

## بررسی ریز ساختار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا تولید شده به روش اختلاط مستقیم

محمدامین باغچه سرا<sup>۱\*</sup>، حسین عبدی زاده<sup>۲</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۳</sup>

### چکیده

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا به دلیل دارا بودن خواص مطلوبی نظیر استحکام و مقاومت حرارتی در دمای بالا، در صنایع خاص مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، علاوه بر روش بررسی پارامترهای مهم و موثر دما و درصد حجمی فاز تقویت کننده، به کارگیری روش فویل آلومینیوم (در جهت بهبود مشکلات موجود در فرآیند تولید) و همچنین استفاده از ذرات منیزیا در مقیاس نانو را می‌توان به عنوان نوآوری‌های مقاله حاضر یاد کرد. کامپوزیت زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا با استفاده از روش گردابی (اختلاط مستقیم) تهیه گردید. نانو ذرات منیزیا به قطر ۶۰-۸۰ نانومتر با استفاده از این روش به آلیاژ AI-356 مذاب افزوده شده و پس از هم زدن به مدت ۱۳ دقیقه، مخلوط مذاب حاصله در قالب فلزی ریخته‌گری شد. تاثیر پارامترهای درصد حجمی نانو ذرات منیزیا شامل ۱/۵، ۲/۵ و ۵ درصد در دماهای مختلف ذوب ریزی شامل ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۵۰°C، بر ریزساختار کامپوزیت طی ۹ حالت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت و مناسب نانو ذرات منیزیا در تمامی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین با وجود آگلومره‌های منیزیا در ساختار، توزیع آن‌ها به صورت همگن می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت زمینه آلومینیوم، نانو منیزیا، روش گردابی، آلیاژ AI-356، ریزساختار.

<sup>۱</sup> - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مسجد سلیمان، گروه مهندسی مواد و متالورژی، مسجد سلیمان، ایران

<sup>۲</sup> - دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\* - نویسنده مسوول مقاله: amsara2000@gmail.com

## پیشگفتار

کامپوزیت‌های زمینه فلزی<sup>۱</sup> با زمینه آلیاژهای سبک از قبیل آلومینیوم و منیزیم و تقویت شده با ذرات سرامیکی از قبیل کاربید بور، کاربید سیلیسیوم، آلومینا و منیزیا را می‌توان به عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای وزن کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب انبساط حرارتی کم و مقاومت سایشی خوب می‌باشند. معمولا ترکیبی از این خواص به تنهایی در یک ماده ساده یافت نمی‌شود [۱-۳].

هدف از ساخت مواد کامپوزیتی زمینه فلزی با استفاده از ذرات سرامیکی، ترکیب خواص مطلوب فلزات و سرامیک‌ها بوده است. افزودن ذرات دیرگداز سخت با مدول کشسان بالا به زمینه فلزی منعطف، ماده‌ای را نتیجه می‌دهد که خواصی بینابین ذرات سرامیکی و آلیاژ زمینه داشته باشد. فلزات، ترکیب خوبی از خواصی چون استحکام و انعطاف‌پذیری دارند ولی در برخی مواقع صلابت کمی داشته در حالی که سرامیک‌ها سخت و ترد می‌باشند [۴ و ۵].

تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات فاز ثانویه، انجام شده است. کامپوزیت‌های با ذرات تقویت کننده از فازهای SiC [۶-۱۲]، TiB<sub>2</sub> [۱۳]، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [۱۴-۱۹]، و B<sub>4</sub>C [۲۰]، به روش‌های متالورژی پودر [۲۱ و ۲۲] و یا ریخته‌گری [۲۳] تهیه شده‌اند. اما با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، به نظر می‌رسد تاکنون گزارشی در زمینه تولید و بررسی پارامترهای مورد بحث در این مقاله (دما و درصد حجمی) برای کامپوزیت زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا، از منظر بهبود مشکلات پروسه تولید که یاد خواهند شد، منتشر نشده است.

در این میان ریخته‌گری گردابی، روش بسیار مناسبی است. زیرا هم ارزان قیمت بوده و هم برای تنوع گوناگونی از مواد و شرایط، قابلیت تولید را دارا می‌باشد. ولی استفاده از این روش جهت تولید کامپوزیت‌ها همواره با مشکلاتی همراه بوده است؛ از جمله می‌توان به اختلاف دانسیته بین زمینه آلومینیومی و ذرات تقویت کننده

سرامیکی (که موجب سرباره شدن یا ته نشینی ذرات سرامیکی خواهد شد)، عدم امکان کنترل کامل پارامترهای فرایند و امکان انجام فرایندهای مخرب در فصل مشترک زمینه و فاز دوم و نیز مشکلات ترشوندگی فاز دوم توسط زمینه اشاره نمود [۲۴].

در میان ذرات سرامیکی، منیزیا یا اکسید منیزیم هم مستثنا نبوده و عدم ترشوندگی آن با آلومینیوم باعث بروز مشکلاتی می‌گردد. منیزیا ماده‌ای با خواص دیرگدازی مطلوب است که دمای ذوب آن در حدود ۲۸۰۰ °C می‌باشد [۴ و ۲۶]. هم‌چنین دارای خواص مناسبی از قبیل پایداری در برابر شوک‌های حرارتی، نقطه ذوب بالا، هدایت حرارتی پایین، و پایداری ترمودینامیکی بالا می‌باشد. دانسیته منیزیا ۳/۵۸ g/cm<sup>3</sup>، مدول یانگ ۳۲۰ GPa و سختی آن ۹۱۰ ویکرز می‌باشد. منیزیا ماده‌ی معدنی سفید رنگ جامدی است که دارای شبکه‌ی کریستالی FCC با ثابت شبکه‌ی  $a=4/212\text{\AA}$  است [۲۵].

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا به دلیل دارا بودن خواص مطلوبی نظیر استحکام، چقرمگی و حفظ این خواص در دماهای بالا، در صنایع خاصی همچون هوا- فضا مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. با این وجود یکی از مشکلات ساخت این کامپوزیت‌ها، ترشوندگی نامناسب منیزیا در مذاب آلومینیوم می‌باشد که محدودیت‌هایی در ساخت این‌گونه کامپوزیت‌ها ایجاد می‌نماید [۲۶-۲۹].

در این پژوهش، به منظور تولید کامپوزیتی با خواص مناسب، از مقادیر بهینه فاکتورهای موثر همچون زمان همزدن، تعداد دور همزن، زاویه همزن و رعایت سایر شرایط با توجه به تجربیات قبلی مستخرج از مراجع، استفاده شده و تاثیر پارامترهای دما و درصد حجمی ذرات تقویت کننده نانو منیزیا بر ریزساختار و نحوه توزیع آنها در کامپوزیت تولیدی طی ۹ حالت متفاوت بررسی گردید. در این راستا نتایج حاصله از آزمایش پراش اشعه X و تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های کامپوزیت تولیدی مورد پژوهش قرار گرفته است.

لازم به توضیح است که استفاده از ذرات منیزیا، بدون اعمال پوشش و با به کارگیری روش نوین فویل آلومینیوم بوده است. از سوی دیگر، استفاده از ذرات

<sup>1</sup> - Metal Matrix Composites (MMCs)

سیستم ریخته‌گری از سه بخش اصلی کوره، همزن و قالب تشکیل شده است. برای ذوب کردن شمش‌های آلومینیم از کوره با مقاومتی با توان ۳۰ کیلو وات استفاده شد. درب کوره در قسمت فوقانی به گونه‌ای طراحی شد که با باز کردن آن امکان ورود همزن به داخل مذاب فراهم شود. در کنار کوره، یک سیستم همزن طراحی و نصب گردید تا عمل همزدن مخلوط مذاب را انجام دهد (شکل ۱). پروانه این همزن از جنس گرافیت بوده و به صورت پره‌های توربینی با زاویه ۴۵ درجه و قطر ۴cm ساخته شد. طول میله فولادی که محور گرافیتی پروانه همزن را به موتور الکتریکی همزن متصل می‌سازد، حدوداً ۸۰cm می‌باشد. قالب ریخته‌گری از جنس فولاد و به صورت مکعب مستطیل بوده که از پنج قطعه قابل اتصال به همراه یک قطعه نگهدارنده در کف تشکیل می‌شود. این قالب فولادی برای تهیه ۸ نمونه استوانه‌ای به ارتفاع ۱۵۰mm و قطر ۱۵mm در هر ذوب ریزی طراحی گردیده است (شکل ۲).

به منظور بررسی خواص نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در این پژوهش، آزمایش‌هایی انجام شد که در زیر به تجهیزات مربوط به هر یک اشاره می‌شود. برای بررسی فازی کامپوزیت‌ها، از دستگاه پراش اشعه X مدل Xpertpro ساخت شرکت Philips استفاده شد. جهت تهیه تصاویر و بررسی ریزساختاری پودرها و نیز کامپوزیت‌های ساخته شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل CamScan MV2300 ساخت شرکت Oxford انگلستان استفاده شد.

منیزیا با قطر نانو که می‌توانند به مراتب خواص بهتری را در مقابل ذرات با قطر میکرون در کامپوزیت ایجاد کنند، نشان‌دهنده نوآوری‌های مقاله و این پژوهش می‌باشند.

## مواد و روش‌ها

از آلیاژ Al-356 که به عنوان زمینه فلزی کامپوزیت-ها استفاده شد. شمش‌های این آلیاژ از شرکت تولیدی صنعتی کیان آلیاژ کاشان تهیه شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ را که توسط شرکت مذکور در اختیار قرار گرفت را نشان می‌دهد.

نانو ذرات منیزیا به عنوان ماده‌ی تقویت‌کننده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد این پودر در حدود ۸۰-۶۰ نانو متر بوده و به روش سنتز شیمیایی و با خلوص ۹۹٪ در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تولید شده است [۳۰]. به منظور تهیه مخلوط مذاب، از کریولیت به عنوان کمک ذوب استفاده شد. هدف اصلی از افزودن کریولیت به مذاب، بیرون کشیدن سرباره و ناخالصی‌های مذاب، کاهش کشش سطحی مذاب (که باعث غوطه‌وری ذرات منیزیا با وجود دانسیته بالای آنها می‌شود) و نهایتاً جلوگیری از اکسیداسیون سطحی مذاب آلومینیوم، می‌باشد. خلوص این پودر ۹۹٪ و اندازه ذرات آن حدود 1mm بود که پس از آسیاب کردن به مذاب اضافه گردید. فرمول شیمیایی این پودر  $Na_3AlF_6$  می‌باشد. کریولیت مورد استفاده در این پژوهش از شرکت ایرالکو تهیه گردید.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A-356

عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Ni
درصد وزنی	۹۱/۷۳	۷/۲۳	۰/۳۲	۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵



شکل ۲- تصویر قالب ساخته شده در این پژوهش

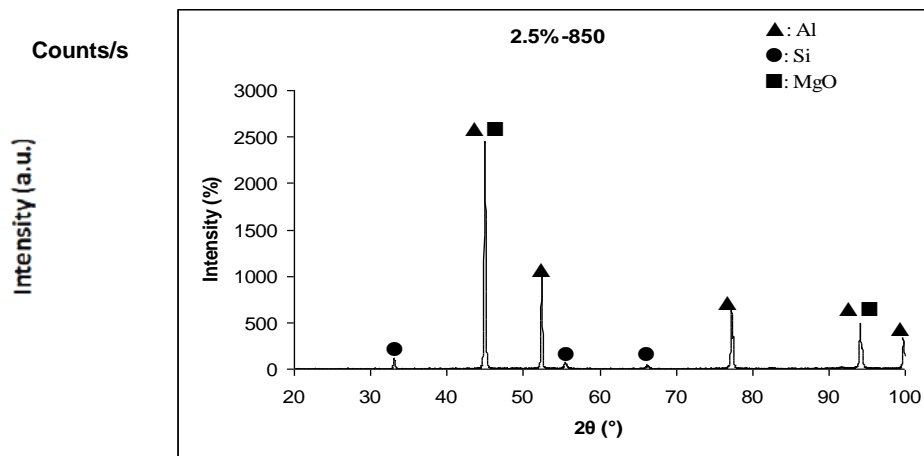
بررسی اثر دما بر توزیع ذرات و افزایش ترشوندگی منیزیا توسط آلومینیوم مذاب، بار ریزی در دو دمای ۸۵۰ و ۹۵۰°C نیز انجام شد. پس از همزدن، مذاب داخل بوتله به درون قالب ریخته شده و کامپوزیت تولید گردید. در مجموع، هرکدام از سه درصد حجمی (۱/۵، ۲/۵ و ۵/۵) منیزیا در سه دمای متفاوت ۸۰۰ و ۸۵۰ و ۹۵۰°C ذوب ریزی شده و از هر حالت ۸ نمونه تهیه گردید.

الگوی پراش اشعه X (XRD) به منظور تعیین فازهای موجود در کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده تهیه گردید. برای هر حالت ریخته‌گری، یک نمونه استوانه‌ای با ارتفاع تقریبی ۵mm از قسمت وسط میله تهیه و ناهمواری‌های سطح آنها توسط سنباده از بین برده شد و الگوی پراش اشعه X آن تهیه گردید. به منظور بررسی عناصر موجود، مورفولوژی فازها، ذرات و حفرات ایجاد شده در نمونه‌ها و نیز مشاهده فاز منیزیا در نمونه‌های کامپوزیتی، از میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. برای این منظور از هر شمش ریخته‌گری شده یک نمونه به صورت قرص با ارتفاع تقریبی ۱۰mm تهیه و پس از سنباده زنی با آلومینای ۱ میکرون پولیش شدند. سپس از محلول Keller به مدت ۴۵ ثانیه برای اچ کردن نمونه‌ها استفاده گردید [۳۱].

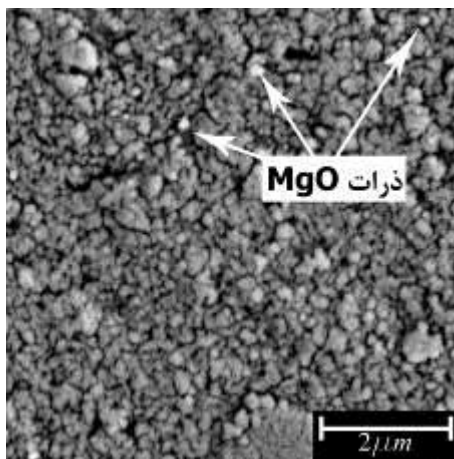


شکل ۱- سیستم ریخته‌گری ساخته شده در این پژوهش

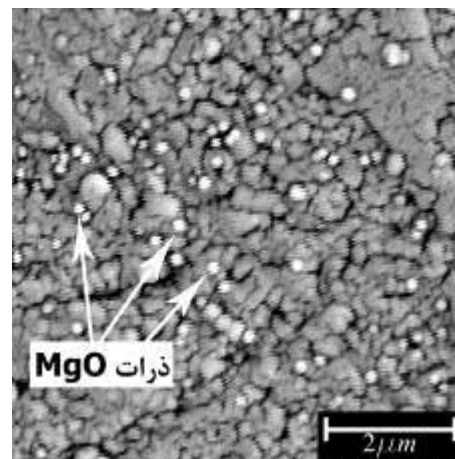
به منظور ساخت کامپوزیت‌ها، در ابتدا مقدار لازم پودر منیزیا با انجام محاسبات مربوطه نسبت به وزن شمش آلومینیوم مصرفی در هر مرحله و در مقادیر حجمی ۱/۵، ۲/۵ و ۵/۵ تعیین و توزین شد. در هر ذوب مقدار ۱۰ تا ۱۵ گرم کریولیت به عنوان کمک ذوب برای محافظت از سطح مذاب در مقابل اکسیداسیون اضافه شد. پس از ذوب کامل آلومینیوم، کریولیت اضافه شده توسط یک همزن گرافیتی دستی هم زده می شد. نانو پودر منیزیا درون فویل‌های بسیار نازک و کوچک آلومینیمی قرار داده شده و به آرامی به مذاب اضافه گردید. همزن گرافیتی نیز به گونه‌ای درون کوره و بوتله قرار گرفت که فاصله آن تا کف بوتله یک سوم ارتفاع کل بوتله باشد. با مطالعه گزارش‌های ساخت دیگر کامپوزیت‌های ذره‌ای به روش گردابی و بررسی مدت زمان و سرعت همزدن در آنها و همچنین با در نظر گرفتن فاکتورهای مهم و موثر همچون ریز بودن ذرات منیزیا، زمان همزدن ۱۳ دقیقه و سرعت همزن ۴۲۰ rpm در نظر گرفته شد. علت انتخاب دمای ۸۰۰°C، به دلیل دمای اختلاط مناسب نانو ذرات منیزیا در آلومینیوم مذاب (در حد ۱۵۰°C بالای نقطه ذوب فلز) و برخوردار بودن مخلوط کامپوزیتی از سیلان کافی در حین ریخته‌گری و پر کردن کامل قالب می‌باشد. همچنین برای



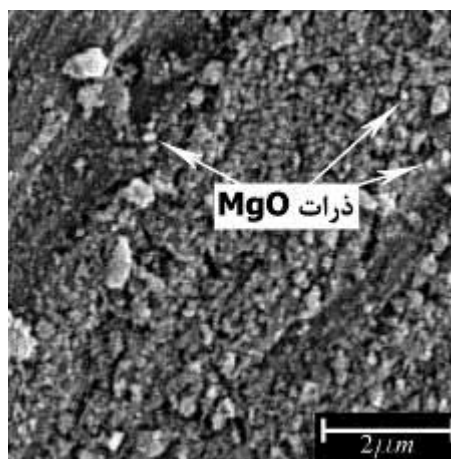
شکل ۳- نمودار پراش اشعه X نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی منیزیا ریخته گری شده در  $850^{\circ}\text{C}$



(ب)

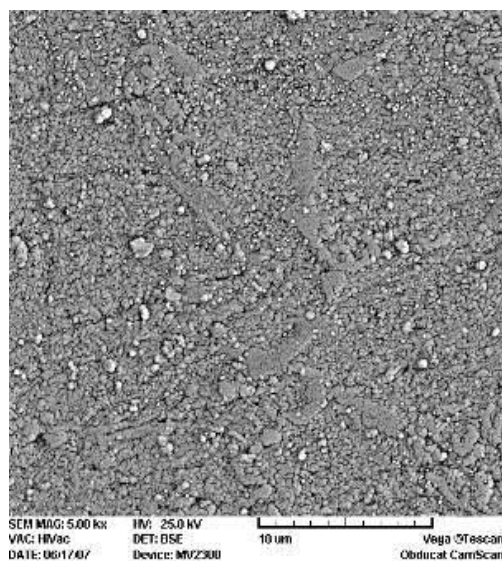


(الف)

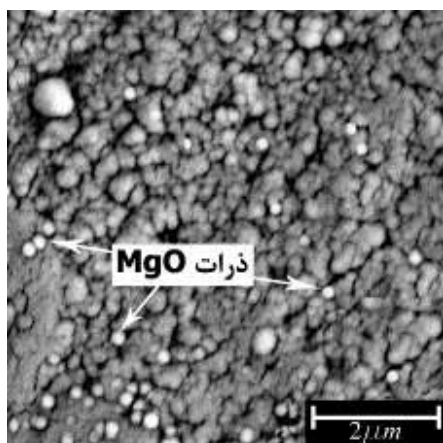


(ج)

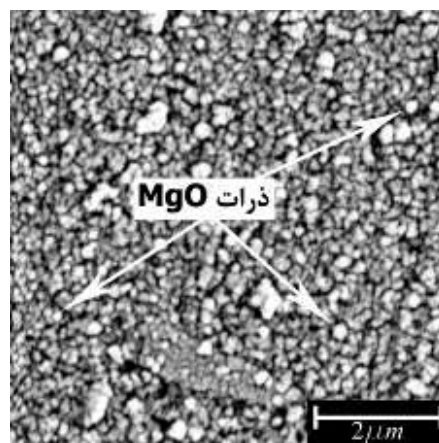
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی از نحوه توزیع ذرات منیزیا در زمینه آلیاژ آلومینیم A356 برای نمونه‌های ریخته گری شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و درصد های حجمی (الف) ۱/۵، (ب) ۲/۵ و (ج) ۵.



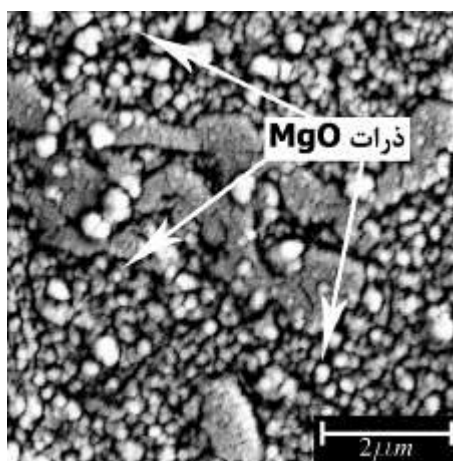
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ریخته گری شده در  $800^{\circ}\text{C}$  - ۱/۵٪ حجمی منیزیا.



(ب)

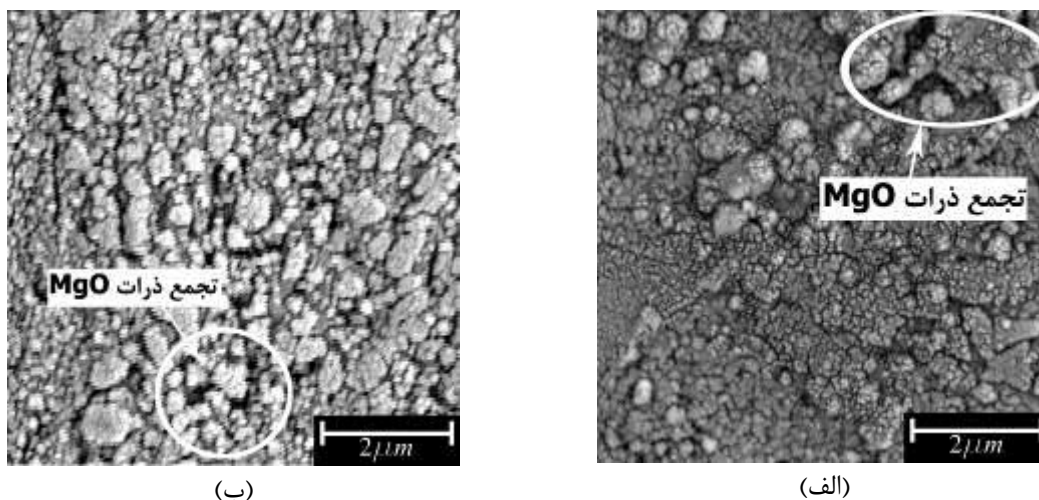


(الف)



(ج)

شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی از نحوه‌ی توزیع ذرات منیزیا در زمینه‌ی آلیاژ آلومینیوم A356 برای نمونه‌های ریخته گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  و درصد‌های حجمی (الف) ۱/۵، (ب) ۲/۵ و (ج) ۵.



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی از نحوه‌ی توزیع ذرات منیزیا در زمینه‌ی آلیاژ آلومینیم A356 برای نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  و درصدهای حجمی (الف) ۱/۵ و (ب) ۲/۵.

## نتایج و بحث

کار رفته است، در این ساختار اثری از حضور فازهای دیگر که امکان دارد در اثر واکنش‌های مخرب به وجود آید، نیست. به واسطه یکی بودن، از لحاظ پایه ای تمام نمودارهای پراش اشعه X مربوط به ۹ حالت، با ذکر این موضوع که در سایر نمونه‌ها هم دقیقاً همین پیک‌ها موجود است با این تفاوت که با تغییر درصد حجمی، شدت پیک‌ها هم اندکی کم و زیاد می‌شود، تنها به آوردن نمودار پراش اشعه X نمونه حد وسط (چه از لحاظ دمایی و چه از لحاظ درصد حجمی) بسنده شده است.

به طور کلی نحوه‌ی توزیع ذرات تقویت‌کننده در آلیاژ زمینه یکی از مشکلات موجود در تولید کامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری گردابی است. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از نمونه‌های کامپوزیت ریخته‌گری شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و درصدهای حجمی ۱/۵، ۲/۵ و ۵ می‌باشد، که نشان دهنده‌ی چگونگی پراکندگی ذرات تقویت‌کننده‌ی پودر منیزیا در زمینه‌ی آلیاژ آلومینیم A356 می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود ذرات منیزیا در زمینه به خوبی پخش گردیده‌اند و تجمع چندانی از این ذرات در کنار هم دیده نمی‌شود. این امر را می‌توان به عواملی نظیر سرعت و زمان هم‌زدن مناسب نسبت داد. در پژوهشی که آقای پرابو و همکارانش [۳۱] انجام دادند مشخص شد که افزایش زمان و سرعت هم‌زدن

به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده، از نمودارهای پراش اشعه X استفاده گردید که نشان دهنده شدت برحسب زاویه پراش می‌باشد. در اینجا سعی شد کلیه فازهای ترکیبی احتمالی بین آلومینیوم و منیزیا و هم‌چنین ترکیبات احتمالی آلومینیوم با عناصر موجود در آلیاژ مد نظر قرار گیرند. از بین نمودارهای پراش اشعه X، ۹ حالت نمونه کامپوزیت ریخته‌گری شده، حالت حد وسط یعنی استفاده از پودر منیزیا در  $850^{\circ}\text{C}$  و ۲/۵٪ حجمی، به همراه تحلیل نتایج و بررسی فازهای موجود آورده شده است. با بررسی نمودار پراش اشعه X که در شکل ۳ آورده شده است، ملاحظه می‌شود که به راحتی و بدون هیچ‌گونه پوشش و عملیات حرارتی ذرات سرامیکی، پیک‌های مربوطه آشکار شده و می‌توان از وجود فاز منیزیا در ساختار اطمینان کامل حاصل نمود. در بررسی صورت گرفته از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های تولیدی هم علاوه بر اثبات این موضوع، به بررسی توزیع مناسب ذرات فاز دوم با وجود اندازه فوق العاده کوچک این ذرات پرداخته خواهد شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به غیر از آلومینیم و سیلیسیم که عناصر اصلی تشکیل دهنده‌ی آلیاژ آلومینیم A356 هستند و منیزیا که به عنوان فاز تقویت‌کننده به

سیلیسیم) وجود خواهد داشت [۳۵-۳۳]. در حقیقت با وجود اینکه آلومینیوم و منیزیا هر دو دارای شبکه کریستالی FCC هستند و بحث عدم تطابق (Mismatch) شبکه کریستالی در فصل مشترک فلز-سرامیک تا حد زیادی منتفی است، اما فاکتورهای دیگری هم در بحث عدم جوانه زنی  $\alpha$ -Al بر روی ذرات منیزیا دخیل خواهند بود: ۱- ذراتی که در این کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند پلی کریستال هستند و این‌گونه نیست که صفحات کریستالی‌ای که سطح آنها را تشکیل می‌دهند طوری جهت‌گیری کنند که همیشه فصل مشترک کم انرژی تشکیل شود. ۲- عدم ترشوندگی ذرات سرامیکی منیزیا با مذاب آلومینیوم که پیش‌تر هم اشاره شد. ۳- بحث انتشار حرارتی (Thermal Diffusivity): مقدار محو شدن و از بین رفتن شیب حرارتی درون یک ماده را به ما نشان می‌دهد و باید توجه کرد که تقویت کننده‌های سرامیکی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی انتشار حرارتی کمتری نسبت به آلیاژ زمینه دارند. به علاوه گرمای نهان ذوب که در طول انجماد آزاد می‌شود باعث می‌شود که سرعت سرد شدن تقویت کننده کاهش یابد. در نتیجه ذرات نمی‌توانند زودتر از مذاب سرد شوند پس دمای ذرات بیش از دمای مذاب خواهد بود و این ذرات داغ باعث می‌شوند دمای محیط اطراف آنها افزایش یابد و انجماد مایع اطراف به تأخیر بیفتد. به این ترتیب مایعی که در تماس با تقویت کننده است در واقع آخرین مناطقی از مذاب است که منجمد می‌شود. در نهایت چون دیواره‌های قالب سردتر از مذاب و ذرات تقویت کننده است انجماد از دیواره قالب آغاز می‌شود [۳۵-۳۳].

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. به دلیل وجود مزایایی همچون افزایش سیالیت مخلوط مذاب کامپوزیتی که تا حدودی منجر به توزیع بهتر ذرات سرامیکی و تسهیل در انجام ذوب ریزی مخلوط مذاب می‌گردد و هم‌چنین تا حدی هم باعث بهبود ترشوندگی می‌شود، در این پژوهش از دماهای بالاتر ( $850^{\circ}\text{C}$  و  $915^{\circ}\text{C}$ ) هم برای تولید این کامپوزیت استفاده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ذرات منیزیا در این حالت نیز به صورت مطلوبی در آلیاژ زمینه پخش شده‌اند. در

مخلوط کامپوزیتی متشکل از آلیاژ آلومینیوم A358 و ذرات کاربید سیلیسیم منجر به توزیع بهتر ذرات در زمینه خواهد شد. در این پژوهش سرعت و زمان هم‌زدن مخلوط کامپوزیتی به ترتیب  $420\text{ rpm}$  و  $13$  دقیقه بود که باعث شد توزیعی همگن و قابل قبول از ذرات تقویت کننده‌ی منیزیا در زمینه آلیاژ آلومینیوم A356 بدست آید. از طرفی همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده باعث تجمع ذرات در کنار هم نشده و توزیع ذرات یکنواخت و قابل قبول است.

علاوه بر مطالب ذکر شده فوق، با استفاده از شکل ۵ که با بزرگنمایی کوچکتری تهیه شده است، مطالب تکمیلی از دید دیگری در ارتباط با نحوه توزیع ذرات فاز تقویت کننده و هم‌چنین عناصر آلیاژی در آلیاژ زمینه، قابل برداشت خواهند بود. در حین بررسی نمونه‌ها، آنچه در ابتدا به وضوح جلب نظر می‌نماید، ذرات منیزیا هستند که به طور پراکنده و به رنگ سفید (به دلیل عدد اتمی بالاتر، روشن تر هستند)، در زمینه خاکستری آلومینیوم دیده می‌شود. هدف از تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی در این نمونه‌ها، بررسی نحوه توزیع منیزیا در آلومینیوم بوده است. با نگاهی دقیق تر در برخی مناطق می‌توان به وجود آگلومره در نقاطی پی برد که این موضوع در فرآیند ریخته‌گری با اندازه ذرات بسیار ریز (در حد نانو)، اجتناب ناپذیر است. به طور کلی وقتی که فصل مشترک جامد-مایع حرکت می‌کند، ذره متحرک خارجی یا محبوس می‌گردد و یا اینکه پس زده می‌شود. در کامپوزیت‌هایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ذرات در آخرین مناطق انجمادی توسط زمینه، محبوس شده‌اند. به علت اینکه  $\alpha$ -Al بر روی ذرات فاز ثانویه جوانه زنی نکرده است، ذرات در آخرین مراحل انجماد محبوس شده‌اند. یعنی چون دیواره‌های قالب سردتر از مذاب و ذرات تقویت کننده در وسط قالب است، انجماد از دیواره قالب آغاز می‌شود و به سمت مرکز قالب پیشرفت می‌کند. در مورد عناصر آلیاژی همچون سیلیسیم در این آلیاژ، فرآیند پس زده شدن عناصر آلیاژی در حین انجماد هم دقیقاً از حالت فوق تبعیت می‌کند. به طوری که نهایتاً در مرز دانه‌ها، مناطق بین دندردیتی و یا پایانی انجماد، تجمع‌ی از ذرات منیزیا و یوتکتیک سیلیسیم-آلومینیوم (فاز غنی از



## نتیجه گیری

(۱) کامپوزیت زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا به طور موفقیت آمیزی توسط روش ریخته‌گری گردابی تولید گردید.

(۲) ذرات منیزیا بیش‌تر در مناطقی از کامپوزیت مشاهده شدند که آخرین محل‌های منجمد شده مذاب است. هم‌چنین ریز ساختار کامپوزیت‌های تولید شده نشان می‌دهد که  $\alpha$ -Al بر روی ذرات منیزیا جوانه زنی نکرده است.

(۳) با توجه به الگوی پراش XRD نمونه‌ها در محدوده دمایی انجام شده در این پژوهش (۸۰۰ تا  $950^{\circ}\text{C}$ )، حضور فاز تقویت کننده در ساختار اثبات می‌شود.

(۴) افزایش دمای مذاب در حین ریخته‌گری تا حدودی به عمل ترشوندگی کمک می‌کند ولی از طرفی دیگر، افزایش دمای مذاب (فوق گداز) باعث افزایش تلاطم مذاب، جدایش و تجمع بیش از حد نانو ذرات منیزیا خواهد شد که این پدیده‌ها تاثیر منفی بر خواص کامپوزیت می‌گذارند.

(۵) طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی، در روش ریخته‌گری گردابی توزیع ذرات پودر منیزیا در زمینه‌ی آلیاژ آلومینیوم A356 در دماهای ۸۰۰ و  $850^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد یکنواخت است و با وجود آگلومره‌های منیزیا در مناطقی از ساختار، توزیع این آگلومره‌ها یکنواخت می‌باشد. ولی در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  توزیع و پراکندگی این ذرات قابل قبول نیست.

(۶) با استفاده از روش نوین افزودن پودر سرامیکی به مذاب در داخل فویل آلومینیوم، حتی بدون پوشش-دهی ذرات منیزیا و نیز استفاده از ذرات در حد نانو، می‌توان به توزیع مناسب و قابل قبول ذرات سرامیک در زمینه فلزی دست یافت.

شکل ۶ نیز به مانند نمونه‌های سری قبلی، آگلومره‌هایی با توزیع مناسب و یکنواخت از ذرات منیزیا در زمینه دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که با وجود این اجتماعات باز هم می‌توان توزیعی از ذرات منیزیا با ابعاد کوچکتر را تشخیص داد. هم‌چنین افزایش دمای فوق گداز از ۸۰۰ به  $850^{\circ}\text{C}$  تأثیر چندانی در نحوه‌ی پراکندگی ذرات منیزیا در زمینه و تجمع آنها در کنار هم ندارد.

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع ذرات تقویت کننده‌ی منیزیا در زمینه به خوبی نمونه‌های ریخته‌گری شده در دماهای ۸۰۰ و  $850^{\circ}\text{C}$  نیست. همان‌گونه که از این تصاویر بر می‌آید ذرات به خوبی در زمینه آلیاژ آلومینیوم A356 پخش نشده‌اند. دلیل این امر را می‌توان به افزایش دمای فوق گداز و بیش‌تر شدن زمان انجماد آلیاژ زمینه نسبت داد. در این حالت رشد دندریته‌های آلیاژ زمینه باعث افزایش فاصله‌ی بازوهای دندریتی (DAS) می‌شود که محل مناسبی برای تجمع ذرات پودر منیزیا هستند. به علاوه دمای بالای ریخته‌گری و ابعاد نانومتری ذرات فاز تقویت کننده به تجمع آنها در این نواحی کمک خواهد کرد.

با توجه به ثابت بودن سرعت و زمان هم‌زدن در حین تهیه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری تولید شده، تأثیر درصد حجمی فاز تقویت کننده و دمای فوق گداز آلیاژ زمینه بر نحوه‌ی توزیع ذرات تقویت کننده‌ی منیزیا در زمینه آلیاژ آلومینیوم A356 مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان جمع‌بندی نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپ الکترونی می‌توان گفت که با افزایش دمای فوق گداز از ۸۰۰ به  $950^{\circ}\text{C}$  پراکندگی ذرات کاهش یافت که دلیل آن را می‌توان به افزایش فاصله‌ی بازوهای دندریتی در اثر بالا رفتن زمان انجماد آلیاژ زمینه و هم‌چنین تجمع آسان‌تر ذرات تقویت کننده با ابعاد نانومتری در دماهای بالاتر نسبت داد. از این رو فوق گدازهای ۸۰۰ و  $850^{\circ}\text{C}$  نسبت به  $950^{\circ}\text{C}$  علی‌رغم پایین‌تر بودن سیالیت مذاب ترجیح داده می‌شوند.

## Reference

1. G.E. Hatch, ASM International Metals Park.OH, 1980.
2. D.L. McDanel, Metall. Trans. A, Vol. 16, pp.1105-1116, 1985.

- stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior ", *Materials Characterization*, 62, 108, 2011.
13. L. Lu, M.O. Lai, X.P. Niu, et al., *Z METALLKD.*, 8, 567, 1998.
  14. Y. Sahin, M. Kok, H. Celik, " Tool wear and surface roughness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced aluminium alloy composites", *J. Mater Process Technol.*, 128, 280, 2002.
  15. J. Safari, M. Chermahini, G. Akbari, "The effect of Mg content on microstructure and mechanical properties of Al-xMg/5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite prepared by mechanical alloying", *J. Powder Technol.*, 234, 7, 2013.
  16. H. Qu, S. Zhu, Q. Li, " Influence of sintering temperature and holding time on the densification, phase transformation, microstructure and properties of hot pressing WC-40 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites", *J. Ceram. Int.*, 38, 1371, 2012.
  17. H. Su, W. Gao, Z. Feng, Z. Lu, " Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced aluminum matrix composites", *J. Mater. Design*, 36, 590, 2012.
  18. A. Kumar, S. Lal, S. Kumar, "Fabrication and characterization of A359/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composite using electromagnetic stir casting method ", *J. Mater Research Technol.*, 2, 250, 2013.
  19. ل. دریس؛ ش. شرفی، " بررسی تأثیر سرعت آسیاکاری بر تولید نانوکامپوزیت درجای Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrB<sub>2</sub> با استفاده از روش مکانوشیمیایی"، *مجله مواد نوین*، جلد ۴، شماره ۳، صفحه ۴۹-۳۹، بهار ۱۳۹۳.
  20. J. Lai, Z. Zhang, X.G. Chen, "Precipitation strengthening of Al-B<sub>4</sub>C metal matrix composites alloyed
  3. D. Hull, "An Introduction to Composite Material, 2<sup>nd</sup> ed.", *Mc Graw-Hill Book Co.*, pp.196-252, 1981.
  4. B.D. Evans and M. Stapelbroek, "Fusion/fission neutron damage ratio for alumina", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.85/86, p.497, 1979.
  5. Y.H. Seo, and C.G. Kang., "Effects of hot extrusion through a curved die on the mechanical properties of SiCp/Al composites fabricated by melt-stirring", *Journal Composites Science technology*, Vol.59, pp.643-654, 1999.
  6. T. Alpas, J. Zhang, "Wear rate transaction in cast Al -silicon alloys reinforced with SiC particle", *J. Scripta Metall Mater*, 26, 505, 1992.
  7. S. Lim, "High-speed tribological properties of some Al/SiC<sub>p</sub> composites: II. Wear mechanisms", *J. Comp Sci Technol.*, 59, 65, 1999.
  8. M. Reyes, M. Canul, J. Torres, "Development of aluminum hydroxides in Al-Mg-Si/SiC<sub>p</sub> in infiltrated composites exposed to moist air", *J. Ceram. Int.*, 37, 2719, 2011.
  9. Q. Zhang, X. Ma, G. Wu, " Interfacial microstructure of SiCp/Al composite produced by the pressureless infiltration technique", *J. Ceram. Int.*, 39, 4893, 2013.
  10. R. Ekici, M. K. Apalak, M. Yildirim, "Indentation behavior of functionally graded Al-SiC metal matrix composites with random particle dispersion", *Composites Part B: Engineering*, 42, 1497, 2011.
  11. H. Qing, "2D micromechanical analysis of SiC/Al metal matrix composites under tensile, shear and combined tensile/shear loads", *Materials & Design*, 51, 438, 2013.
  12. M. Barmouz, M. K. Besharati Givi, J. Seyfi, "On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction

- Materials Science, Vol.22, No.1, pp.1-16, 1987.
28. F. Aiguo, J. Benjamin, "Wettability of transition metal oxide surfaces", Materials Science and Engineering, Vol.A242, pp.50-56, 1998.
29. J. Hashim, L. Looney, "The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol.119, pp.324-328, 2001.
۳۰. م. ا. باغچه سرا؛ ح. عبدی زاده، ح.ر. بهاروندی، "بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت Al-Nano MgO تولید شده توسط روش گردابی"، مجله نانو مواد، جلد ۱۵، شماره ۵، صفحه ۱۷۷-۱۶۹-۱۳۹۲.
31. ASM Handbook Formerly Ninth Edition, Metallographic techniques and microstructures Al alloys, Vol. 9, page 354, 1998.
32. S.B. Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan, B. Mohan, "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, pp. 268-273, 2006.
33. Y.S. Toulouklian, R.W. Powell, C.Y. Ho, M.C. Nicolaou, Thermal Diffusivity: Thermophysical Properties of Materials, Vol. 10, IFI/Plenum Press, New York, 1973.
34. A. Mortensen, J.A. Cornie, M.C. Flemings, Metal. Trans. A 19, 709, 1988.
35. A. Daoud, M. Abo-Elkhar, Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or ZrO<sub>2</sub> particulate addition on the microstructure aspects of AlNi and AlSi alloys, Journal of Materials Processing Technology, pp.1- 6, 2001.
- with Sc and Zr", J. Alloy. Compd., 552, 227, 2013.
21. E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A.Kohser, DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 481, 2012.
۲۲. ع. عبدالهی؛ ع. علیزاده، "تولید نانوکامپوزیت دو جزئی فوق مستحکم زمینه آلومینیومی به روش آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن داغ و بررسی خواص مکانیکی آن"، مجله مواد نوین، جلد ۴، شماره ۱، صفحه ۹۸-۸۳، پاییز ۱۳۹۲.
23. R. Bauri, D. Yadav, G. Suhas, J. Mater. Sci. Eng. A, 528, 4732, 2011.
24. M.K Surappa, P.K. Rohatgi, "Preparation and properties of cast aluminium ceramic particle composites", Journal of Materials Science, vol.16A, pp.983-993, 1981.
25. Y. Chen, M. M. Abraham, M. T. Robinson, J. B. Mitchell and R. A. Van Konynenburg, MAGNESIUM OXIDE (MgO) - Advanced Energy Technology Program, Proc. Intern. Conf. on Radiation Effects and Tritium Tech Fusion Reactors, Gatlinburg, TN, p.492, 1975.
26. X. Cao, J. Campbell, "Effect of precipitation and sedimentation of primary  $\alpha$ -Fe phase on liquid metal quality of cast Al-11.1Si-0.4Mg alloy", International Journal of Cast Metals Research, Vol.17, pp.1-11, 2004.
27. Delannay, F. Froyen, "Wetting of solids by molten metals and its relationship to the preparation of metal matrix composites", Journal of

