برخی از قطعات به روش متالورژی پودر با محدودیت‌هایی مواجه است. از یک‌سو، تأمین فشار لازم برای تراکم برخی از پودرها (خانواده کاربیدها) نیازمند استفاده از دستگاه‌های پرس با ظرفیت بالاست و باعث آسیب به قطعه هنگام خارج کردن از قالب می‌شود [۲]. از سوی دیگر عملیات تفجوشی در برخی از پودرها (فلزات با دمای ذوب بالا) نیازمند تأمین دماهای بالا برای مدت‌زمان طولانی بوده که سبب تغییر فاز و ایجاد عیوب ریزساختاری می‌گردد [۳]. این محدودیت‌ها موجب افزایش زمان، هزینه و مصرف انرژی شده و راندمان این روش را کاهش می‌دهند. این عوامل از یک سو و نیاز به افزایش نرخ تولید و کیفیت قطعات در سال‌های اخیر از سوی دیگر، سبب شده تا تحقیق و مطالعه در زمینه روش‌های مکمل متالورژی پودر به یک موضوع جذاب برای محققان این حوزه تبدیل شود.

یکی از این روش‌های مکمل که اخیراً مورد استقبال مراکز صنعتی و تحقیقاتی قرار گرفته، تراکم دینامیکی است. در این روش، امواج تنش فشاری با دامنه زیاد و در مدت‌زمان بسیار کوتاه (در مقیاس میلی‌ثانیه) در اثر برخورد شدید ضربه زننده با سنبه، از ستون ذرات پودر درون قالب عبور کرده و باعث تراکم آن می‌گردند. این روش با استفاده از سامانه‌های متنوع و بر روی گستره وسیعی از پودرهای مختلف توسط محققان پیاده‌سازی شده است [۴]. نتایج مطالعات در زمینه مقایسه روش تراکم دینامیکی با روش متالورژی پودر نشان می‌دهد صرفه‌جویی در زمان و انرژی (حذف عملیات حرارت‌دهی)، گستره وسیع‌تر (امکان تولید قطعات از پودرهای دارای سختی بالا) و بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها، از مزایا و در مقابل قابلیت تکرارپذیری نامطلوب (خارج کردن قطعات از قالب و تنظیم برخورد مرکز به مرکز ضربه زننده و سنبه دشوار است) و نیاز به ماشین‌آلات

<sup>2</sup> Metal matrix composite<sup>1</sup> Powder metallurgy

به‌عنوان مثال در فرایند تراکم دینامیکی پودر، تعدد پارامترهای مؤثر (مانند دما، سرعت بارگذاری، اصطکاک، وقوع تغییر شکل-های پلاستیک بزرگ و اندرکنش بین ذرات پودر)، عدم شناخت دقیق از نحوه تأثیر هر پارامتر و همچنین ماهیت گذرای آن‌ها در حین فرایند، عواملی هستند که ارائه روابط ساختاری و مدل‌های تحلیلی را با محدودیت مواجه می‌سازند. در این روش مدل‌سازی، ابتدا یک سری آزمایش بر مبنای روش شکل‌دهی موردنظر، انجام شده و سپس نتایج تجربی به‌دست‌آمده، به‌عنوان ورودی در روش بهینه‌سازی عددی بکار می‌روند. تابع هدفی که باید بهینه گردد نیز اختلاف بین مقادیر تجربی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل در نظر گرفته می‌شود. این راهکار تاکنون با استفاده از روش‌های متنوع بهینه‌سازی و در مورد فرایندهای مختلفی همچون برشکاری انفجاری [۱۱]، تراکم دینامیکی در محدوده سرعت‌های پایین [۱۲]، شکل‌دهی ورق به روش انفجار گاز [۱۳] و تراکم انفجاری پودر [۱۴] بکار رفته است. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهد که این روش مدل‌سازی قادر است با دقت قابل قبولی خروجی موردنظر را پیش‌بینی و بنابراین مانع از انجام آزمایش‌های دشوار و پرهزینه گردد.

در این تحقیق، تراکم دینامیکی پودر آلومینیوم خالص و نانو کامپوزیت Al-SiC به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا پودرهای آلومینیوم خالص و کامپوزیتی با استفاده از سامانه تفنگ گازی تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرند. سپس تأثیر سرعت بارگذاری و درصد وزنی SiC بر خواص فیزیکی (چگالی و بازگشت فنری) و مکانیکی (استحکام فشاری) نمونه‌های به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین ریزساختار نمونه‌ها و نحوه اتصال ذرات پودر با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به‌دقت مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه، نتایج تجربی به‌دست‌آمده به‌عنوان متغیرهای ورودی در روش بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، جهت پیش‌بینی چگالی نهایی قطعات حاصل از تراکم، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- پودرهای بکار رفته در آزمایش‌ها

در آزمایش‌های این تحقیق، از پودر آلومینیوم (شرکت متالورژی پودر خراسان، شکل ذرات نامنظم، اندازه ذرات کوچک‌تر از ۹۰ میکرومتر، تولیدشده به روش افشانش گازی) و پودر SiC

### ۲-۲- تجهیزات بکار رفته جهت تراکم دینامیکی پودر

در آزمایش‌های این تحقیق، از دستگاه تفنگ گازی مستقر در مؤسسه آموزش عالی احرار (محصول شرکت کاوش تجهیز کاسپین) جهت تراکم دینامیکی پودرهای خالص و کامپوزیتی استفاده شده است. شکل ۲ نمای شماتیک دستگاه را نشان می‌دهد که در آن از هوای فشرده به‌عنوان نیروی پیشران برای شلیک ضربه زننده استفاده می‌شود. در این دستگاه، هوا درون یک مخزن ۵ لیتری با ظرفیت ۲۰ مگاپاسکال فشرده می‌شود. با تنظیم فشار هوای درون مخزن با استفاده از یک مانومتر با ظرفیت ۱۵ مگاپاسکال، می‌توان سرعت‌های شلیک مختلفی را برای ضربه زننده ایجاد نمود. مخزن هوای فشرده مجهز به یک عدد شیر سلونوئیدی (ظرفیت ۲۵ مگاپاسکال) است و از طریق شلنگ فشارقوی به یک لوله به طول ۶ متر و قطر داخلی ۴۳ میلی‌متر متصل شده است. درون این لوله ضربه زننده‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر، طول ۱۵۰ میلی‌متر و جرم ۵۳۰ گرم قرار می‌گیرد. در هر آزمایش پس از تنظیم فشار هوای درون مخزن، با فشردن دکمه شیر سلونوئید، این فشار از طریق شلنگ به پشت ضربه زننده منتقل می‌شود. این امر باعث می‌شود ضربه زننده درون لوله، شتاب گرفته و با سرعت شلیک شود. به‌منظور کاهش اصطکاک ضربه زننده با سطح داخلی لوله، کلاهک فلزی ضربه زننده درون پوششی از ارتالون قرار می‌گیرد (شکل ۳). همچنین در انتهای لوله یک سرعت‌سنج لیزری نصب شده که سرعت ضربه زننده در لحظه برخورد با سنبه را اندازه‌گیری می‌کند. جهت حفظ ایمنی در حین آزمایش، در انتهای لوله یک محافظه آزمایش تعبیه شده است. مطابق شکل ۳ قالب و سنبه و کلاهک ضربه زننده از جنس فولاد VCN-200 سخت‌کاری شده، ساخته شده‌اند.

<sup>1</sup> Scanning electron microscope

<sup>2</sup> Artificial neural networks

<sup>3</sup> Gas atomization

اثر ضربه، هر دو با استفاده از عملیات حرارتی، سخت‌کاری شده‌اند. برای بستن قالب در دستگاه تفنگ گازی، یک صفحه مستطیلی شکل به انتهای قالب پیچ شده و درون فک‌های نگه‌دارنده بسته می‌شود. قطر داخلی و خارجی قالب به ترتیب ۱۱/۴ و ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

### ۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

قبل از انجام آزمایش‌های تراکم دینامیکی، ابتدا عملیات پرداخت سطحی بر روی قالب انجام می‌شود. دلیل این امر کاهش اثرات نامطلوب اصطکاک بین دیواره قالب و ذرات پودر است که عامل اصلی در توزیع ناهمگن خواص فیزیکی در نمونه‌های تولیدشده به روش تراکم پودر محسوب می‌شود [۱۵]. سپس مقدار معینی پودر (۲ گرم پودر آلومینیوم برای تولید نمونه‌های خالص و نسبت‌های وزنی متفاوت برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی) درون قالب ریخته شده و ارتفاع پودر درون قالب ( $h_0$ ) اندازه‌گیری می‌شود. پس از ریختن پودر درون قالب، مجموعه قالب و سنبه توسط یک صفحه فولادی به فک نگه‌دارنده درون محفظه آزمایش بسته می‌شوند. با شلیک ضربه زننده با سرعت معین در هر آزمایش، انرژی جنبشی ضربه زننده (انرژی تراکم) در لحظه برخورد با سنبه، با داشتن جرم ضربه زننده ( $M$ ) و اندازه‌گیری سرعت ضربه زننده ( $v$ ) تعیین می‌شود ( $E = \frac{1}{2}Mv^2$ ). این انرژی از طریق سنبه به ستون ذرات پودر درون قالب منتقل شده و باعث تراکم آن‌ها می‌گردد. بنابراین با افزایش سرعت ضربه زننده، انرژی تراکم نیز افزایش می‌یابد. پس از تراکم، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی از درون قالب خارج می‌شوند. شکل ۴ بخشی از نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

### ۲-۴- خواص فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری

در این تحقیق چگالی و استحکام به‌عنوان مهم‌ترین خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات تولیدشده به روش تراکم پودر، مورد بررسی قرار می‌گیرند. جهت ارزیابی و مقایسه چگالی نمونه‌های تولیدشده، از پارامتری تحت عنوان درصد چگالی نسبی استفاده می‌شود. برای تعیین چگالی نسبی هر نمونه ابتدا جرم، قطر و ارتفاع آن پس از خروج از قالب اندازه‌گیری شده و با تقسیم جرم بر حجم، چگالی هندسی به دست می‌آید. این مقدار سپس بر چگالی تئوری پودر بکار رفته در آزمایش تقسیم می‌گردد. لازم به ذکر است چگالی تئوری پودر کامپوزیتی Al-SiC با توجه به درصد جرمی پودرها و از طریق رابطه (۱) تعیین می‌گردد [۱۶]:

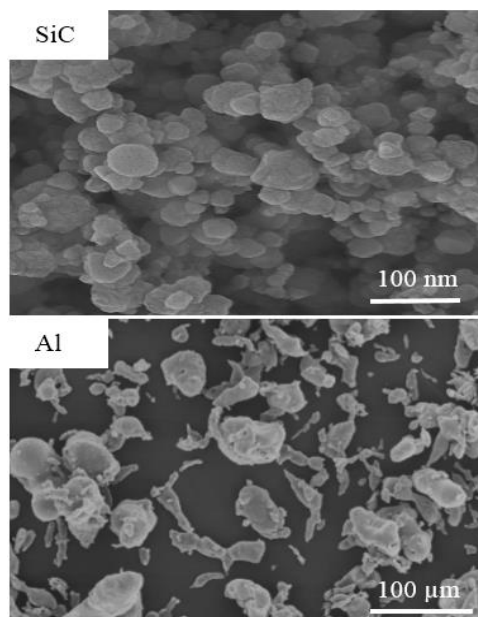


Fig. 1 Powder particles used in experiments

شکل ۱ ذرات پودر بکار رفته در آزمایش‌ها

جدول ۱ درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده پودرهای بکار رفته در آزمایش‌ها

Table 1 Weight percentage of elements of powders used in experiments

Powder	Cu	Mg	Cr	Fe	Zn	Si	C	N	O
Al7075	1.5	2.5	0.2	0.1	5.6	-	-	-	-
SiC	-	-	-	-	-	46	37	14	4

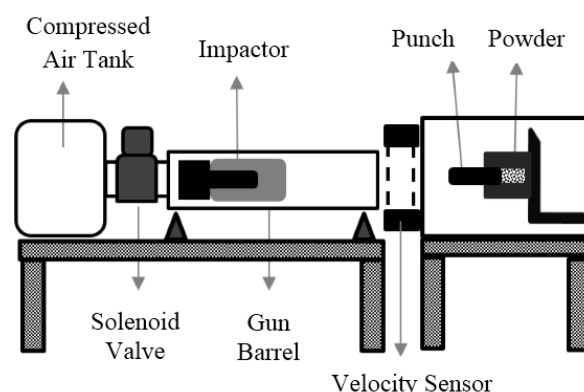


Fig. 2 Schematic of gas-gun set-up used in experiments

شکل ۲ نمای کلی سامانه تفنگ گازی به‌کاررفته در آزمایش‌ها

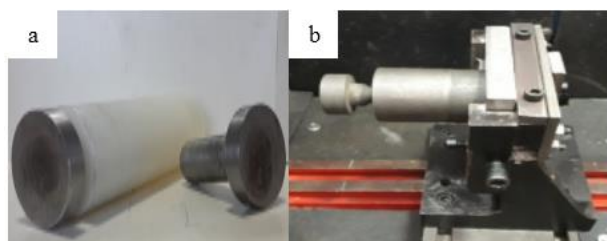


Fig. 3 Equipment used in experiments: a) Impactor, b) die and punch fastened to holder in test chamber

شکل ۳ تجهیزات بکار رفته در آزمایش‌ها: (a) ضربه زننده، (b) قالب و سنبه بسته‌شده به فک نگه‌دارنده درون محفظه آزمایش

به‌منظور جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک سنبه و قالب در

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش تنش در راستای محوری تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه دچار واماندگی شود و تنش کاهش یابد. حداکثر نیرویی که نمونه قبل از واماندگی می‌تواند تحمل کند به‌عنوان معیاری برای مقایسه استحکام نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این تحقیق به‌منظور بررسی اثرات ریزساختاری روش تراکم دینامیکی در نمونه‌های خالص و کامپوزیتی، نحوه توزیع ذرات سرامیک در زمینه آلومینیومی و همچنین مکانیسم اتصال ذرات پودر بعد از تراکم، ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از تصاویر SEM به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۵-۲- فرایند مدل‌سازی به روش ANN

روش ANN بر مبنای مدل ریاضی ارائه‌شده از نحوه عملکرد یک سلول عصبی، پایه‌گذاری شده است (مدل پرسپترون) [۱۷]. مطابق شکل ۶، در این مدل، سیستم عصبی از لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی تشکیل شده است. هرکدام از این لایه‌ها از چندین سلول عصبی (نرون) تشکیل شده است. نرون‌ها اطلاعات را به یکدیگر منتقل کرده و به‌طور هماهنگ باهم کار می‌کنند. ابتدا اطلاعات دریافتی از محیط اطراف به‌صورت سیگنال ورودی ( $x_i$ ) توسط نرون‌های موجود در لایه ورودی دریافت می‌شوند.

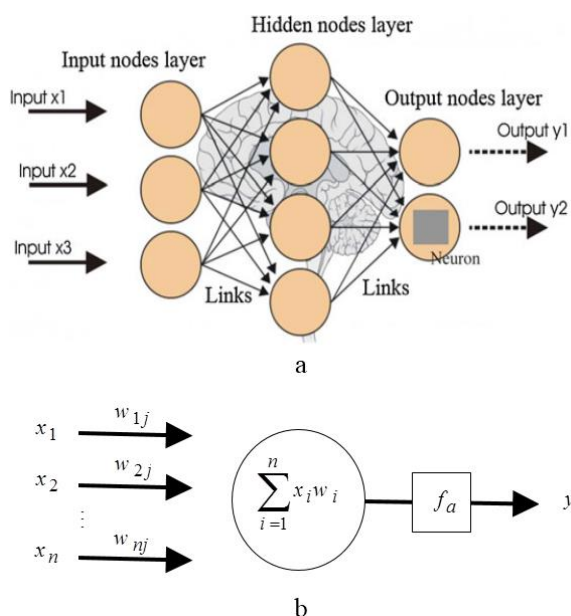


Fig. 6 ANN process: a) basic structure, b) function of a node in hidden layer [17]

شکل ۶ فرایند ANN: (a) ساختار اصلی، (b) عملکرد یک گره در لایه مخفی [۱۷]

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_s}{\left(\frac{m_{Al}}{m_t} \times \rho_{Al}\right) + \left(\frac{m_{SiC}}{m_t} \times \rho_{SiC}\right)} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\rho_{rel}$  چگالی نسبی نمونه کامپوزیتی برحسب درصد،  $\rho_s$  چگالی هندسی نمونه،  $\rho_{Al}$  چگالی تئوری آلومینیوم خالص (۲۷۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب)  $\rho_{SiC}$  چگالی تئوری SiC خالص (۳۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)،  $m_{Al}$  جرم پودر آلومینیوم،  $m_{SiC}$  جرم پودر SiC و  $m_t$  جرم کل پودر است. علاوه بر چگالی، مقدار بازگشت فتری نمونه‌ها در راستای شعاعی به‌عنوان یک خاصیت فیزیکی دیگر، از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$SB = \frac{D_f - D_0}{D_0} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق  $D_0$  قطر نمونه قبل از تراکم (قطر قالب)،  $D_f$  قطر نهایی نمونه پس از خروج از قالب و  $SB$  مقدار بازگشت فتری برحسب درصد است. جهت ارزیابی و مقایسه استحکام نمونه‌های تولیدشده، از آزمون فشار محوری بین دو فک دستگاه STM-250 قرار می‌گیرد. فک پایینی ثابت بوده و فک بالایی با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت می‌کند. شکل ۵ یک نمونه از نمودارهای تنش-کرنش به‌دست‌آمده از این آزمون را نشان می‌دهد.

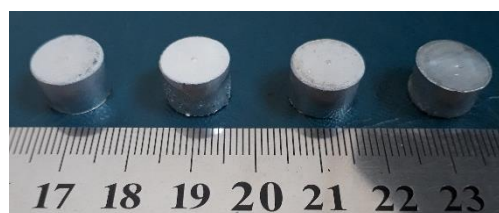


Fig. 4 A number of samples obtained from experiments

شکل ۴ تعدادی از نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها

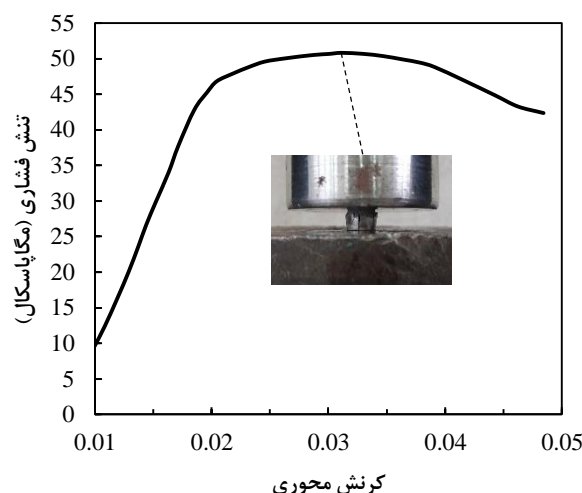


Fig. 5 A typical force-displacement curve obtained from axial compression test

شکل ۵ یک نمونه از منحنی نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از آزمون فشار محوری

<sup>1</sup> Perceptron model

<sup>2</sup> Neuron

استفاده از نرم‌افزار Matlab و از طریق شبکه عصبی از نوع پرسپترون چندلایه، انجام شده است. شبکه طراحی شده شامل یک لایه ورودی، چندین لایه پنهان و یک لایه خروجی است.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش

Table 2 Results obtained from experiments

Test Num	$\frac{m_{SiC}}{m_{Al}}$	$\rho_0$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$v/h_0$ (1/Sec)	$E$ (J)	$\sigma_t$ (GPa)	$\rho_{rel}$ (%)
۱	۰/۰۱	۱۱۷۶/۷۳	۱۱۵۳/۵۴	۱۳۴/۷۵	۲۶۷/۵	۷۱/۹۴
۲	۰/۰۳	۱۰۹۵/۲۱	۱۱۵۹/۷۸	۱۳۴/۷۵	۲۶۲/۵	۶۷/۲۷
۳	۰/۰۵	۱۰۷۱/۸۶	۱۲۳۲/۹۱	۱۳۴/۷۵	۲۵۷/۵	۶۲/۷۶
۴	۰/۰۱	۱۱۷۰/۴	۱۶۴۶/۵۷	۲۰۱/۵۷	۲۶۷/۵	۸۳/۵۸
۵	۰/۰۳	۱۰۹۲/۷۷	۱۵۳۷/۳۵	۲۰۱/۵۷	۲۶۲/۵	۸۱/۱۳
۶	۰/۰۵	۱۰۷۵/۹۸	۱۵۱۳/۷۲	۲۰۱/۵۷	۲۵۷/۵	۷۸/۸۶
۷	۰/۰۱	۱۱۷۸/۸۵	۱۷۹۱/۳۴	۲۳۵/۱۷	۲۶۷/۵	۹۲/۸۴
۸	۰/۰۳	۱۰۸۹/۷۳	۱۶۵۵/۹۲	۲۳۵/۱۷	۲۶۲/۵	۹۰/۵۷
۹	۰/۰۵	۱۰۷۷/۱۶	۱۶۳۶/۸۱	۲۳۵/۱۷	۲۵۷/۵	۸۷/۶۹
۱۰	۰/۰۱	۱۰۸۰/۹۸	۱۹۱۸/۰۷	۲۶۸/۶۵	۲۶۷/۵	۹۷/۴۸
۱۱	۰/۰۳	۱۰۹۷/۵	۱۷۸۱/۷۶	۲۶۸/۶۵	۲۶۲/۵	۹۵/۳۲
۱۲	۰/۰۵	۱۰۷۰/۶۹	۱۷۳۸/۹۴	۲۶۸/۶۵	۲۵۷/۵	۹۲/۸۸
۱۳	۰/۰۱	۱۱۸۳/۱۲	۱۳۶۰/۸۹	۱۳۴/۷۵	۲۶۷/۵	۷۳/۱۷
۱۴	۰/۰۳	۱۱۷۱/۸۰	۱۳۴۷/۸۸	۱۳۴/۷۵	۲۶۲/۵	۸۴/۲۸
۱۵	۰/۰۵	۱۱۸۶/۷	۱۳۶۵/۰۱	۱۳۴/۷۵	۲۵۷/۵	۷۷/۵۴
۱۶	۰	۱۱۹۳/۹۳	۱۳۷۳/۳۳	۱۳۴/۷۵	۲۷۰	۷۳/۱۷
۱۷	۰	۱۱۷۳/۹۱	۱۳۵۰/۳	۱۳۴/۷۵	۲۷۰	۷۵/۴۴
۱۸	۰	۱۱۷۵/۳۲	۱۳۵۱/۹۲	۱۳۴/۷۵	۲۷۰	۷۵/۴۴
۱۹	۰	۱۱۷۶/۷۳	۱۱۵۳/۵۴	۱۳۴/۷۵	۲۷۰	۷۲/۰۴
۲۰	۰	۱۱۹۵/۳۸	۱۳۷۵	۱۳۴/۷۵	۲۷۰	۷۸/۴
۲۱	۰	۱۱۸۳/۱۲	۱۶۶۴/۴۵	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۸۸/۸۴
۲۲	۰	۱۱۷۴/۶۱	۱۶۵۲/۴۹	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۸۴/۶۲
۲۳	۰	۱۱۶۹/۰۱	۱۶۴۴/۶	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۹۱/۱۷
۲۴	۰	۱۱۸۸/۱۴	۱۶۷۱/۵۲	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۸۸/۱۵
۲۵	۰	۱۱۹۱/۷۵	۱۶۷۶/۶	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۸۹/۳۶
۲۶	۰	۱۲۰۵/۶۷	۱۶۹۶/۱۹	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۷۹/۵۷
۲۷	۰	۱۱۶۹/۰۱	۱۶۴۴/۶	۲۰۱/۵۷	۲۷۰	۸۹/۱
۲۸	۰	۱۱۷۸/۱۴	۱۷۹۰/۲۶	۲۳۵/۱۷	۲۷۰	۹۵/۷
۲۹	۰	۱۱۸۳/۸۳	۱۷۹۸/۹۱	۲۳۵/۱۷	۲۷۰	۹۶/۳
۳۰	۰	۱۱۷۸/۸۵	۱۷۹۱/۳۴	۲۳۵/۱۷	۲۷۰	۹۶/۷۸
۳۱	۰	۱۱۷۴/۶۱	۱۷۸۴/۹	۲۳۵/۱۷	۲۷۰	۹۸/۱۷
۳۲	۰	۱۱۷۳/۹۱	۱۷۸۳/۸۳	۲۳۵/۱۷	۲۷۰	۹۵/۸۸
۳۳	۰	۱۱۶۸/۳۱	۱۸۹۷/۵	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۲/۴۱
۳۴	۰	۱۱۷۷/۴۳	۱۹۱۲/۳۱	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۴/۳۶
۳۵	۰	۱۱۷۳/۲۱	۱۹۰۵/۴۵	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۲/۲۸
۳۶	۰	۱۱۸۴/۵۵	۱۹۲۳/۸۷	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۲/۵۳
۳۷	۰	۱۱۷۸/۸۵	۱۹۱۴/۶۱	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۴/۳۶
۳۸	۰	۱۱۷۶/۰۲	۱۹۱۰/۰۲	۲۶۸/۶۵	۲۷۰	۹۲/۴۸

هر نرون ورودی، اطلاعات دریافتی را پردازش کرده و آن‌ها را با استفاده از توابع وزنی ( $w_i$ ) به نرون‌های موجود در لایه مخفی ارسال می‌کند. در این مرحله، هر نرون که چندین ورودی دریافت کرده، یک مقدار خروجی خواهد داشت. در واقع برای هر سلول در لایه پنهان، یک تابع انتقال وجود دارد که مطابق رابطه (۳) از طریق مقایسه مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها و وزن‌ها با یک مقدار آستانه ( $\theta_j$ )، خروجی ( $net_j$ ) را مشخص می‌کند. این خروجی وارد تابع دیگری به نام تابع فعال‌ساز شده و از طریق رابطه (۴) خروجی نهایی سلول را تعیین می‌کند. این خروجی است که مشخص می‌کند آیا نرون موردنظر در شبکه عصبی فعال شود یا خیر.

$$net_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} - \theta_j \quad (3)$$

$$y_j = f(net_j) = \frac{1}{1 - e^{-net_j}} \quad (4)$$

یکی از کاربردهای این روش که اخیراً مورد توجه قرار گرفته، استفاده از آن در مدل‌سازی فرایندهای پیچیده فیزیکی است. در این تکنیک مدل‌سازی، ابتدا یک مجموعه از داده‌های تجربی شامل پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه مصنوعی داده می‌شود. تعدادی از این داده‌ها صرف فرایند آموزش شبکه می‌شود (داده‌های آموزشی). در فرایند آموزش، شبکه عصبی توابع وزنی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کند تا خروجی پیش‌بینی شده کمترین اختلاف را با خروجی واقعی داشته باشد. سپس بخش دیگری از داده‌ها به عنوان داده‌های آزمون<sup>۵</sup> و داده‌های صحه‌گذاری<sup>۶</sup> صرف محک زدن مدل به دست آمده می‌شوند. بدین ترتیب روش ANN قادر است تا ارتباط پیچیده بین داده‌های ورودی و خروجی را تشخیص دهد. این روش مدل‌سازی امروزه برای حل انبوهی از مسائل در حوزه‌های مختلف از جمله هوش مصنوعی، پردازش سیگنال و تشخیص الگو، اقتصاد، پزشکی و صنعت بکار می‌رود (برای آشنایی بیشتر با جزئیات مدل‌سازی به روش ANN به [۱۷] مراجعه شود).

## ۲-۶- کاربرد روش ANN بر روی داده‌های حاصل از آزمایش تراکم دینامیکی

جدول ۲ نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های تراکم دینامیکی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، فرایند مدل‌سازی ANN با

<sup>1</sup> Transfer function  
<sup>2</sup> Threshold value  
<sup>3</sup> Activation function  
<sup>4</sup> Training data  
<sup>5</sup> Test data  
<sup>6</sup> Validation data

تراکم، هم حجم حفره‌ها و هم تعداد آن‌ها کاهش یافته است. نمودار تغییرات چگالی نسبی نمونه‌های آلومینیوم خالص برحسب سرعت تراکم (شکل ۸) نیز این روند را به صورت عددی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش سرعت تراکم از ۲۲/۵ تا ۳۱/۵ متر بر ثانیه باعث افزایش چگالی نسبی از ۷۶ تا ۹۶/۵ درصد شده است. در مراحل اولیه تراکم، انرژی جنبشی ضربه زننده به‌طور ناگهانی از طریق سنبه به ذرات پودر درون قالب منتقل شده و آن‌ها را جابجا می‌کند. این امر باعث شتاب گرفتن و پرتاب شدن ذرات ریز به درون حفره‌های موجود بین ذرات بزرگ‌تر شده و چگالی نمونه را افزایش می‌دهد. در ادامه و در اثر افزایش فشار تراکم، ذرات پودر که دیگر فضایی برای جابجایی بیشتر ندارند، دچار تغییر شکل پلاستیک شده‌اند. جریان پلاستیک ذرات باعث پر شدن حفره‌ها و افزایش بیشتر چگالی می‌گردد.

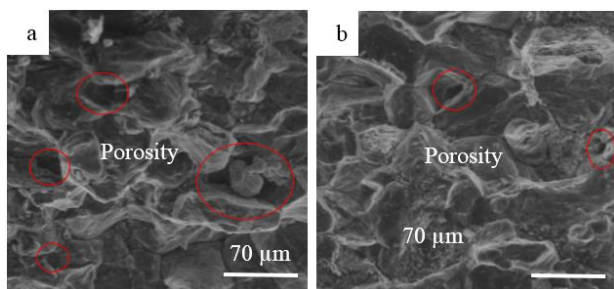


Fig. 7 Microstructure of pure Al samples with magnification of 200x and compaction velocity of: a)  $v=22.5$  m/s, b)  $v=29.8$  m/s

شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های آلومینیوم خالص با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر و سرعت تراکم: (a) ۲۲/۵ متر بر ثانیه، (b) ۲۹/۸ متر بر ثانیه

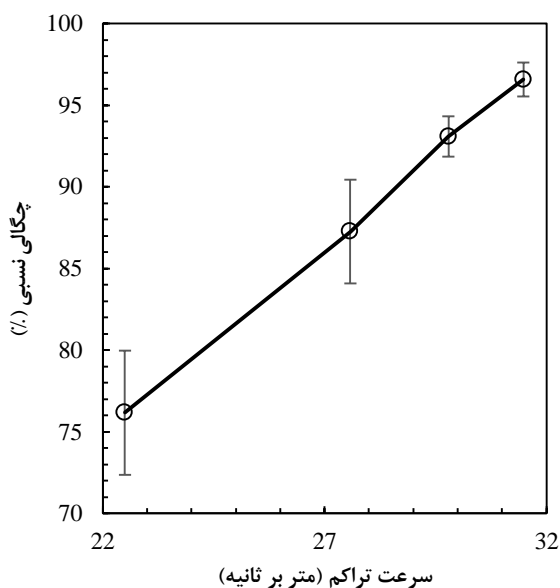


Fig. 8 Variations of relative density with compaction velocity in pure Al samples

شکل ۸ تغییرات چگالی نسبی برحسب سرعت تراکم (نمونه‌های آلومینیوم خالص)

کیفیت عملکرد قطعات تولیدشده به روش تراکم پودر تا حد زیادی توسط چگالی آن‌ها ارزیابی می‌شود؛ بنابراین چگالی نسبی قطعات حاصل از تراکم دینامیکی پودر آلومینیوم خالص و پودر کامپوزیتی Al-SiC به‌عنوان خروجی روش مدل‌سازی ANN در نظر گرفته شده است. نسبت جرمی سرامیک به آلومینیوم ( $m_{SiC}/m_{Al}$ )، چگالی هندسی پودر درون قالب قبل از تراکم ( $\rho_0$ )، نرخ کرنش متوسط ( $v/h_0$ )، انرژی جنبشی بارگذاری دینامیکی ( $E$ )، تسلیم تئوری پودر پایه ( $\sigma_t$ ) به‌عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی بکار رفته در این تحقیق، انتخاب شده‌اند.

الگوریتم آموزش در این شبکه از نوع پس انتشار است، بدین ترتیب که در صورت وجود اختلاف بین خروجی شبکه با خروجی مطلوب، اصلاح توابع وزنی از لایه خروجی آغاز شده و به سمت لایه ورودی انتشار می‌یابد. خطای میانگین مجذور مربعات (RMSE) بین خروجی واقعی و خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل، به‌عنوان تابع هدف تعریف شده و برای بهینه‌سازی آن از الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت استفاده می‌شود. همچنین تحلیل رگرسیون خطی و ضریب همبستگی جهت ارزیابی فرایند آموزش داده‌ها، بکار می‌رود. لازم به ذکر است ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد برای آزمون و ۱۵ درصد برای صحت‌گذاری نتایج اختصاص می‌یابد [۱۷]. تعداد لایه‌های پنهان موجود در مدل با استفاده از آزمون و خطا تعیین می‌گردد که این مقدار برابر ۳ در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور کاهش محدوده داده‌های خروجی در حین فرایند مدل‌سازی، مقادیر درصد چگالی نسبی بین ۰ و ۱ متعادل می‌شوند.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- اثر تراکم دینامیکی بر خواص فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری

شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های پودر آلومینیوم خالص متراکم‌شده با سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو نمونه، ذرات ریز در فضای خالی اطراف ذرات بزرگ قرار گرفته‌اند. از طرفی شکل ذرات نسبت به حالت قبل از تراکم (شکل ۱) تغییر یافته که این امر نشان می‌دهد ذرات به‌شدت دچار تغییر شکل پلاستیک شده‌اند. مقایسه حفره‌های موجود بین ذرات در ریزساختار دو نمونه (برخی از حفره‌ها با بیضی نمایش داده شده‌اند) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت

<sup>1</sup> Back propagation  
<sup>2</sup> Root-mean square error  
<sup>3</sup> Levenberg-Marquardt  
<sup>4</sup> Correlation coefficient

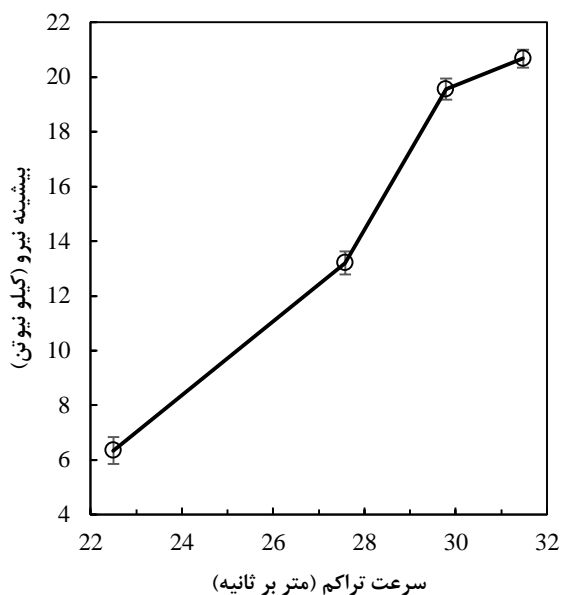


Fig. 10 Force peaks obtained from axial compression test for pure Al samples compacted with different velocities

شکل ۱۰ بیشینه نیروی به‌دست‌آمده از آزمون فشار محوری برای نمونه‌های آلومینیوم خالص متراکم‌شده با سرعت‌های مختلف

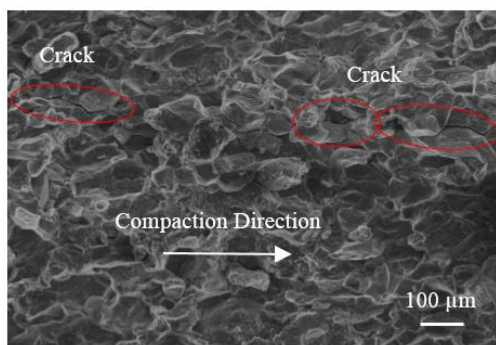


Fig. 11 Initiation and growth of radial cracks in pure Al samples compacted with velocity of 31.5 m/s

شکل ۱۱ شروع و رشد ترک‌های شعاعی در نمونه آلومینیوم خالص متراکم‌شده با سرعت ۳۱/۵ متر بر ثانیه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درحالی‌که ساختار کاملاً یکنواخت و تخلخل بسیار اندک است، یک خط ترک طولی در ریزساختار ایجاد شده و گسترش یافته است. در حین تراکم، ذرات پودر در راستای عمود بر جهت ضربه (راستای شعاعی) دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند (شکل ۸). در نتیجه نمونه تمایل دارد در این راستا منبسط شود درحالی‌که توسط دیواره قالب محدود شده است. این امر سبب ایجاد تنش‌های الاستیک پسماند در نمونه می‌گردد. در لحظه خروج قطعه از قالب، این تنش‌ها آزاد شده و سبب وقوع پدیده بازگشت فنری و همچنین ایجاد و گسترش ترک در راستای شعاعی می‌شوند. شکل ۱۲

بررسی ریزساختار نمونه‌های آلومینیوم خالص با بزرگ‌نمایی بیشتر (شکل ۹) مشخص می‌کند در برخی از نواحی (قسمت a)، مکانیسم اتصال ذرات از نوع قفل‌شدگی مکانیکی است. این مکانیسم در مراحل اولیه تراکم و به دلیل برخورد شدید ذرات و قفل شدن برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های موجود در سطح آن‌ها رخ می‌دهد. مکانیسم دیگر اتصال بین ذرات پودر، از نوع جوش سرد است (قسمت b). سطح ذرات پودرهای تجاری، همواره حاوی لایه ترد و نازکی از اکسید فلزی، ناخالصی و ذرات روان‌کننده است. تا زمانی که این لایه حول ذرات پودر وجود دارد، تماس فلز-فلز و در نتیجه اتصال مناسب بین ذرات پودر ایجاد نمی‌شود [۱۸]. افزایش انرژی تراکم باعث ایجاد تنش برشی در سطح ذرات پودر، خرد شدن لایه اکسید و برقراری تماس فلز-فلز می‌گردد. از طرفی افزایش تنش برشی به مقداری بیش از تنش تسلیم آلومینیوم در نقاط تماس، باعث برقراری جریان پلاستیک و در نتیجه اتصال از نوع جوش سرد بین ذرات در سطح پودر می‌گردد.

شکل ۱۰ نمودار حداکثر نیروی تحمل‌شده توسط نمونه‌های آلومینیوم را در آزمون فشار محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت تراکم، استحکام نمونه‌ها افزایش یافته است. در واقع با افزایش انرژی ورودی به پودر، تنش برشی در لایه سطحی افزایش یافته و در نتیجه، جریان پلاستیک در سطح بیشتری از پودر برقرار شده است. این امر در نهایت موجب افزایش تعداد و سطح اتصالات از نوع جوش سرد شده و استحکام نمونه را افزایش می‌دهد. شکل ۱۱ ریزساختار نمونه آلومینیوم خالص متراکم شده با بیشترین سرعت را نشان می‌دهد.

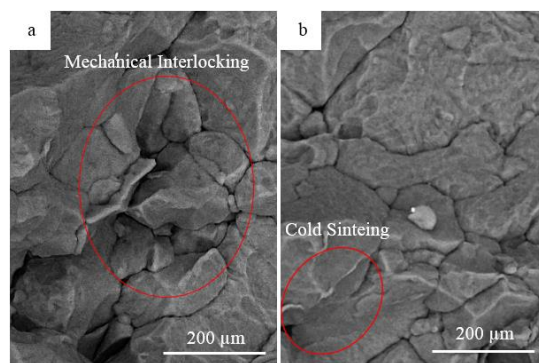


Fig. 9 Bonding mechanisms in pure Al sample compacted with velocity of 27.5 m/s: a) mechanical interlocking, b) cold welding

شکل ۹ مکانیسم‌های اتصال در نمونه آلومینیوم خالص متراکم‌شده با سرعت ۲۷/۵ متر بر ثانیه: (a) قفل‌شدگی مکانیکی، (b) جوش سرد

<sup>1</sup> Mechanical interlocking  
<sup>2</sup> Cold sintering

<sup>3</sup> Residual elastic stresses



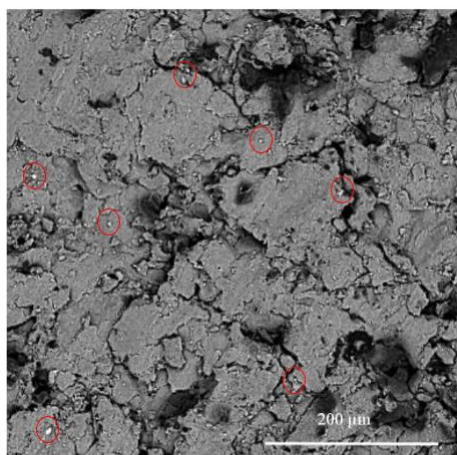


Fig. 13 Microstructure of Al-SiC composite compacted with velocity of 29.8 m/s and 3 wt% of SiC

شکل ۱۳ ریزساختار کامپوزیت Al-SiC متراکم شده با سرعت 29.8 متر بر ثانیه و حاوی ۳ درصد وزنی SiC

از آنجاکه این ذرات سختی بالایی دارند، دچار تغییر شکل نمی‌شوند و در نتیجه موجب اتلاف انرژی تراکم می‌گردند؛ بنابراین نسبت به نمونه آلومینیوم خالص، انرژی تراکم کمتری برای جابجایی و تغییر شکل ذرات آلومینیوم در دسترس بوده و در نتیجه تخلخل افزایش می‌یابد. نمودار ۱۴ تغییرات چگالی نمونه‌های کامپوزیتی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در کلیه سرعت‌های تراکم، با افزایش درصد وزنی سرامیک، چگالی نمونه کاهش می‌یابد. شکل ۱۵ بزرگ‌نمایی از نحوه توزیع ذرات سرامیک در زمینه آلومینیوم را در یک نمونه کامپوزیتی ارائه می‌دهد. قسمت a شکل تجمع ذرات نانو سرامیک را در فضای بین پودرهای آلومینیوم نشان می‌دهد. این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در چگالی تئوری و اندازه دو پودر باشد. ذرات سرامیک به دلیل اندازه کوچک‌تر و چگالی بیشتر، در فضای بین ذرات آلومینیوم تجمع می‌یابند. در قسمت b شکل، شروع و گسترش ترک در ذرات پودر مجاور با ناحیه تجمع سرامیک، نشان داده شده است. دلیل این امر می‌تواند به تفاوت در مقدار سختی دو پودر آلومینیوم و سرامیک مرتبط باشد. از آنجاکه ذرات سرامیک SiC دارای سختی بالایی هستند، حضور آن‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش در سطح ذرات پودر آلومینیوم می‌شود. این امر موجب ایجاد و گسترش ترک در این نواحی می‌گردد.

شکل ۱۶ نمودار حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌های کامپوزیتی را در آزمون فشار محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن ۱ درصد سرامیک، استحکام نمونه‌ها را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است، در حالی که افزودن بیش از ۱ درصد سرامیک (تا ۵ درصد)، باعث کاهش استحکام نمونه‌ها شده است.

نمودار تغییرات بازگشت فنری در راستای شعاعی را نشان می‌دهد که از رابطه (۲) تعیین شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت تراکم، مقدار بازگشت فنری نیز افزایش یافته است. از یک سو، همان‌طور که از مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۱ ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت تراکم از ۲۹/۸ به ۳۱/۵ متر بر ثانیه باعث افزایش ۴ درصدی چگالی نسبی و افزایش ۶ درصدی بیشینه نیرو شده است، در حالی که این افزایش باعث ایجاد ترک ریزساختاری در نمونه شده است. گسترش این ترک‌ها در آینده، می‌تواند منجر به آسیب قطعه و کاهش عمر مفید آن گردد. از سوی دیگر، تراکم نمونه‌ها با سرعتی کمتر از ۲۷/۵ متر بر ثانیه، چگالی و استحکام مناسبی را در نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تراکم دینامیکی هر نوع پودر فلزی باید در محدوده بهینه‌ای از سرعت تراکم انجام شود تا ضمن برخورداری قطعات از چگالی و استحکام مناسب، عیوب ریزساختاری نیز در آن‌ها پدید نیاید (این محدوده برای نمونه‌های آلومینیوم خالص در این تحقیق، در محدوده ۲۷/۵ تا ۲۹/۸ متر بر ثانیه است).

شکل ۱۳ ریزساختار نمونه کامپوزیتی متراکم شده به روش دینامیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تخلخل فراوانی در ساختار نمونه وجود دارد. دلیل این امر خاصیت مستهلک‌کنندگی ذرات سرامیک است. حضور ذرات سرامیک در زمینه آلومینیوم سبب می‌شود بخشی از انرژی تراکم توسط این ذرات جذب شود.

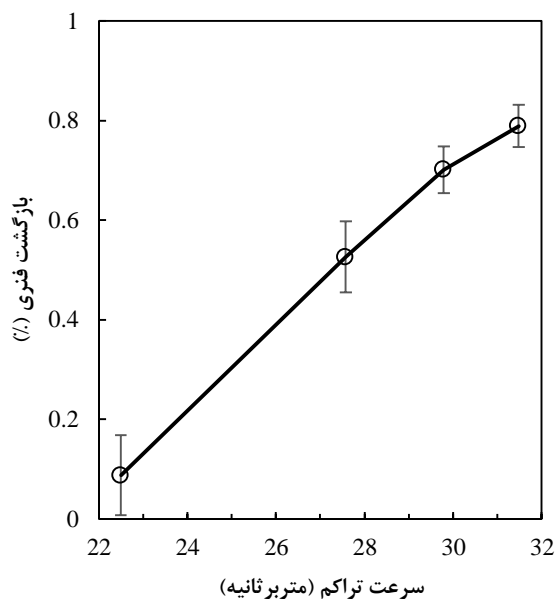


Fig. 12 Variations of spring back with compaction velocity in pure Al samples

شکل ۱۲ تغییرات بازگشت فنری بر حسب سرعت تراکم برای نمونه‌های آلومینیوم خالص

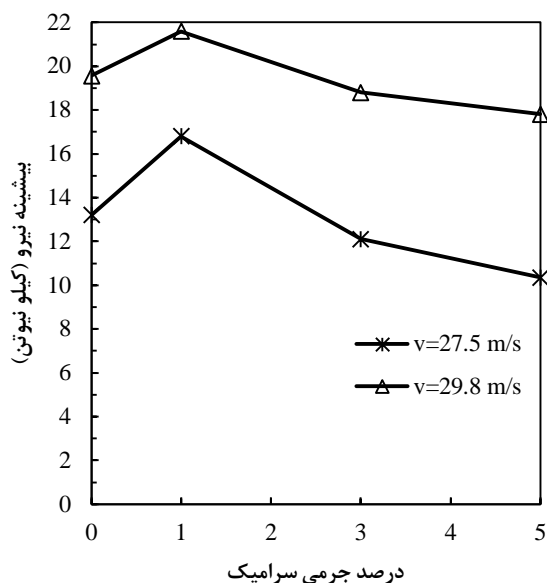


Fig. 16 Force peaks obtained from axial compression test for Al-SiC composites compacted with different velocities and SiC content

شکل ۱۶ بیشینه نیروی به‌دست‌آمده از آزمون فشار محوری برای کامپوزیت‌های Al-SiC متراکم‌شده با سرعت‌های مختلف و مقدار SiC متفاوت

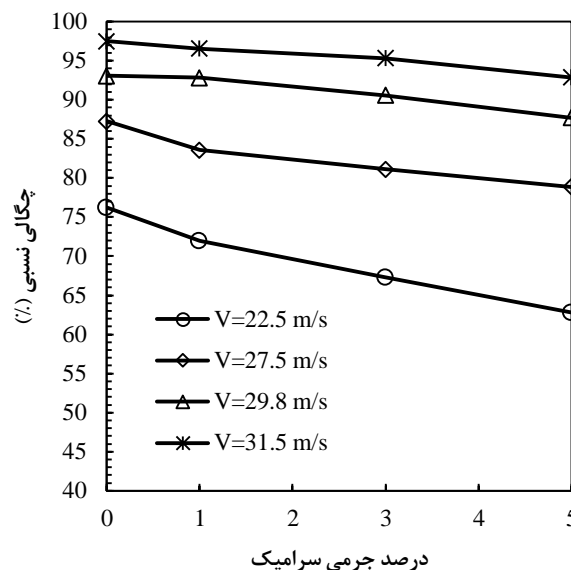


Fig 14 Variations of relative density with SiC content for composite samples compacted at different velocity

شکل ۱۴ تغییرات چگالی نسبی برحسب درصد جرمی SiC برای نمونه‌های کامپوزیتی متراکم‌شده با سرعت‌های مختلف

در رابطه (۵)،  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده،  $\sigma_0$  تنش تسلیم اولیه،  $K$  ثابت استحکام (برای هر ماده به‌صورت تجربی تعیین می‌شود) و  $D$  اندازه متوسط قطر ذرات می‌باشد. هنگامی که درصد سرامیک در زمینه پایین (۱ درصد) است، ذرات سرامیک به‌جای تجمع در حفره‌ها، به‌طور یکنواخت ذرات زمینه را احاطه می‌کنند. این امر به دلیل سختی ذاتی ذرات سرامیک از یک طرف موجب بروز تمرکز تنش در سطح ذرات شده و از طرف دیگر مانع از تغییر شکل ذرات می‌شوند. در نتیجه در اثر افزایش فشار، ذرات آلومینیوم تکه‌تکه شده و اندازه آن‌ها کاهش و استحکام آن‌ها طبق رابطه ۵ افزایش می‌یابد.

شکل ۱۷ بخشی از ریزساختار نمونه کامپوزیتی حاوی ۱ درصد سرامیک و نقشه اشعه ایکس متناظر با آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نقشه توزیع ذرات ملاحظه می‌شود، ذرات سیلیسیم به‌طور یکنواخت حول مرز ذرات آلومینیوم پراکنده شده‌اند. این در حالی است که در نمونه کامپوزیتی متراکم شده با سرعت یکسان و حاوی ۵ درصد سرامیک (شکل ۱۵)، این ذرات در حفره‌های خالی زمینه تجمع می‌یابند. این تجمع باعث اتلاف انرژی تراکم، ممانعت از اتصال مناسب بین ذرات و ایجاد ترک در نمونه شده و در نتیجه استحکام آن را کاهش می‌دهد. همچنین نقشه مربوط به توزیع اکسیژن در نمونه، در واقع نقاطی را نشان می‌دهد که اکسیژن در آن‌ها حبس شده و به دلیل ماهیت دینامیکی روش تراکم، فرصت

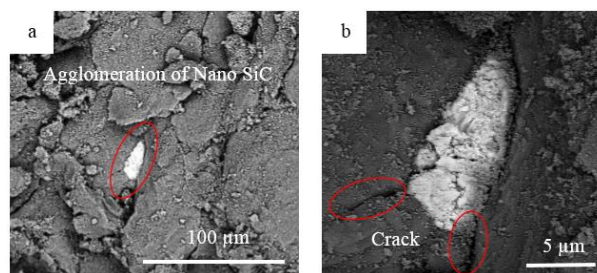


Fig. 15 Microstructure of Al-SiC composite compacted with velocity of 29.8 m/s and 5 wt% of SiC: a) agglomeration of SiC particles in Al matrix, b) initiation and growth of cracks

شکل ۱۵ ریزساختار کامپوزیت Al-SiC متراکم‌شده با سرعت ۲۹/۸ متر بر ثانیه و حاوی ۵ درصد وزنی SiC: a) تجمع ذرات SiC در زمینه آلومینیومی، b) شروع و گسترش ترک‌ها

افزایش اولیه استحکام برای درصدهای پایین (۱ درصد) می‌تواند با پدیده استحکام‌بخشی ریز-دانه‌ای<sup>۱</sup> توجیه شود. نابجایی‌های موجود در ذره، در اثر اعمال فشار در حجم آن جابجا شده و به سمت مرز دانه حرکت می‌کنند. انباشتگی نابجایی‌ها در مرز دانه‌ها، شرایط تسلیم ذره تحت تنش‌های برشی اعمال‌شده را تسهیل می‌نماید. در پدیده استحکام‌بخشی ریز-دانه‌ای، مطابق رابطه (۵)، کوچک‌تر شدن اندازه ذرات باعث کمتر شدن انباشت نابجایی‌ها در مرز ذرات شده و در نتیجه استحکام ماده را افزایش می‌دهد [۱۹].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

<sup>1</sup> Fine-grain strengthening

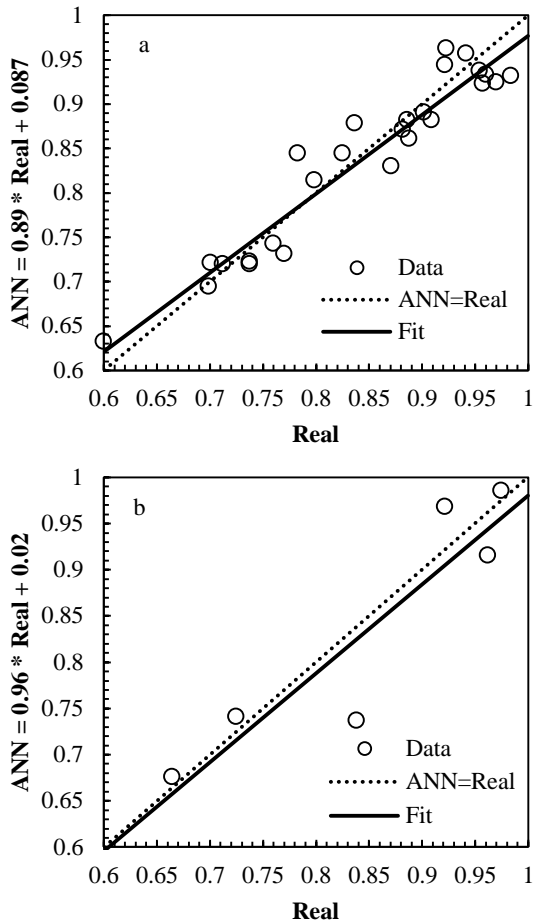


Fig. 18 Regression analysis of the real and ANN values: a) training data, b) test data

شکل ۱۸ تحلیل رگرسیون مقادیر واقعی و مقادیر حاصل از مدل ANN: (a) داده‌های آموزشی، (b) داده‌های آزمونی

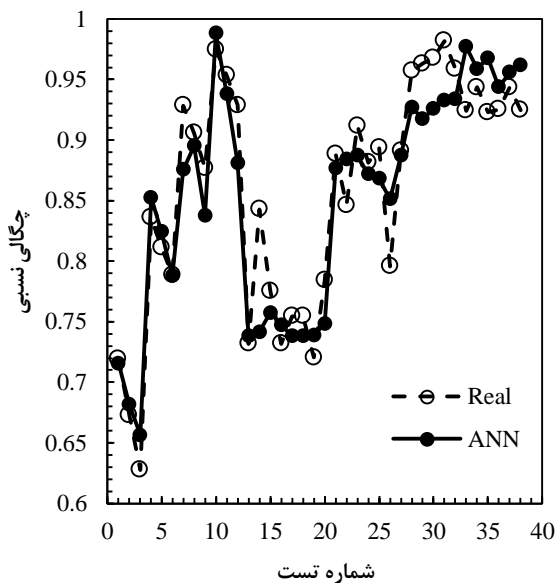


Fig. 19 Comparison between real and ANN values for all data  
شکل ۱۹ مقایسه بین مقادیر واقعی و مقادیر حاصل از مدل ANN برای کلیه داده‌ها

کافی برای تخلیه نداشته است. نحوه پراکندگی این ذرات نشان می‌دهد که اکسیژن به‌طور کاملاً یکنواخت در ساختار نمونه توزیع شده است.

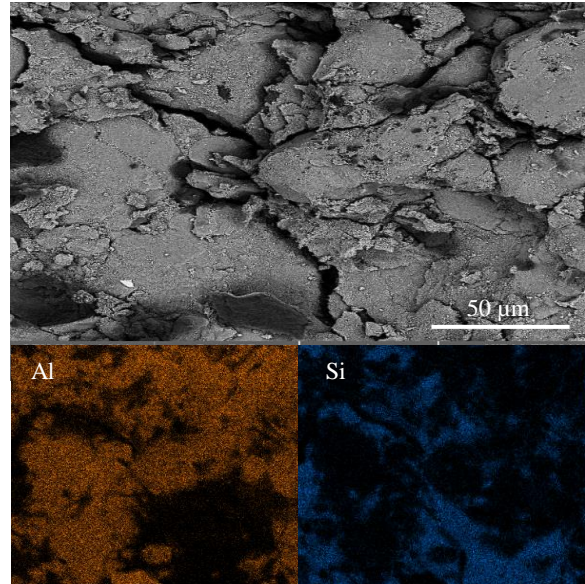


Fig. 17 Microstructure of Al-SiC composite compacted with velocity of 29.8 m/s, 1 wt% of SiC and corresponding X-Ray map

شکل ۱۷ ریزساختار کامپوزیت Al-SiC متراکم‌شده با سرعت 29.8 متر بر ثانیه، ۱ درصد وزنی SiC و نقشه اشعه ایکس متناظر

### ۳-۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش ANN

شکل ۱۸ عملکرد فرایند آموزش داده‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر شیب و عرض از مبدأ معادلات رگرسیون خطی هم برای داده‌های آموزشی (قسمت a) و هم برای داده‌های آزمونی (قسمت b) به ترتیب به مقادیر ۰ و ۱ بسیار نزدیک است که این امر نشان می‌دهد شبکه عصبی به‌خوبی آموزش دیده است. همچنین مقدار ضریب همبستگی برای داده‌های آموزشی برابر ۰/۹۴۷ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۹۱۶ است.

مقایسه بین چگالی‌های نسبی اندازه‌گیری شده به روش تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی به ازای کلیه داده‌ها، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مقدار RMSE برای کل داده‌ها برابر ۰/۰۳۳ است که این امر نشان می‌دهد مدل ANN توانسته رفتار به‌شدت غیرخطی بین داده‌ها را با دقت بسیار مناسبی پیش‌بینی نماید. اختلاف موجود بین داده‌های حاصل از مدل و داده‌های واقعی می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری و یا سایر خطاها در حین آزمایش باشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پودرهای آلومینیوم خالص و کامپوزیت Al-SiC با درصد‌های وزنی مختلف توسط سامانه تفنگ گازی به روش دینامیکی متراکم شده‌اند. چگالی، بازگشت فنری، استحکام و ریزساختار به‌عنوان مهم‌ترین خواص نمونه‌های متراکم‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج اصلی به‌دست‌آمده از این تحقیق عبارت‌اند از:

- در روش تراکم دینامیکی و در مراحل اولیه تراکم، شتاب گرفتن ذرات پودر و برخورد شدید آن‌ها با یکدیگر باعث افزایش چگالی و برقراری اتصال قفل‌شدگی مکانیکی بین ذرات می‌گردد.
- افزایش سرعت تراکم باعث افزایش تنش برشی به بیش از تنش تسلیم در سطح ذرات پودر، شکستن لایه اکسید حول ذرات و برقراری جریان پلاستیک می‌گردد. این امر به‌نوبه خود باعث افزایش چگالی و همچنین افزایش تعداد و سطح اتصالات از نوع جوش سرد می‌گردد.
- محدوده بهینه سرعت تراکم برای پودرهای بکار رفته در این تحقیق بین ۲۷/۵ تا ۲۹/۸ متر بر ثانیه است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند نمونه‌های متراکم شده در این محدوده ضمن برخورداری از چگالی و استحکام مناسب، فاقد ترک‌های ریزساختاری هستند.
- وجود ذرات سرامیک در زمینه آلومینیومی باعث استهلاک انرژی تراکم شده و در نتیجه چگالی کامپوزیت را کاهش می‌دهد.
- با افزودن ذرات SiC تا ۱ درصد وزنی، توزیع یکنواخت ذرات سرامیک در زمینه آلومینیومی، باعث خرد شدن ذرات پودر آلومینیوم و در نتیجه افزایش استحکام کامپوزیت در اثر پدیده استحکام‌بخشی ریزدانه‌ای می‌شود.
- افزایش بیش از ۱ درصد وزنی سرامیک، باعث تجمع ذرات سرامیک در زمینه آلومینیومی، استهلاک انرژی تراکم، عدم اتصال مناسب بین ذرات و ایجاد ترک در نمونه می‌گردد.
- روش مدل‌سازی تجربی-عددی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر است مقادیر چگالی نسبی قطعات خالص و کامپوزیتی حاصل از تراکم دینامیکی را با دقت بسیار مناسبی پیش‌بینی نماید.

## ۵- مراجع

- [1] V. V. Vani, S. K. Chak, The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy, *Manufacturing Review*, Vol. 5, No. 7, pp. 1-13, 2018.
- [2] S. Gierlotka, B. F. Palosz, A. Swiderska-Sroda, E. Grzanka, G. Kalisz, K. Fietkiewicz, C. Lathe,
- [3] E. Schüller, M. Bram, H. P. Buchkremer, D. Stöver, Phase transformation temperatures for NiTi alloys prepared by powder metallurgical processes, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 378, No. 1-2, pp. 165-169 2004.
- [4] 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.
- [5] G. Sethi, N. S. Myers, R. M. German, An overview of dynamic compaction in powder metallurgy, *International Materials Reviews*, Vol. 53. No. 4, 219-234, 2008.
- [6] J. S. Lee, K. Hokamoto, K. Raghukandan, K. Yamashita, S. Itoh, Development of an Underwater Dynamic Compaction Technique for Making Al-Based Composites, *In AIP Conference Proceedings*, Vol. 706, No. 1, pp. 1106-1109. 2004.
- [7] H. Eskandari, H. M. Ghasemi, M. Emamy, Microstructure and interface studies of Al/SiCp composites produced by dynamic compaction, *Materials Science Forum*, Vol. 465, pp. 213-218, 2004.
- [8] G. Singh, V. Hitesh, K. Manpreet, Fabrication and Characterization of Aluminium Matrix Composites by High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spraying, *Advanced Materials Research*, Vol. 585, pp. 317-321, 2012.
- [9] A. Atrian, G. H. Majzoobi, M. H. Enayati, H. Bakhtiari, A comparative study on hot dynamic compaction and quasi-static hot pressing of Al7075/SiCnp nanocomposite, *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 73-82, 2015.
- [10] G. H. Majzoobi, A. Atrian, H. Bakhtiari, The Effect of Pre-compaction on Dynamic Compaction Process of Al/SiC Nanocomposite Powder, *International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics*, Tehran, Iran, Feb 18-19, 2014.
- [11] N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, M. Darvizeh, H. Gharababaei, Modelling of explosive cutting process of plates using GMDH-type neural network and singular value decomposition, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, No. 1-3, pp. 80-87, 2002.
- [12] 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)
- [13] H. Babaei, T. M. Mostofi, S. H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 56, No. 4, pp. 535-548, 2015.
- [14] M. Alitavoli, E. Khaleghi, H. Babaei, T. Mirzababaei Mostofi, N. Namazi, Modeling and

- Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 361-368, 2018. (in Persian فارسی)
- [17] M. Emami, S. Shahabodin Yasrebi, Application of artificial neural networks in interpretation of pressuremeter test results, *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 14, No. 20, pp. 11-25, 2014. (in Persian فارسی)
- [18] A. Darvizeh, M. Alitavoli, N. Namazi, An investigation into the parameters affecting the breakdown voltage and inter-particle bonding in the electrical discharge compaction of metal powders, *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No. 10, pp. 2346-2355, 2018.
- [19] K. Rahmani, G. H. Majzoobi, A. Atrian, A novel approach for dynamic compaction of Mg-SiC nanocomposite powder using a modified Split Hopkinson Pressure Bar, *Powder Metallurgy*, Vol. 61, No. 2, pp. 164-177, 2018.
- prediction of metallic powder behavior in explosive compaction process by using genetic programming method based on dimensionless numbers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 0954408918761223, 2018.
- [15] M. Alitavoli, H. Babaei, A. Mahmoudi, A. Golbaf, T. M. Mostofi, Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 357-366, 2015. (in Persian فارسی)
- [16] K. Rahmani, G. Majzoobi, An investigation on SiC volume fraction and temperature on static and dynamic behavior of Mg-SiC nanocomposite fabricated by powder metallurgy, *Modares*