



## اثر افزودن آلومینا بر خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند دیواره

حسین نصیری<sup>۱</sup>، محمد مراد شیخی<sup>۱</sup>، حیدر رضانی<sup>۱</sup>، سروش پرویزی<sup>۲\*</sup>، زهرا علیرضایی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: parvizi@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ آذر ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۹ دی ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

کامپوزیت زمینه آلومینیوم

متالورژی پودر

نانولوله‌های کربنی چند دیواره

خواص مکانیکی

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی از متداول‌ترین کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند که در صنایع مهمی چون خودروسازی و هوافضا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب تقویت‌کننده مناسب به این کامپوزیت‌ها که افزایش خواص مکانیکی را به همراه داشته باشد برای صنعت بسیار ارزشمند است. در پژوهش حاضر، اثر افزودن آلومینا در درصدهای وزنی ۰، ۱ و ۳ به کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند دیواره، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا پودرهای اولیه با استفاده از روش آسیاکاری سیاره‌ای به مدت ۲ ساعت و نسبت گلوله به پودر ۱۰:۱ با یکدیگر ترکیب شدند. ترکیبات پودری حاصل، برای رسیدن به یک استحکام اولیه تحت فشار پرس هیدرولیک (۱۵۰ مگاپاسگال) قرار گرفتند، سپس دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۴۵ دقیقه تفجوشی شدند. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراکندگی تقویت‌کننده‌ها در زمینه کامپوزیت تقریباً یکسان بود که نشان از انتخاب روش و زمان مناسب آسیاکاری دارد. براساس نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی، نمونه فاقد سرامیک آلومینا دارای سختی ۲۴،۳ برینل و ضریب سایش ۰،۴۱۰ بود. در مقایسه، نمونه‌ای که حاوی ۳ درصد وزنی آلومینا بود، به سختی ۳۰،۶ برینل و ضریب سایش ۰،۳۳۲ رسید. یعنی سختی ۲۶ درصد افزایش و ضریب سایش ۱۹ درصد کاهش داشته است. این بهبود خواص را می‌توان نتیجه سختی ذاتی سرامیک آلومینا، پراکندگی خوب تقویت‌کننده‌ها در زمینه و همچنین اثر هم‌افزایی تقویت‌کننده‌ها دانست.

## The effect of alumina addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes

Hossein Nasiri<sup>1</sup>, Mohammad Morad Sheikhi<sup>1</sup>, Haidar Ramazani<sup>1</sup>, Soroush Parvizi<sup>2\*</sup>, Zahra Alirezaei<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Materials and Metallurgical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: parvizi@sru.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 12 December 2024

Accepted: 18 January 2025

#### Keywords:

Aluminum Matrix Composite

Powder Metallurgy

Multi-Walled Carbon Nanotubes

Mechanical Properties

### Abstract

Aluminum matrix composites (AMCs) are among the most common metal matrix composites (MMCs), widely utilized in major industries such as automotive and aerospace. Selecting suitable reinforcements to improve the mechanical properties of these composites is highly valuable for industrial applications. In the present study, the effect of adding alumina in 0, 1, and 3 wt% to an AMC reinforced with 1 wt% multi-walled carbon nanotubes was investigated. Initially, the primary powders were mixed using a planetary ball milling method for 2 hours with a ball-to-powder ratio of 10:1. The resulting powder mixtures were subjected to hydraulic pressing at 150 MPa to achieve initial strength, followed by sintering at 530°C for 45 minutes. According to scanning electron microscopy (SEM) images, the dispersion of reinforcements in the composite matrix was nearly uniform, demonstrating the suitability of the selected milling method and duration. Based on the results of mechanical property tests, the alumina-free sample exhibited a hardness of 24.3 Brinell and a wear coefficient of 0.410. In comparison, the sample containing 3 wt% alumina achieved a hardness of 30.6 Brinell and a wear coefficient of 0.332, representing a 26% increase in hardness and a 19% reduction in the wear coefficient. These improvements in properties can be attributed to the intrinsic hardness of alumina, the uniform dispersion of reinforcements in the matrix, and the synergistic effect of the reinforcements.

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Nasiri H, Sheikhi MM, Ramazani H, Parvizi S, Alirezaei Z. The effect of alumina addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Feb 19;11(12):25-34. doi: 10.22034/ijme.2025.492621.2034 [In Persian]

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف به دلیل خواص منحصر به فرد و قابلیت سفارش‌سازی بالا به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۱]. این مواد از ترکیب یک ماده به‌عنوان زمینه و یک یا چند ماده دیگر به‌عنوان تقویت‌کننده ساخته می‌شوند و خواص و عملکرد بهتری را نسبت به مواد یکپارچه ارائه می‌دهند [۱-۳]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی<sup>۱</sup> به دلیل ویژگی‌هایی چون چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، خواص سایشی مطلوب و همچنین هزینه تولید پایین، یکی از متداول‌ترین کامپوزیت‌های رایج در صنعت هستند [۴، ۵] که به‌طور گسترده‌ای در صنایع مهمی چون خودروسازی [۶] و هوافضا، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. انتخاب تقویت‌کننده‌ی مناسب که موجب تقویت خواص مکانیکی و عملکرد بهتر کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی شود نقش مهمی در توسعه و ارتقای این کامپوزیت‌ها دارد [۸، ۹]. از دهه ۱۹۹۰ که ایجیما مقاله خود را در ارتباط با نانولوله‌های کربنی منتشر کرد [۱۰]، این مواد به‌عنوان یک تقویت‌کننده مهم برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی شناخته شدند و مورد استفاده قرار گرفتند [۱۱]، [۱۲]. نانولوله‌های کربنی چند دیواره<sup>۲</sup> دارای خواصی ویژه‌ای هستند، میزان سفتی آن‌ها تا حدود ۹۷۰ گیگا پاسکال گزارش شده است، و دارای استحکام ~ ۶۳ گیگا پاسکال [۱۳] و رسانایی حرارتی تا ۳۰۰۰ وات بر متر کلین [۱۴] هستند. این خواص منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی همراه با چگالی پایین آن‌ها، این مواد را به یک تقویت‌کننده ایده‌آل برای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تبدیل کرده است [۱۵]. مجید و همکاران [۱۶] از نانولوله‌های کربنی برای تقویت کامپوزیت زمینه آلومینیومی استفاده کردند. آنها مقادیر ۰، ۱ و ۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی را به زمینه آلومینیومی افزودند. نتایج نشان داد افزودن ۱ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی موجب افزایش ۵۰ درصدی تنش تسلیم مواد در مقایسه با آلومینیوم خالص می‌شود. این یافته‌ها نشان‌دهنده اثر مثبت نانولوله‌های کربنی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی است.

از دیگر تقویت‌کننده‌های رایج که معمولاً موجب بهبود خواص در کامپوزیت‌ها می‌شود، آلومینا است [۱۷]. در همین راستا، لی و همکاران [۱۸] به کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی، نانولوله‌های کربنی و ذرات آلومینا افزودند. نتایج نشان داد افزودن این تقویت‌کننده‌ها باهم نقش هم‌افزایی در زمینه کامپوزیت ایجاد کردند و خواص مکانیکی این کامپوزیت زمینه منیزیمی را بهبود بخشیدند. در پژوهش دیگری تونزنده‌جانی و همکاران [۱۹] به بررسی تأثیر جداگانه نانولوله‌های کربنی و آلومینا به زمینه آلومینیومی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد، افزودن نانولوله‌های کربنی باعث تقویت سختی و مدول یانگ می‌شود اما افزودن بیش از ۲ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی تجمع تقویت‌کننده‌ها و افت خواص را همراه داشت. آن‌ها همچنین گزارش کردند افزودن آلومینا به دلیل قابلیت پراکندگی یکنواخت در زمینه و عدم واکنش شیمیایی با آلومینیوم گزینه مناسبی برای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی است.

مسیرهای ساخت متفاوتی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد اما روش متالورژی پودر<sup>۳</sup> یکی از رایج‌ترین فرآیندهای شناخته شده است [۲۰]. در بین انواع مختلف روش‌های متالورژی پودر، روش متالورژی پودر متداول<sup>۴</sup> به دلیل هزینه پایین و در دسترس بودن، یک گزینه مناسب به شمار می‌رود [۲۱].

هدف از پژوهش حاضر، ساخت کامپوزیت هیبریدی زمینه آلومینیومی، که با مقدار بهینه ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چنددیواره و درصدهای مختلف آلومینا (۰، ۱ و ۳ درصد وزنی) برای رسیدن به کامپوزیتی با خواص مکانیکی مطلوب است، به همین منظور، فرآیند متالورژی پودر متداول به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه انتخاب شد و عملکرد این کامپوزیت در ارزیابی‌های ریزساختاری و آزمون‌های سختی و مقاومت سایشی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- همگن‌سازی و ساخت

مواد اولیه این پژوهش شامل پودر آلومینیوم (Al)، پودر نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNTs) و پودر آلومینا ( $Al_2O_3$ ) می‌شود که در جدول ۱ براساس اطلاعات شرکت سازنده، مشخصات هر یک از پودرها به تفکیک آورده شده است. در ابتدا، هر یک از مواد اولیه به‌طور

<sup>1</sup> AMCs

<sup>2</sup> MWCNTs

<sup>3</sup> Powder Metallurgy

<sup>4</sup> Conventional Powder Metallurgy

دقیق با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت  $0.001$  وزن شدند و ترکیبات هر نمونه با درصد وزنی مشخص آماده‌سازی شد. جزئیات ترکیب وزنی مواد برای هر نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات هر یک از مواد اولیه

نام پودر	متوسط اندازه مواد	خلوص (درصد)	چگالی	نام شرکت ارائه دهنده
آلومینیوم	$20 \mu\text{m}$	$<99/5$	$2/9 \text{gr/cm}^3$	Ghatran shimi
نانولوله کربنی چند دیواره	قطر خارجی: $20-30 \text{nm}$ طول: $5-1 \mu\text{m}$	$<95$	$2/1 \text{gr/cm}^3$	Us-nano
آلومینا	$50 \text{nm}$	$<99$	$3/97 \text{gr/cm}^3$	Us-nano

جدول ۲ نام و ترکیبات هر نمونه

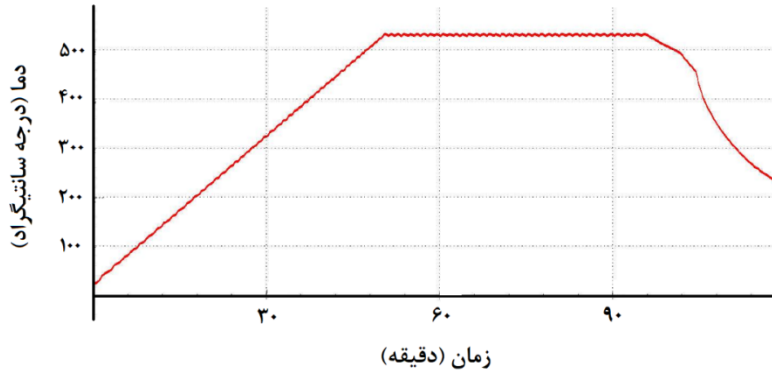
نام هر کامپوزیت	درصد وزنی
AICA0	Al - 1 wt% MWCNTs
AICA1	Al - 1 wt% MWCNTs - 1 wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$
AICA3	Al - 1 wt% MWCNTs - 3 wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$

پس از آماده‌سازی مقادیر مشخص از مواد اولیه، فرآیند آسیاکاری برای دستیابی به مخلوطی یکنواخت انجام شد. این فرآیند با استفاده از دستگاه آسیای سیاره‌ای ساخت شرکت آرتینه صنعت پرتو با سرعت چرخش  $250$  دور در دقیقه، مدت زمان  $2$  ساعت و نسبت گلوله به پودر  $10:1$  در اتمسفر گاز آرگون برای جلوگیری از اکسیداسیون مواد صورت گرفت. محفظه و گلوله‌ها از جنس فولاد ضد زنگ بودند و قبل از شروع فرآیند، به‌طور کامل تمیز شدند تا از ورود آلودگی به مواد جلوگیری شود. به‌منظور جلوگیری از آگلومره شدن و جوش سرد ذرات،  $2$  درصد وزنی اسید استتاریک به مخلوط پودرها اضافه شد. پس از پایان آسیاکاری، مخلوط یکنواخت و آماده برای مرحله پرس شد. به‌منظور دستیابی به استحکام اولیه، فرآیند فشرده‌سازی پودرها با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک با ظرفیت  $25$  تن صورت گرفت. قبل از ریختن پودرها درون قالب، دیواره داخلی قالب با استفاده از اسپری روانکار پوشش داده شد تا از چسبیدن پودر به دیواره جلوگیری شود. سپس پودر به داخل قالب ریخته شد و تحت فشار  $150$  مگاپاسکال به مدت  $30$  ثانیه قرار گرفت. در نتیجه، قطعات استوانه‌ای با قطر  $25$  میلی‌متر و ارتفاع تقریبی  $8$  میلی‌متر تولید شدند. قطعات پرس شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمونه‌های پرس شده

برای حذف مواد اضافی مانند روان‌سازها و همچنین خشک کردن نمونه‌ها، نیاز به عملیات حرارتی قبل از فرآیند تفجوشی است. تمامی نمونه‌ها به مدت  $30$  دقیقه در دمای ثابت  $100$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. برای انجام فرآیند تفجوشی، نمونه‌ها به کوره تیوپی ساخت شرکت آرتینه صنعت پرتو منتقل شدند. مطابق با نمودار شکل ۲، تفجوشی در اتمسفر آرگون و تحت آهنگ افزایش دما  $10$  درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام گرفت. نمونه‌ها به مدت  $45$  دقیقه در دمای  $530$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در نهایت سرد شدن آن‌ها در محیط آرگون محبوس شده در کوره صورت گرفت.



شکل ۲ نمودار سیکل حرارتی تفجوشی نمونه‌ها

## ۲-۲- بررسی چگالی نمونه‌ها

هدف این آزمون، بررسی میزان فشردگی نمونه‌ها و تأثیر افزودن ذرات تقویت‌کننده بر چگالی و تخلخل نمونه‌ها است. برای اندازه‌گیری چگالی به روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد ASTM B328 از ترازویی با دقت ۰,۰۰۱ استفاده شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط یکسان و در آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه انجام شد، ابتدا وزن نمونه در هوا و سپس وزن آن‌ها در آب در حالت معلق اندازه‌گیری شد. اختلاف وزن نمونه در این دو حالت مبنای محاسبه چگالی و میزان تخلخل نمونه‌ها قرار گرفت.

## ۲-۳- متالوگرافی و بررسی ریزساختار

برای بررسی ریزساختار قطعات ساخته‌شده، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سنباده با درجات زبری مختلف (از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰) به‌طور کامل پولیش شدند تا سطحی صاف و آماده برای مطالعه و بررسی فراهم شود. به‌منظور بررسی دقیق ریزساختار، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۱</sup> مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN استفاده شد. این روش امکان انجام تجزیه و تحلیل شیمیایی کیفی و کمی را فراهم کرد. همچنین، تصاویر نقشه‌ی آنالیز عنصری<sup>۲</sup> از سطح هر یک از نمونه‌ها تهیه شد تا نحوه پراکندگی تقویت‌کننده‌ها در کامپوزیت به‌دقت مطالعه گردد.

## ۲-۴- آزمون‌های خواص مکانیکی (سختی و سایش)

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تولیدشده، آزمون‌های سختی و سایش مطابق با استانداردهای مرتبط انجام شدند. آزمون سختی به روش برینل برای سنجش مقاومت سطحی نمونه‌ها انجام گرفت. پیش از این آزمون‌ها، سطح نمونه‌ها سنباده‌زنی و پولیش شد و سپس سختی آن‌ها با استفاده از دستگاه سختی سنج مدل Koopa UV1 و طبق استاندارد ASTM E10 تعیین شد. در این آزمون، از ساچمه‌ای با قطر ۲,۵ میلی‌متر، با نیروی ۳۱,۲۵ کیلوگرم استفاده گردید. مدت زمان اعمال نیرو برابر با ۱۰ ثانیه بود. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری، آزمون سختی روی هر نمونه پنج بار تکرار شد و میانگین نتایج به‌عنوان سختی نهایی گزارش شد. آزمون سایش نیز برای ارزیابی مقاومت سایشی نمونه‌ها با استفاده از روش پین بر روی دیسک انجام شد که یک روش متداول برای بررسی رفتار سایشی مواد کامپوزیتی شناخته می‌شود. در این روش، حرکت لغزشی پین بر روی سطح نمونه‌ها یک مسیر دایره‌ای ایجاد کرد. نمونه‌ها به‌عنوان دیسک انتخاب شدند و مراحل کار طبق استاندارد ASTM G99 انجام شد. پین به‌صورت استوانه‌ای به قطر ۳ میلی‌متر و از جنس فولاد ضد زنگ بود. پارامترهای آزمون شامل نیروی اعمالی برابر با ۱ نیوتن، سرعت چرخش ۹۰ دور در دقیقه و مسافت سایشی ۵۰۰ متر بودند. مسیر سایشی ایجادشده روی نمونه‌ها به‌صورت دایره‌ای با قطر ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۳). وزن نمونه‌ها پیش و پس از آزمون، با دقت ۰,۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد تا میزان کاهش وزن در طول فرآیند سایش محاسبه شود. نتایج آزمون به‌صورت نمودار ضریب سایش بر حسب زمان ارائه شده است.

<sup>1</sup> FESEM

<sup>2</sup> Elemental Mapping



شکل ۳ تصویر نمونه‌ها پس از آزمون سایش را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، نمونه ۱: AICAO، نمونه ۲: AICA1، نمونه ۳: AICA3.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- چگالی نسبی

جدول ۳ چگالی تجربی و چگالی نسبی هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. چگالی تجربی با ثابت نگه داشتن درصد نانولوله‌ها و افزایش درصد آلومینا از ۱ به ۵ درصد وزنی، افزایش یافته است که به دلیل چگالی بالاتر ذرات آلومینا است. همچنین، چگالی نسبی نیز به میزان کمی افزایش یافته است که این افزایش را می‌توان به اندازه کوچک‌تر ذرات آلومینا نسبت داد؛ زیرا اندازه ذرات آلومینا (۵۰ نانومتر) به مراتب کوچکتر از ذرات زمینه یعنی آلومینیوم (۲۰ میکرومتر) است. در نتیجه، ذرات آلومینا در فرآیند پرس، فضاهای خالی بین ذرات را پر کرده و باعث افزایش چگالی نسبی شده‌اند.

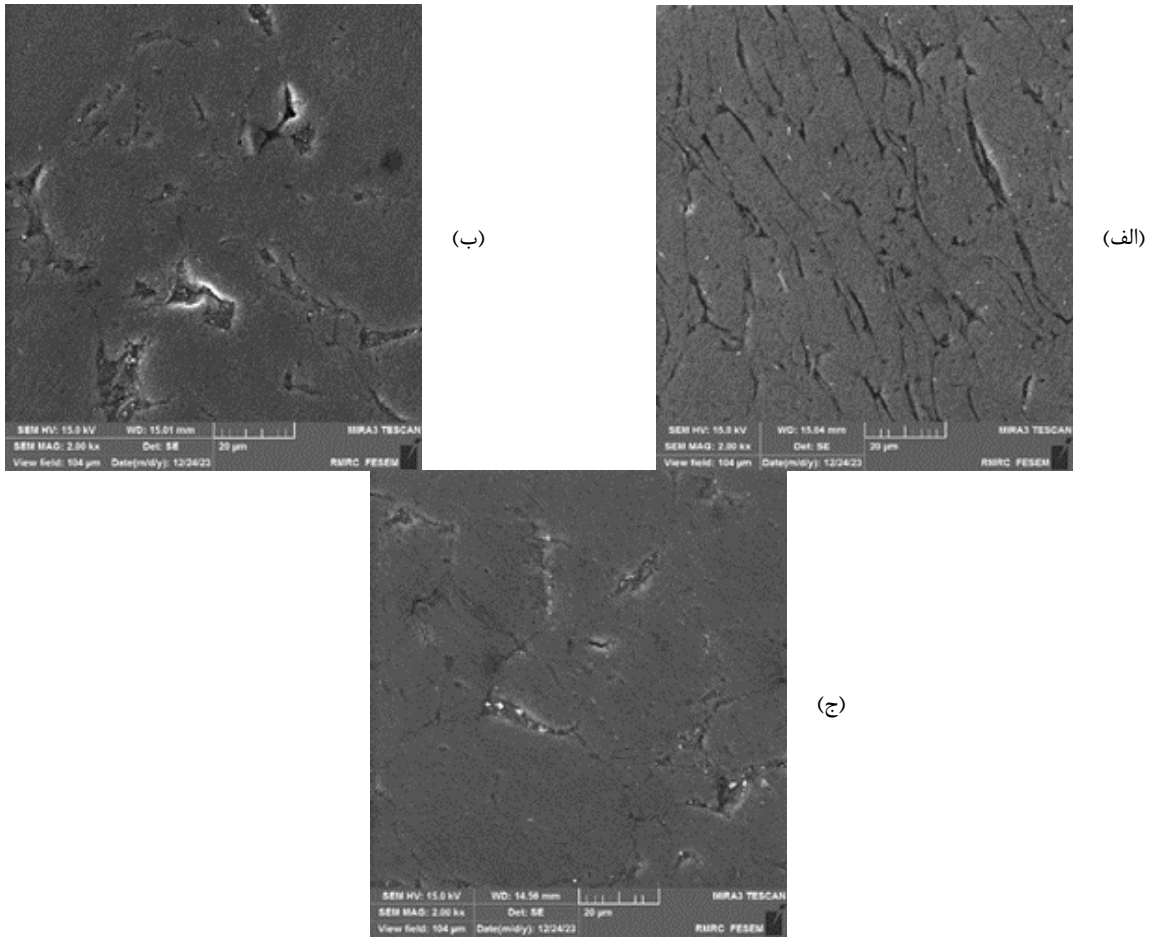
جدول ۳ چگالی نسبی و چگالی تجربی

نمونه	چگالی تجربی (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی نسبی (%)
AICAO	۲/۵۲۸	۹۳/۸۴
AICA1	۲/۵۴۵	۹۴/۰۲
AICA3	۲/۵۸۴	۹۴/۵۸

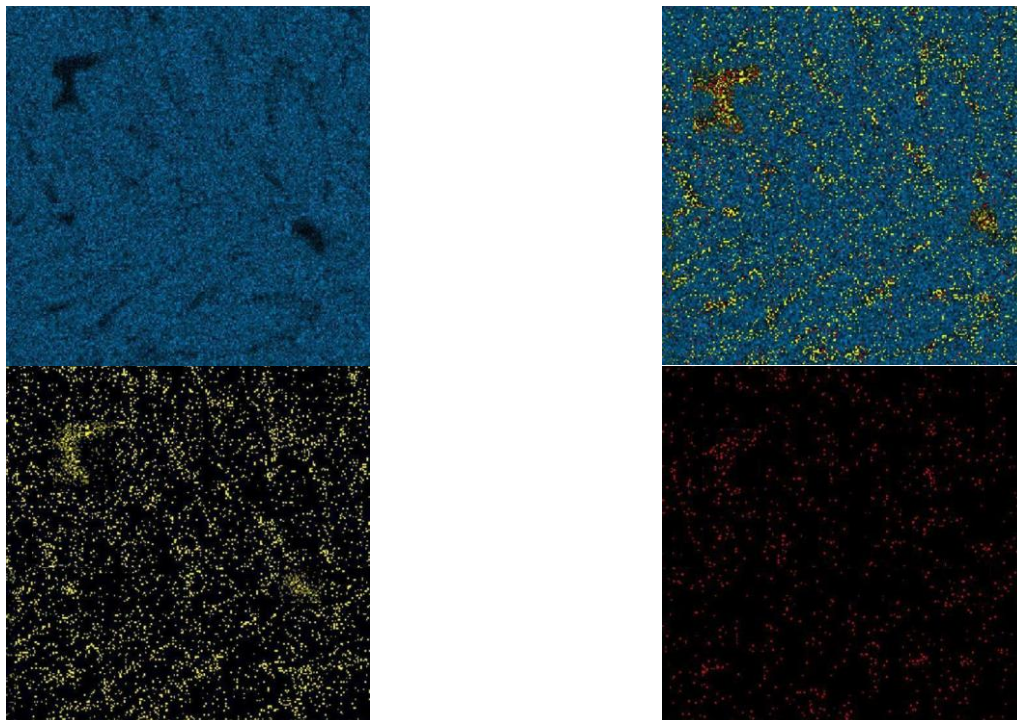
#### ۳-۲- ریزساختار

شکل (۴-الف) پراکندگی نانولوله‌های کربنی در زمینه آلومینیومی در غیاب تقویت‌کننده دوم (آلومینا) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، پراکندگی نانولوله‌ها تقریباً یکنواخت است که نشان‌دهنده انتخاب زمان مناسب فرآیند آسیاکاری است. در این حالت، چون تنها یک نوع تقویت‌کننده (نانولوله‌های کربنی) حضور دارد، فرآیند همگن‌سازی ساده‌تر است و ساختاری بدون ترک‌های قابل توجه و تمرکز نانولوله‌ها در شکل قابل مشاهده است. در تصاویر (۴-ب) و (۴-ج)، علاوه بر نانولوله‌های کربنی، ذرات آلومینا نیز به‌عنوان تقویت‌کننده دوم حضور دارند. نقاط سفیدرنگ در این تصاویر، ذرات آلومینا را نشان می‌دهند.

شکل ۵ آنالیز نقشه برداری عنصری نمونه‌ی AICA3 را نشان می‌دهد، که بالاترین خواص مکانیکی را به دست آورده است. در این تصویر، نقاط آبی نمایانگر آلومینیوم، نقاط قرمز نشان‌دهنده کربن (نانولوله‌های کربنی) و نقاط زرد معرف ذرات آلومینا هستند. با مقایسه تصاویر مشخص می‌شود که فرآیند همگن‌سازی نمونه‌ها تقریباً به طور یکنواختی انجام شده است. شایان ذکر است که همگن‌سازی نانولوله‌های کربنی به دلیل تمایل بالای آن‌ها به تجمع و تشکیل کلوخه، فرآیندی چالش‌برانگیز است. این یکنواختی نشان‌دهنده موفقیت در فرآیند آسیاکاری و یکی از مزایای کلیدی روش متالورژی پودر در مقایسه با فرآیند ریخته‌گری محسوب می‌شود.



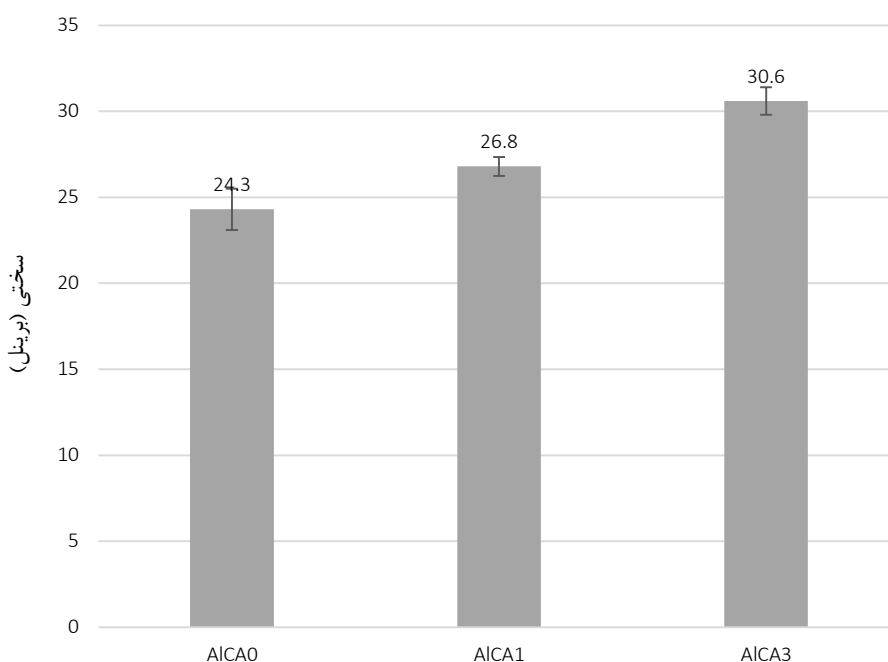
شکل ۴ ریز ساختار هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد: الف) نمونه AICA0، ب) نمونه AICA1، ج) نمونه AICA3



شکل ۵ نقشه آنالیز عنصری نمونه AICA3 را نشان می‌دهد. نقاط آبی نمایانگر ذرات زمینه (آلومینیوم)، نقاط قرمز نمایانگر نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نقاط زرد نشان‌دهنده پراکندگی ذرات آلومینا هستند.

### ۳-۳- بررسی سختی و خواص سایشی

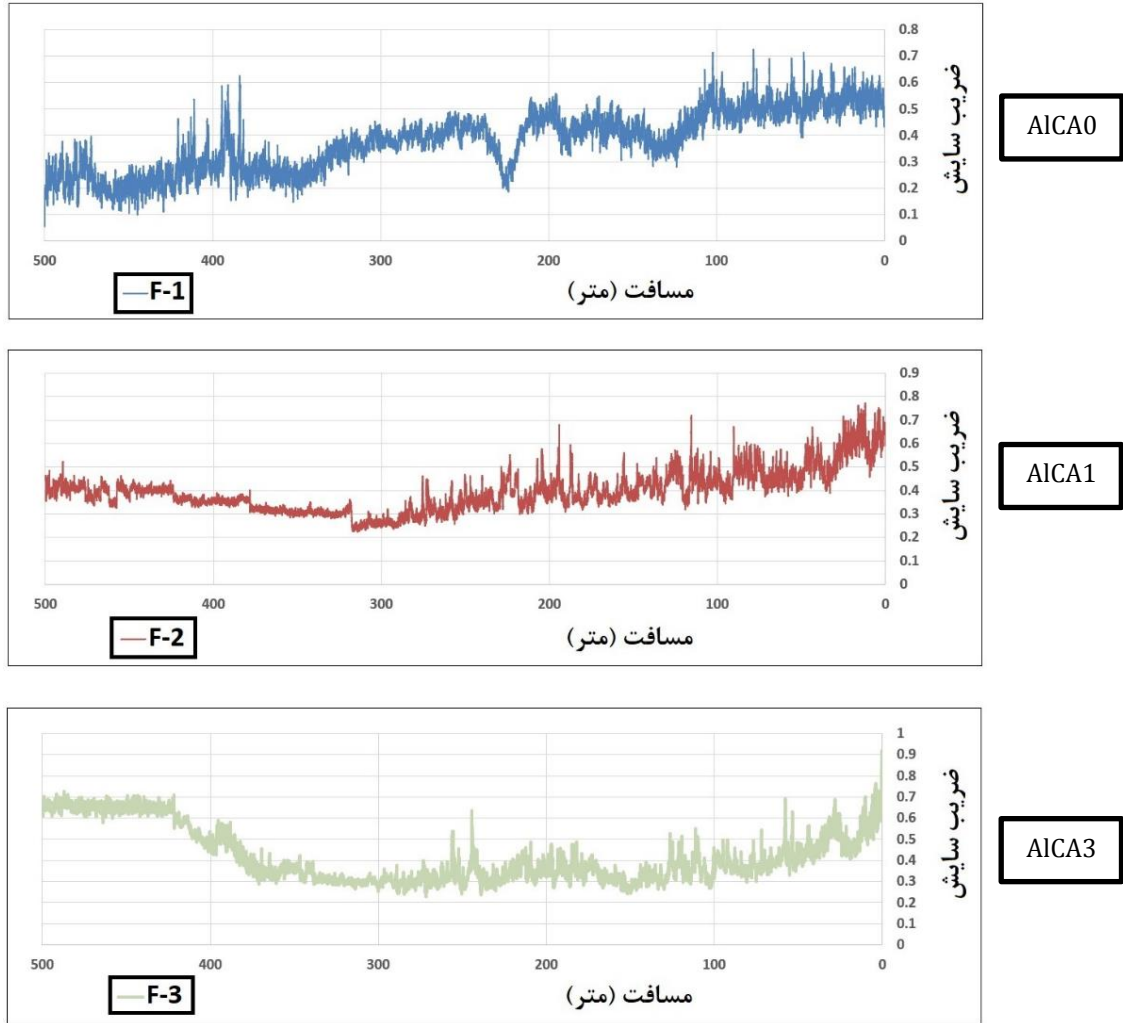
شکل ۶ نمودار سختی برینل هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، نمونه AICA0 که فاقد نانوذرات آلومینا است، کمترین سختی یعنی ۲۴٫۳ برینل را داراست. با افزودن تنها ۱ درصد وزنی آلومینا در کامپوزیت AICA1، سختی به ۲۶٫۸ برینل افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانو ذرات آلومینا بر سختی کامپوزیت است. در نمونه AICA3 با افزودن ۳ درصد وزنی آلومینا، سختی به ۳۰٫۶ برینل رسید. که نسبت به نمونه AICA0 افزایش ۲۶ درصدی را نشان داد. این افزایش سختی، به حضور همزمان نانولوله‌های کربنی و ذرات آلومینا نسبت داده می‌شود که با ایجاد اثر هم‌افزایی در ساختار، منجر به بهبود خواص مکانیکی شده‌اند. همان‌طور که لی و همکارانش [۱۸] در تحقیقات خود نشان دادند، حضور نانولوله‌های کربنی و آلومینا به‌عنوان تقویت‌کننده‌های هم‌افزا می‌توانستند خواص مکانیکی کامپوزیت فلزی زمینه منیزی را بهبود بخشند.



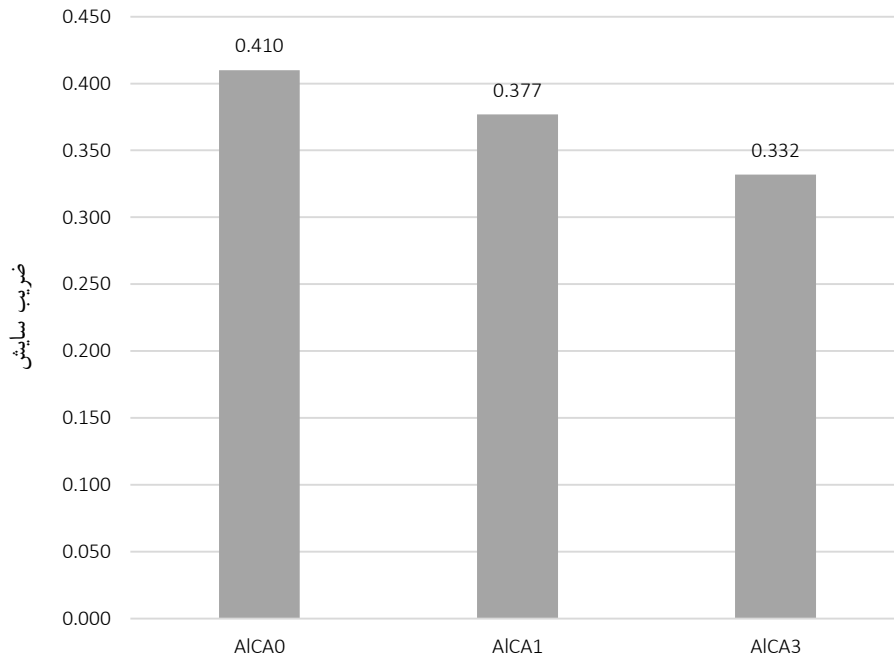
شکل ۶ مقادیر سختی نمونه‌ها

برای ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها، آزمون پین روی دیسک در دستگاه سایش انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ضریب سایش نمونه‌ها در لحظه آغاز حرکت در بالاترین مقدار قرار دارد. این افزایش اولیه به دلیل اصطکاک زیاد بین سطح نمونه و پین است که از حالت سکون به حرکت در می‌آید. با ادامه حرکت و افزایش مسافت، اصطکاک کاهش یافته و ضریب سایش به تدریج کاهش می‌یابد و در نهایت به مقدار ثابت و پایدار می‌رسد.

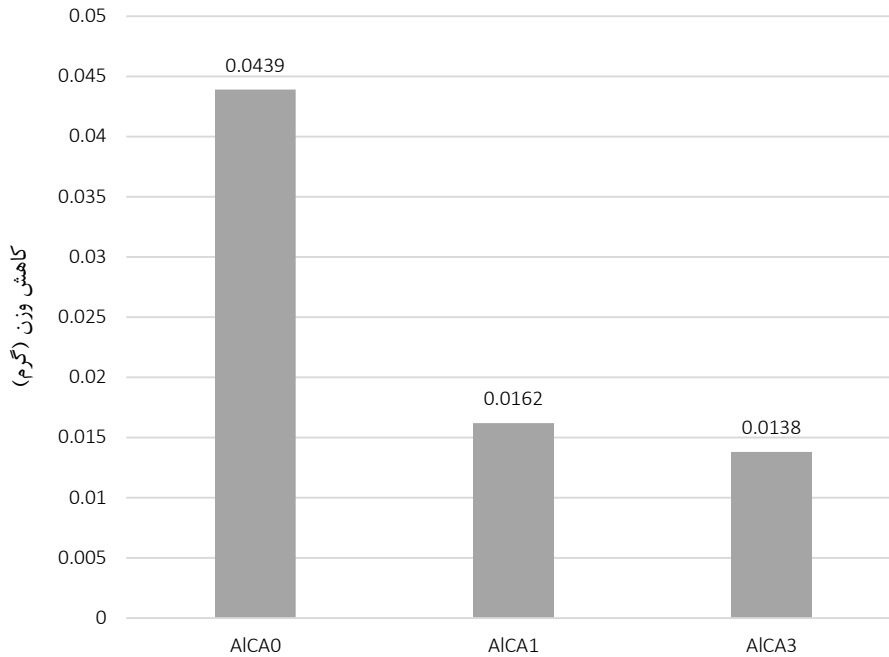
شکل ۸ و ۹ ضریب سایشی و مقدار کاهش وزن هر یک از نمونه‌ها بعد از آزمون سایش را نشان می‌دهد. نمونه AICA0 که فاقد سرامیک آلومینا است، در انتهای فرآیند سایش بیشترین میزان کاهش وزن (گرم ۰٫۰۴۳) و بالاترین مقدار ضریب سایش (۰٫۴۱۰) را نشان داد. این میزان ضریب سایش و کاهش وزن، که در نبود ذرات آلومینا صورت گرفته به دلیل زمینه نرم کامپوزیت آلومینیومی است. از سوی دیگر، نمونه‌های AICA1 و AICA3 که دارای ذرات سخت آلومینا بودند، به ترتیب کاهش وزن ۰٫۰۱۶ و ۰٫۰۱۳ گرم را نشان دادند و ضریب سایشی آنها به ترتیب ۰٫۳۳۷ و ۰٫۳۳۲ بود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزودن نانوذرات آلومینا به ساختار کامپوزیت است. ذرات آلومینا که دارای سختی ذاتی بالایی هستند، مقاومت بیشتری در برابر سایش ایجاد می‌کنند و از فرسایش سطحی نمونه‌ها جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، نمونه فاقد آلومینا (AICA0) به دلیل نرمی بیشتر، در معرض سایش شدیدتری قرار می‌گیرد و ضریب سایش بالاتری دارد.



شکل ۷ تغییرات ضربه سایش نمونه‌ها بر حسب مسافت



شکل ۸ مقدار میانگین ضربه سایش نمونه‌ها



شکل ۹ مقدار کاهش وزن نمونه‌ها بعد از آزمون سایش.

#### ۴- نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند دیواره و مقادیر مختلف آلومینا (۰، ۱ و ۳ درصد وزنی) با استفاده از آسیاکاری سیاره‌ای همگن و با روش متالورژی پودر معمولی در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد تف‌جوشی شدند. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نقشه آنالیز عنصری، تقویت‌کننده‌ها تقریباً به صورت همگن در زمینه آلومینیومی پراکنده شده‌اند، که نشان‌دهنده زمان مناسب آسیاکاری و فرآیند تف‌جوشی است.
- با افزایش درصد آلومینا در ساختار، سختی نمونه‌ها نیز افزایش یافت. به طوری که در نمونه فاقد آلومینا، سختی برینل برابر با ۲۴،۳ بود، در نمونه با ۱ درصد آلومینا سختی به ۲۶،۸ برینل رسید و در نمونه با ۳ درصد آلومینا به ۳۰،۶ برینل افزایش یافت. یعنی با افزودن ۳ درصد وزنی آلومینا، سختی نسبت به نمونه‌ای که فاقد آلومینا بود ۲۵،۹۳ درصد افزایش داشته است. این بهبود خواص مکانیکی را می‌توان در نتیجه، پراکندگی خوب تقویت‌کننده‌ها در زمینه، سختی ذاتی آلومینا و اثر هم‌افزایی بین نانولوله‌های کربنی و آلومینا است.
- با افزودن آلومینا و افزایش سختی، خواص سایشی نیز تقویت شد. در نمونه فاقد آلومینا، ضریب سایش ۰،۴۱۰ اندازه‌گیری شد. با افزودن ۱ درصد وزنی آلومینا، این مقدار به ۰،۳۷۷ کاهش یافت (حدود ۸ درصد کاهش) و در نمونه حاوی ۳ درصد وزنی آلومینا به ۰،۳۳۲ رسید (حدود ۱۹ درصد کاهش نسبت به نمونه فاقد آلومینا) که نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه در مقاومت به سایش است.
- این نتایج حاکی از آن است که استفاده از ترکیب‌های هیبریدی از مواد تقویت‌کننده، مانند آلومینا و نانولوله‌های کربنی، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های فلزی منجر شود و برای کاربردهایی که نیاز به مواد سبک و با خواص مکانیکی مناسب دارند، کاندیدای مناسبی هستند.

#### References

- [1] Gay D. Composite materials: design and applications. CRC press; 2022 Aug 31. doi: 10.1201/9781003195788
- [2] Kazemi H, Salamat-Talab M, Ghanbari D. Investigating the effect of Silica/Magnesium hydroxide composite nanoparticles on the flexural properties of polymer-based nanocomposites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Feb 20;10(12):53-65. doi: 10.22034/IJME.2024.435372.1917 [In Persian]

- [3] Rezai Ashtiani HR, Ehsani H. Production of aluminum-based composites from recycled chips by hot extrusion processing. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Feb 20;10(12):28-38. doi: [10.22034/ijme.2024.432303.1889](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.432303.1889) [In Persian]
- [4] Torralba JD, Da Costa CE, Velasco F. P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003 Feb 1;133(1-2):203-6. doi: [10.1016/S0924-0136\(02\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00234-0)
- [5] Surappa MK. Aluminum matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*. 2003 Feb;28:319-34. doi: [10.1007/BF02717141](https://doi.org/10.1007/BF02717141)
- [6] Wu X, Zhang W. A review on aluminum matrix composites' characteristics and applications for automotive sector. *Heliyon*. 2024 Sep 26. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e38576](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38576)
- [7] Eliasson J, Sandström R. Applications of aluminium matrix composites. *Key engineering materials*. 1995 Jul 12;104:3-6. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.104-107.3](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.104-107.3)
- [8] Shabestari S, Etemadi Maleki S, Rikhtegar F. Investigation on hardness and porosity of Al-CNT and Al2024-CNT nanocomposites produced by cold press-sintering and spark plasma sintering (SPS) methods. *Metallurgical Engineering*. 2017 Sep 23;20(3):209-18. doi: [10.22076/me.2017.60551.1123](https://doi.org/10.22076/me.2017.60551.1123) [In Persian]
- [9] Samal P, Vundavilli PR, Meher A, Mahapatra MM. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Nov 1;59:131-52. doi: [10.1016/j.jmapro.2020.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.010)
- [10] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*. 1991 Nov 7;354(6348):56-8. doi: [10.1038/354056a0](https://doi.org/10.1038/354056a0)
- [11] Miranda A, Barekar N, McKay BJ. MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019 Feb 5;774:820-40. doi: [10.1016/j.jallcom.2018.09.202](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.202)
- [12] Nieto A, Agarwal A, Lahiri D, Bisht A, Bakshi SR. Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites. CRC press; 2021 May 17. doi: [10.1201/9780429299582](https://doi.org/10.1201/9780429299582)
- [13] Yu MF, Lourie O, Dyer MJ, Moloni K, Kelly TF, Ruoff RS. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*. 2000 Jan 28;287(5453):637-40. doi: [10.1126/science.287.5453.637](https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637)
- [14] Kim P, Shi L, Majumdar A, McEuen PL. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical review letters*. 2001 Oct 31;87(21):215502. doi: [10.1103/PhysRevLett.87.215502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.215502)
- [15] Ostovan F, Matori KA, Toozandehjani M, Oskoueian A, Yusoff HM, Yunus R, Ariff AH, Quah HJ, Lim WF. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*. 2015 Sep 15;166:160-6. doi: [10.1016/j.matchemphys.2015.09.041](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.09.041)
- [16] Majid M, Majzoobi GH, Noozad GA, Reihani A, Mortazavi SZ, Gorji MS. Fabrication and mechanical properties of MWCNTs-reinforced aluminum composites by hot extrusion. *Rare metals*. 2012 Aug;31:372-8. doi: [10.1007/s12598-012-0523-6](https://doi.org/10.1007/s12598-012-0523-6)
- [17] Casati R, Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review. *Metals*. 2014 Mar 10;4(1):65-83. doi: [10.3390/met4010065](https://doi.org/10.3390/met4010065)
- [18] Li H, Fan J, Geng X, Li B, Liang C, Wang H, Li Y, Qiao Z, Kang J. Alumina powder assisted carbon nanotubes reinforced Mg matrix composites. *Materials & Design*. 2014 Aug 1;60:637-42. doi: [10.1016/j.matdes.2014.04.017](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.017)
- [19] Toozandehjani M, Ostovan F. Microstructural and Mechanical Characterization of CNT-and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Reinforced Aluminum Matrix Nanocomposites Prepared by Powder Metallurgy Route. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2017 Dec;6:541-52. doi: [10.1007/s13632-017-0395-0](https://doi.org/10.1007/s13632-017-0395-0)
- [20] Seikh Z, Sekh M, Mandal G, Sengupta B, Sinha A. Metal matrix composites processed through powder metallurgy: a brief overview. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2024 Feb 29:1-8. doi: [10.1007/s40033-024-00651-6](https://doi.org/10.1007/s40033-024-00651-6)
- [21] Parvizi S, Hashemi SM, Asgarinia F, Nematollahi M, Elahinia M. Effective parameters on the final properties of NiTi-based alloys manufactured by powder metallurgy methods: A review. *Progress in Materials Science*. 2021 Apr 1;117:100739. doi: [10.1016/j.pmatsci.2020.100739](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100739)