

## بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت Al/Nano-MgO تولید شده توسط روش گردابی

محمد امین باغچه‌سرا<sup>۱\*</sup>، حسین عبدی‌زاده<sup>۲</sup> و حمیدرضا بهاروندی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان
- ۲- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
- ۳- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۰۴/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۰۸/۲۹

### چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی کامپوزیت Al/Nano-MgO که از روش گردابی تهیه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات MgO به قطر ۸۰-۶۰ نانومتر با استفاده از این روش به آلیاژ Al-356 مذاب افزوده گردید و پس از هم‌زدن، مخلوط مذاب حاصله در قالب فلزی ریخته‌گری شد. تاثیر پارامترهای درصد حجمی نانوذرات MgO شامل ۱/۵، ۲/۵ و ۵ درصد در دماهای مختلف ذوب‌ریزی شامل ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ °C بر خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده طی ۹ حالت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله، نشان دهنده افزایش خواص مکانیکی نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. همچنین بالاترین استحکام فشاری و سختی در نمونه‌هایی به ترتیب ۱/۵ و ۵ درصد حجمی MgO و دمای بارریزی ۸۵۰ °C بدست آمد که معادل ۸۹۶ مگاپاسکال و ۷۳ برینل می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت Al/Nano-MgO، روش گردابی، آلیاژ Al-356، استحکام فشاری، سختی.

### ۱- مقدمه

قطعه نهایی خواهد داشت [۵-۱]. تکنیک ریخته‌گری اختلاطی یا روش گردابی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی توسعه زیادی پیدا کرده است و این روش برای تولید بسیاری از اجزایی که کاربرد مهندسی دارند بکار می‌رود، زیرا این روش ساده و اقتصادی و انعطاف‌پذیری زیادی دارد [۲].

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 انعطاف‌پذیر، ماده‌ای را نتیجه می‌دهد که خواصی بینابین ذرات سرامیکی و آلیاژ فلزی زمینه دارد. فلزات معمولاً ترکیب مناسبی از خواصی چون استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت در دمای بالا را دارا

در کامپوزیت‌ها دو جزء زمینه و تقویت کننده وجود دارد. فاز زمینه می‌تواند از جنس پلیمر، فلز یا سرامیک باشد و فاز دوم به شکل‌های پیوسته و ناپیوسته تقسیم‌بندی می‌شود. فاز دوم پیوسته اصولاً به دو دسته لایه‌ای و الیافی یا میل‌های بوده و فاز دوم ناپیوسته به صورت‌های الیاف کوتاه، ویسکرها و ذرات می‌باشند.

کیفیت توزیع ذرات تقویت کننده اهمیت زیادی در خواص کامپوزیت‌ها دارد. اگر چه فرآیندهای تکمیلی ساخت، همچون اکستروژن، که بر روی کامپوزیت انجام می‌شود بر روی توزیع ذرات موثر است ولی یکنواختی ذرات در شمش ریختگی اولیه اثر مستقیم در یکنواختی ذرات

\* عهده‌دار مکاتبات: محمد امین باغچه‌سرا

حاصله از آزمایش نمونه‌های تولیدی مورد پژوهش قرار گرفته است. لازم به توضیح است که استفاده از ذرات منیزیا، بدون اعمال پوشش و با بکارگیری روش نوین فویل آلومینیوم بوده است. از سوی دیگر، استفاده از ذرات منیزیا با قطر نانو که می‌توانند به مراتب خواص بهتری را در مقابل ذرات با قطر میکرون در کامپوزیت ایجاد کنند، نشان دهنده نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌باشد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه اصلی مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

از آلیاژ Al-356 به عنوان زمینه فلزی کامپوزیت‌ها 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.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-356.

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

نانوذرات MgO به عنوان ماده تقویت کننده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد این پودر در حدود ۸۰-۶۰ نانومتر بوده و به روش سنتز شیمیایی تهیه شده است. 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 ۱ mm بود که پس از آسیاب کردن به مذاب اضافه گردید. فرمول شیمیایی این پودر  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  می‌باشد. کریولیت مورد استفاده در این تحقیق از شرکت ایرالکو تهیه گردید.

سیستم ریخته‌گری از سه بخش اصلی کوره، همزن و قالب تشکیل شده است. برای ذوب کردن شمش‌های آلومینیوم

هستند ولی در برخی موارد نیز استحکام کمی دارند، در حالی که سرامیک‌ها سخت و ترد می‌باشند [۶،۷]. تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات فاز ثانویه، انجام شده است. کامپوزیت‌های با ذرات تقویت کننده از فازهای SiC [۸-۱۴]،  $\text{TiB}_2$  [۱۵]،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [۱۶-۲۰] و  $\text{B}_4\text{C}$  [۲۱،۲۲]، به روش‌های متالورژی پودر [۲۳] و یا ریخته‌گری [۲۴] تهیه شده‌اند. از مشکلات موجود در حین فرآیند ریخته‌گری، می‌توان اختلاف دانسیته بین زمینه آلومینیومی و ذرات تقویت کننده سرامیکی (که موجب سرباره شدن یا ته‌نشینی ذرات سرامیکی خواهد شد) و همچنین ترشوندگی پایین ذرات سرامیکی توسط Al مذاب را نام برد. منیزیا ماده‌ای با خواص دیرگدازی مطلوب است که دمای ذوب آن در حدود  $2800^\circ\text{C}$  می‌باشد [۲۵].

همچنین دارای خواص مناسبی از قبیل پایداری در برابر شوک‌های حرارتی، نقطه ذوب بالا، هدایت حرارتی پایین و پایداری ترمودینامیکی بالا می‌باشد. دانسیته منیزیا  $3/58 \text{ g/cm}^3$ ، مدول یانگ ۳۲۰ GPa و سختی آن ۹۱۰ ویکرز می‌باشد [۲۶]. منیزیا ماده معدنی سفید رنگ جامدی است که دارای شبکه کریستالی FCC با ثابت شبکه  $a=4/212 \text{ \AA}$  است [۲۶].

کامپوزیت‌های Al/Nano-MgO بدلیل دارا بودن خواص مطلوبی نظیر استحکام، چقرمگی و حفظ این خواص در دماهای بالا، در صنایع خاصی همچون هوافضا مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. با این وجود همانطور که گفته شد، یکی از مشکلات ساخت این کامپوزیت‌ها، ترشوندگی نامناسب منیزیا در مذاب آلومینیوم می‌باشد که محدودیت‌هایی در ساخت اینگونه کامپوزیت‌ها ایجاد می‌نماید [۲۷-۳۰].

در تحقیق حاضر، 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 Nano-MgO بر خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی بررسی گردید. در این راستا استحکام فشاری، سختی و همچنین دانسیته کامپوزیت‌ها با توجه به نتایج



شکل ۲: تصویر قالب ساخته شده در این پژوهش.

به منظور ساخت کامپوزیت‌ها، در ابتدا مقدار لازم پودر منیزیا با انجام محاسبات مربوطه نسبت به وزن شمش آلومینیم مصرفی در هر مرحله و در مقادیر حجمی ۱/۵، ۲/۵ و 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 Al، کریولیت اضافه شده توسط یک همزن گرافیتی دستی همزده شد. پودر Nano-MgO 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، بدلیل دمای اختلاط مناسب نانوذرات 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 بررسی اثر دما بر بهبود خواص، 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

از کوره با این سیستم 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 ساخته شد. 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 ۱۵۰ mm و قطر ۱۵ mm در هر ذوب‌ریزی طراحی گردیده است (شکل ۲). به منظور بررسی خواص نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق، آزمایش‌هایی انجام شد که در زیر به تجهیزات مربوط به هر یک اشاره می‌شود.

برای تعیین استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM E9، از دستگاه تست ساخت شرکت Instron انگلستان مدل ۱۱۹۵ استفاده شد [۳۱]. برای تعیین سختی برینل نمونه‌های کامپوزیتی از دستگاه سختی‌سنجی ساخت شرکت Eseyaw انگلستان مدل DVRB-M با بار ۳۱/۲۵ kgf و قطر ساچمه ۲/۵ mm استفاده شد. در نهایت سیستم دانسیته‌سنجی متشکل از یک ترازوی Sartorius جهت تعیین دانسیته نمونه‌های ۹ حالت تهیه شده، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱: سیستم ریخته‌گری ساخته شده در این پژوهش.

فاز تقویت کننده بکار رفته است، در این ساختار اثری از حضور فازهای دیگر که امکان دارد در اثر واکنش‌های مخرب بوجود آید، نیست. بواسطه یکی بودن، از لحاظ پایه‌ای 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.

### ۳-۲- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی

#### ۳-۲-۱- نمونه‌های ریخته‌گری شده در $850^{\circ}\text{C}$

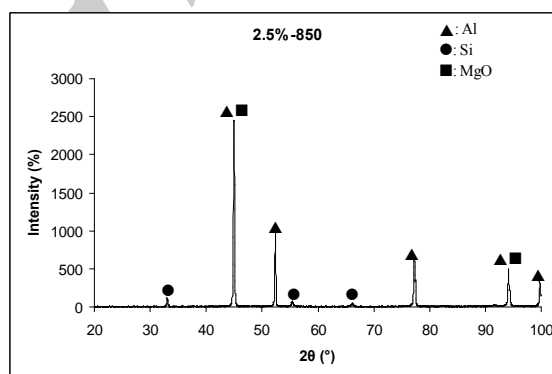
بطور کلی نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در آلیاژ زمینه یکی از مشکلات موجود در تولید کامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری گردابی است. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از نمونه‌های کامپوزیت ریخته‌گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  (به عنوان دمای بهینه) و درصدهای حجمی ۱/۵، ۲/۵ و ۵ می‌باشد، که نشان دهنده چگونگی پراکندگی ذرات تقویت کننده پودر منیزیا در زمینه آلیاژ آلومینیم A356 می‌باشد. همانطور 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. بطور کلی، افزایش زمان و سرعت همزدن مخلوط کامپوزیتی متشکل از آلیاژ آلومینیم و ذرات، منجر به توزیع بهتر ذرات در زمینه خواهد شد. از سویی دیگر، استفاده از این دما برای تولید این کامپوزیت مزایایی همچون بهبود ترشوندگی، افزایش سیالیت مخلوط مذاب کامپوزیتی که تا حدودی منجر به توزیع بهتر ذرات سرامیکی و تسهیل در انجام ذوب‌ریزی مخلوط مذاب می‌گردد، را دارا است. در این پژوهش سرعت و زمان همزدن مخلوط کامپوزیتی به ترتیب ۴۲۰ و ۱۳ دقیقه بود که باعث شد توزیعی همگن و قابل قبول از ذرات تقویت کننده منیزیا در زمینه آلیاژ آلومینیم A356 بدست آید. از طرفی همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده باعث

مجموع، هرکدام از سه درصد حجمی (۱/۵، ۲/۵ و ۵) منیزیا در سه دمای متفاوت ۸۰۰، ۸۵۰ و  $950^{\circ}\text{C}$  ذوب‌ریزی شده و از هر حالت ۸ نمونه تهیه گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس

به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده، از نمودارهای پراش اشعه X استفاده گردید که نشان دهنده شدت بر حسب زاویه پراش می‌باشد. 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.

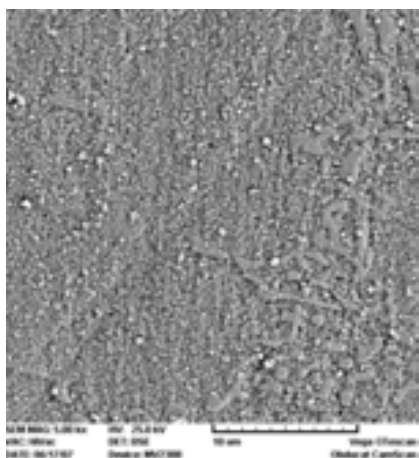


شکل ۳: نمودار پراش اشعه X نمونه حاوی ۲/۵٪ حجمی منیزیا ریخته‌گری شده در  $850^{\circ}\text{C}$

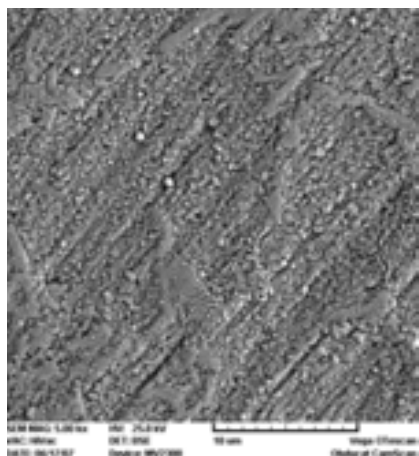
با بررسی نمودار پراش اشعه X که در شکل ۳ آورده شده است، ملاحظه می‌شود که به راحتی و بدون هیچگونه پوشش و عملیات حرارتی ذرات سرامیکی، پیک‌های مربوطه آشکار شده و می‌توان از وجود فاز منیزیا در ساختار اطمینان کامل حاصل نمود. در بررسی صورت گرفته از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های تولیدی علاوه بر اثبات این موضوع، به بررسی توزیع مناسب ذرات فاز دوم با وجود اندازه فوق‌العاده کوچک این ذرات پرداخته خواهد شد. همانطور که مشاهده می‌شود به غیر از آلومینیم و سیلیسیم که عناصر اصلی تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیم A356 هستند و منیزیا که به عنوان

علاوه بر مطالب ذکر شده فوق، با استفاده از شکل ۵ که با بزرگنمایی کوچکتری تهیه شده است.

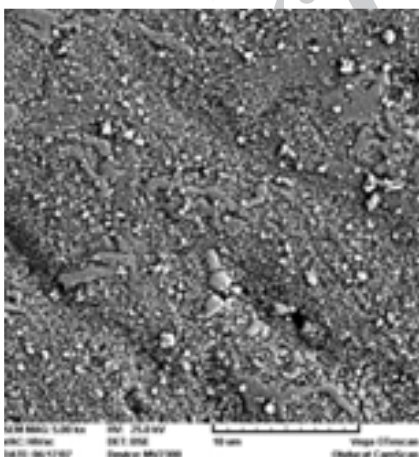
تجمع ذرات در کنار هم نشده و توزیع ذرات یکنواخت و قابل قبول است.



(الف)

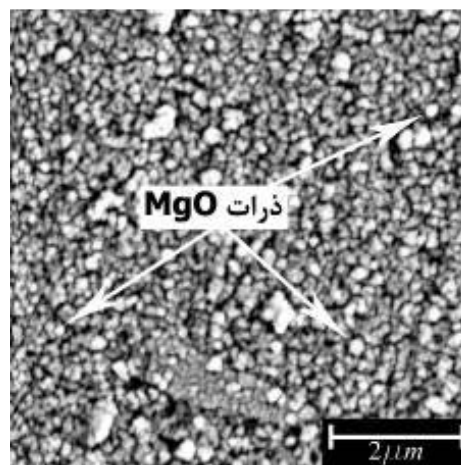


(ب)

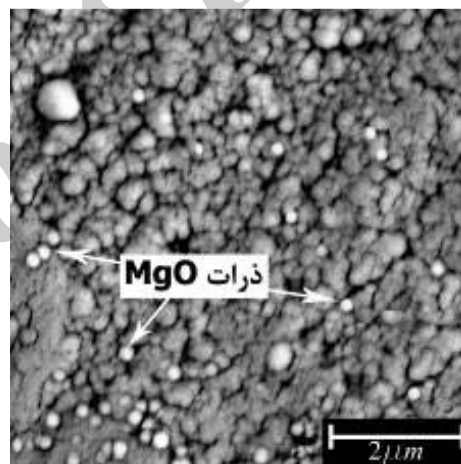


(ج)

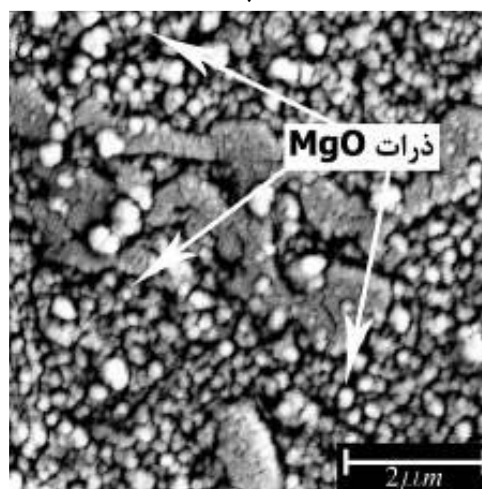
شکل ۵: تصویر SEM از نحوه توزیع ذرات منبزیا در زمینه آلیاژ آلومینیم Al356 برای نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای ۸۵۰ °C و درصدهای حجمی، الف) ۱/۵، ب) ۲/۵ و ج) ۵ با بزرگنمایی متفاوت.



(الف)



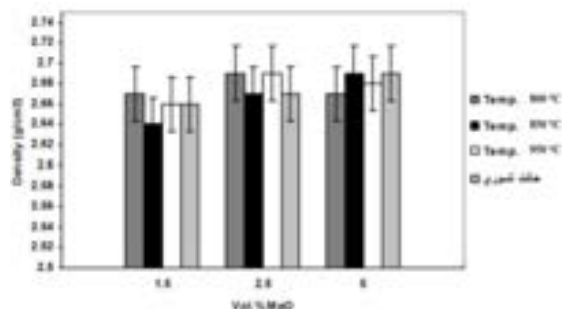
(ب)



(ج)

شکل ۴: تصویر SEM از نحوه توزیع ذرات منبزیا در زمینه آلیاژ آلومینیم Al356 برای نمونه‌های ریخته‌گری شده در دمای ۸۵۰ °C و درصدهای حجمی، الف) ۱/۵، ب) ۲/۵ و ج) ۵.

نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری دانسیته تجربی نمونه‌ها تطابق خوبی با محاسبات تئوری دارد.



شکل ۶: نمودار مقایسه‌ای تغییرات دانسیته تئوری و تجربی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در دماهای ۸۵۰، ۹۵۰ و ۹۵۰ °C حاوی ۱/۵ تا ۵٪ حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا.

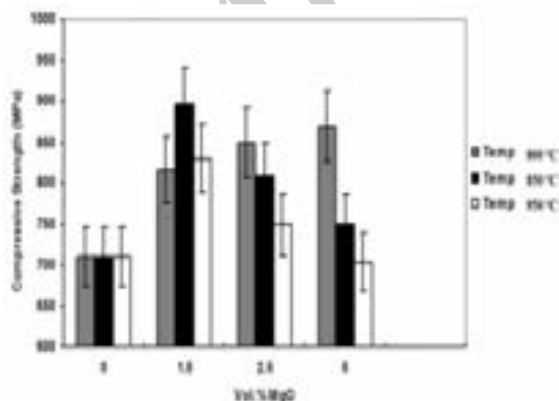
همچنین همانگونه که دیده می‌شود افزایش دمای ریخته‌گری تغییری چندانی در مقدار چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ایجاد نکرده است. این مطلب با توجه به قانون مخلوطها نیز قابل پیش‌بینی است، چرا که در این رابطه اثری از دما دیده نمی‌شود. طبق نتایج حاصله، در حالت کلی، دمای ۸۵۰ °C یک دمای بهینه می‌باشد، زیرا که در این حالت با افزایش درصد حجمی، میزان دانسیته هم افزایش می‌یابد و این نتیجه به معنای انطباق حالت عملی با حالت تئوری (قانون مخلوطها) می‌باشد. در قانون مخلوطها با افزایش درصد حجمی فاز دوم، دانسیته کلی افزایش می‌یابد. شکل ۷ نتایج دانسیته‌سنجی را در درصدهای حجمی مختلف و با دماهای متفاوت، مقایسه می‌کند. با توجه به این شکل در کلیه دماها از ۱/۵ به ۲/۵ درصد حجمی منیزیا، افزایش نسبی نتایج دانسیته دیده می‌شود که این موضوع حضور ذرات منیزیا و افزایش دانسیته با افزایش درصد حجمی این فاز را تایید می‌کند. در نمونه‌های حاوی ۵ درصد حجمی از ماده تقویت کننده منیزیا نسبت به درصدهای حجمی کمتر، افزایش چشمگیر درصد حجمی فاز تقویت کننده مشاهده شد. سیر نزولی دانسیته در این حالت به معنای افزایش تخلخل در اثر افزایش درصد حجمی می‌باشد. لازم به ذکر است که در ماکزیمم درصد حجمی یعنی ۵ درصد، بدلیل افزایش گرانشی یا ویسکوزیته مذاب، افزایش حجم گازهای محبوس شده و سخت شدن شرایط جهت فرار گازها از

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 بطور پراکنده و به رنگ سفید (بدلیل عدد اتمی بالاتر، روشن‌تر هستند)، در زمینه خاکستری آلومینیم دیده می‌شود. هدف از تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در این نمونه‌ها، بررسی نحوه توزیع منیزیا در آلومینیم بوده است. با نگاهی دقیق‌تر در برخی مناطق می‌توان بوجود آگلومره در نقاطی پی برد که این موضوع در فرآیند ریخته‌گری با اندازه ذرات بسیار ریز (در حد نانو)، اجتناب‌ناپذیر است. بطور کلی وقتی که فصل مشترک جامد-مایع حرکت می‌کند، ذره متحرک خارجی یا محبوس می‌گردد و یا پس زده می‌شود. در کامپوزیت‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ذرات در آخرین منطقه انجمادی توسط زمینه محبوس شده‌اند. به علت اینکه  $\alpha$ -Al بر روی ذرات فاز ثانویه جوانه‌زنی نکرده است، ذرات در آخرین مراحل انجماد محبوس شده‌اند. 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. بطوریکه نهایتاً در مرز دانه‌ها، مناطق بین دندریتی و یا پایانی انجماد، تجمعی از ذرات منیزیا و یوتکتیک سیلیسیم-آلومینیم (فاز غنی از سیلیسیم) وجود خواهد داشت.

### ۳-۳- بررسی نتایج آزمایش دانسیته‌سنجی

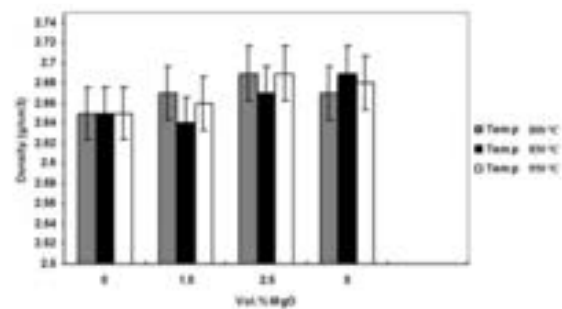
شکل ۶، مقادیر دانسیته تئوری محاسبه شده برای نمونه‌ها به همراه دانسیته‌های تجربی بدست آمده توسط روش ارشمیدس برای هر کدام از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در حقیقت در این نمودار دانسیته تجربی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در هر دما در کنار دانسیته تئوری محاسبه شده با استفاده از قانون مخلوطها رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات چندانی بین دانسیته تجربی و تئوری نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود و

نتیجه آن افزایش استحکام فشاری نمونه‌های تولید شده است. در حقیقت دلیل اصلی افزایش استحکام از نمونه‌های صفر به ۵٪ را می‌توان به افزایش دانسیته نابیجایی‌ها نسبت داد. ذرات سرامیکی فاز دوم به عنوان موانعی بر سر راه نابیجایی‌ها محسوب می‌شوند. در اثر اعمال تنش، نابیجایی‌ها به حرکت در آمده و توقف آنها در پشت نانوذرات سرامیکی منیزیا در تنش‌هایی کمتر از تنش‌های لازم جهت تامین انرژی مربوطه برای عبور نابیجایی‌ها از موانع، باعث تجمع و افزایش دانسیته نابیجایی‌ها که به افزایش استحکام کامپوزیت می‌انجامد، شده است. طبیعتاً، پدیده تجمع و افزایش دانسیته نابیجایی‌ها با افزایش درصد حجمی فاز دوم و به دنبال آن، کاهش فاصله ذرات از هم تشدید می‌گردد، زیرا موانع موجود در مسیر حرکت نابیجایی‌ها بیشتر شده و در نتیجه، تنش لازم برای عبور نابیجایی‌ها از ذرات منیزیا افزوده می‌شود. بطور کلی زمانی که نمونه‌ها تحت کار مکانیکی قرار می‌گیرند، افزایش کار سختی در اثر ممانعت نانوذرات منیزیا از تغییر شکل پلاستیک زمینه و همچنین تجمع نابیجایی‌ها پشت نانوذرات منیزیا و به دنبال آن تمرکز تنش در ذرات فاز دوم، به عنوان عاملی موثر در استحکام بخشی این کامپوزیت می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی (Coefficient of Thermal Expansion) فلزات خیلی بیشتر از سرامیک‌هاست و این به معنای اختلاف زیاد انقباضی و انبساطی بین فلز و سرامیک است [۳۴-۳۲]. در هنگام سرد شدن و انقباض، تنش‌های فشاری ایجاد می‌شود.



شکل ۸: نمودار تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۵۰°C حاوی صفر تا ۵٪ حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا.

داخل مذاب بوجود می‌آید که در نهایت به افزایش تخلخل و کاهش دانسیته کمک خواهد کرد. از طرفی دیگر افزایش بیش از حد دما به دمای ۹۵۰°C و به دنبال آن، افزایش سیالیت مذاب و تلاطم آن باعث افزایش تخلخل و کاهش دانسیته می‌شود. در دمای ۸۵۰°C این روند بطور کامل صعودی بوده که بدلیل غلبه اثر مثبت افزایش درصد حجمی و حضور ذرات منیزیا بر اثر منفی افزایش دما می‌باشد که در نهایت باعث افزایش دانسیته می‌شود.



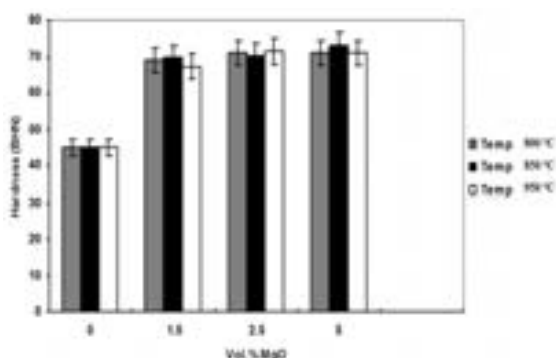
شکل ۷: نمودار تغییرات چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۵۰°C حاوی صفر تا ۵٪ حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا.

همانطوری که اشاره شد، دو عامل دما و درصد حجمی، بطور جداگانه یا توأم با افزایش خود، می‌توانند باعث بروز عیوبی شوند که این عیوب خود را در قالب کاهش دانسیته در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰°C نشان داد ولی در دمای ۸۵۰°C به عنوان حد وسط و ایتیمم دما و با توجه به توضیحات داده شده، روند صعودی و افزایش دانسیته حاصل شد.

### ۳-۴- بررسی نتایج آزمایش فشار

شکل ۸ نیز نمودار تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های تولید شده را نسبت به آلیاژ زمینه تقویت نشده نشان می‌دهد. همانطوری‌که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، در دمای ۸۰۰°C با افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده از ۱/۵ به ۲/۵ و ۵ درصد، استحکام فشاری نیز روندی رو به رشد از خود نشان می‌دهد که این امری طبیعی و قابل انتظار است. با توجه به مطلب ذکر شده، می‌توان چنین بیان نمود که در این دمای ریخته‌گری آلیاژ زمینه و ذرات فاز تقویت کننده به خوبی باهم مخلوط شده‌اند و

صعودی عدد سختی ادامه پیدا می‌کند. این روند افزایشی در سختی با بالا رفتن درصد حجمی فاز تقویت کننده مطابق با قانون مخلوط‌ها است. اما در ارتباط با روند کاهش در سختی کامپوزیت‌ها با ۵٪ حجمی ذرات منیزیا، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن بیشتر منیزیا باعث افزایش تخلخل گردیده است. در حقیقت همانطور که در قسمت‌های قبلی هم در مورد عوامل افزایشنده و کاهشنده خواص مکانیکی بحث شد، در اینجا هم علیرغم افزایش درصد حجمی ذرات منیزیا که عامل اصلی ایجاد سختی می‌باشد، افزایش عامل کاهشنده سختی یعنی تخلخل نیز بروز می‌کند، بویژه که این امر با افزایش دما هم شدت بیشتری در جهت کاهش سختی خواهد داشت. با توجه به نمودار حاصل مشاهده می‌شود که بیشترین سختی برای نمونه ریخته‌گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  حاوی ۵ درصد حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا است و مقدار آن حدود ۳۰ واحد بیشتر از سختی نمونه آلیاژ زمینه تقویت نشده است.



شکل ۹: نمودار تغییرات مقایسه‌ای سختی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌گری شده در دماهای ۸۵۰، ۹۵۰ و ۸۵۰ °C حاوی صفر تا ۵٪ حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- کامپوزیت آلومینیوم/نانومنیزیا، بطور موفقیت‌آمیزی توسط روش ریخته‌گری گردابی و تکنیک نوین افزودن پودر سرامیکی به مذاب در داخل فویل آلومینیوم، حتی بدون پوشش‌دهی ذرات منیزیا و نیز استفاده از ذرات در حد نانو، تولید گردید.  
- با توجه به نتایج آزمایش چگالی‌سنجی، دانسیته نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده توسط این روش

اگر اختلاف CTE کم باشد، دانسیته نایجابی‌ها کم می‌شود که باعث عدم ایجاد مکانیزم استحکام بخشی می‌گردد. اگر اختلاف CTE خیلی زیاد باشد، امکان بروز ترک وجود دارد. ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم  $21.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  و منیزیا  $14.45 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  می‌باشد [۳۵]. همین اختلاف هم از عوامل موثر دیگری در افزایش دانسیته نایجابی‌ها می‌باشد که استحکام‌دهی در نمونه‌های کامپوزیتی را در پی داشته است [۳۲-۳۴].

همچنین در دو دمای ریخته‌گری ۸۵۰ و  $950^{\circ}\text{C}$ ، با افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده، استحکام فشاری کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از جذب گاز بیشتر در این دماها باشد. حفره‌های گازی یکی از عیوب متداول در فرآیندهای ریخته‌گری هستند که محل مناسبی برای رشد ترک‌ها می‌باشند. بنابراین حضور و عدم توزیع یکنواخت این حفره‌ها منجر به کاهش استحکام فشاری نمونه‌ها می‌شود. بیشترین استحکام فشاری در بین نمونه‌های تهیه شده برای نمونه ریخته‌گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱/۵ درصد حجمی از ذرات تقویت کننده منیزیا، بدست آمد و مقدار آن حدود ۱۸۵ مگاپاسکال بالاتر از استحکام فشاری آلیاژ زمینه تقویت نشده است.

#### ۳-۵- بررسی نتایج آزمایش سختی

شکل ۹ نیز نمودار سختی نمونه‌های ریخته‌گری شده در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و  $950^{\circ}\text{C}$  و درصد‌های حجمی مختلف از منیزیا را نشان می‌دهند. از آنجا که منیزیا سختی بسیار بالاتری در مقایسه با آلومینیوم دارد، این افزایش سختی را می‌توان به حضور ذرات منیزیا نسبت داد. از اینرو، نمودار مربوطه حاکی از وابستگی سختی نمونه‌ها به درصد حجمی فاز تقویت کننده و شرایط ریخته‌گری نمونه‌ها است. همانطور که دیده می‌شود در دمای ریخته‌گری  $800^{\circ}\text{C}$  با افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده از ۱/۵ به ۲/۵، سختی افزایش می‌یابد اما با بیشتر شدن مقدار فاز تقویت کننده به ۵ درصد حجمی، عدد سختی اندکی کاهش داشته است.

این روند برای نمونه‌های ریخته‌گری شده در دماهای  $950^{\circ}\text{C}$  نیز مشاهده می‌شود، اما در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  با افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده از ۲/۵ به ۵، روند



## مراجع

- [1] S. Ray, *Journal of Materials Science*, **28**, 1993, 5397.
- [2] P.K. Rohatgi, *J. Key Eng. Mater*, **293**, 1993, 104.
- [3] P.A. Karnezis, G. Durrant, B. Canter, *J. Mater. Sci. Technol.*, **14**, 1998, 97.
- [4] E.H. Kim, G.H. Cho, J.H. Lee, Y.G. Jung, Y.S. Yoo, S.M. Seo, *J. Ceram. Inter.*, **39**, 2013, 6503.
- [5] A.K. Chaubey, S. Scudino, N.K. Mukhopadhyay, M. Samadi Khoshkhou, B.K. Mishra, J. Eckert, *J. Alloys Comp.*, **536**, 2012, S134.
- [6] W.F. Smith, "Principles of Materials & Engineering", Mc Graw-Hill, New York, 1996.
- [7] T. Tang, M.F. Horstemeyer, P. Wang, *Inter. J. of Eng. Sci.*, **51**, 2012, 161.
- [8] J. Zhang, *J. Scripta Metall. Mater.*, **26**, 1992, 505.
- [9] S. Lim, *J. Comp. Sci. Technol.*, **59**, 1999, 65.
- [10] M. Reyes, M. Canul, J. Torres, *J. Ceram. Int.*, **37**, 2011, 2719.
- [11] Q. Zhang, X. Ma, G. Wu, *J. Ceram. Int.*, **39**, 2013, 4893.
- [12] R. Ekici, M.K. Apalak, M. Yildirim, *Composites Part B: Engineering*, **42**, 2011, 1497.
- [13] H. Qing, *Materials and Design*, **51**, 2013, 438.
- [14] M. Barmouz, M.K. Besharati Givi, J. Seyfi, *Materials Characterization*, **62**, 2011, 108.
- [15] L. Lu, M.O. Lai, X.P. Niu, *Z. Metallkd.*, **8**, 1998, 567.
- [16] Y. Sahin, M. Kok, H. Celik, *J. Mater Process Technol.*, **128**, 2002, 280.
- [17] J. Safari, M. Chermahini, G. Akbari, *J. Powder Technol.*, **234**, 2013, 7.
- [18] H. Qu, S. Zhu, Q. Li, *J. Ceram. Int.*, **38**, 2012, 1371.
- [19] H. Su, W. Gao, Z. Feng, Z. Lu, *J. Mater. Design*, **36**, 2012, 590.
- [20] A. Kumar, S. Lal, S. Kumar, *J. Mater. Research Technol.*, **2**, 2013, 250.
- [21] H. Zhang, K.T. Ramesha, *J. Mater. Sci. Eng.*, **12**, 2004, 21.
- [22] J. Lai, Z. Zhang, X.G. Chen, *J. Alloy. Compd.*, **552**, 2013, 227.
- [23] E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser, "Materials and Processes in Manufacturing", Wiley, United States of America, 2012, 481.
- [24] R. Bauri, D. Yadav, G. Suhas, *J. Mater. Sci. Eng. A*, **528**, 2011, 4732.
- [25] B.D. Evans, M. Stapelbroek, *J. Nucl. Mater.*, **86**, 1979, 497.
- [26] Y. Chen, M.M. Abraham, M.T. Robinson, J.B. Mitchell, *Proc. Intern. Conf. on Radiation Effects and Tritium Tech Fusion Reactors*, Gatlinburg, TN, 1975, 492.
- [27] X. Cao, J. Campbell, *Int. J. Cast Metals Res.*, **13**, 2000, 175.
- [28] G. Delannay, F. Froyen, *J. Mater. Sci.*, **22**, 1987, 1.
- [29] F. Aiguo, J. Benjamin, *J. Mater. Sci. Eng.*, **242**, 1998, 50.
- [30] J. Hashim, L. Looney, *J. Mater. Proc. Technol.*, **119**, 2001, 324.
- [31] The American Society for Testing Materials, ASTM-E9, *Handbook of ASTM Standards*, Philadelphia, 2000.
- [32] H. Abdizadeha, M.A. Baghchesara, *J. Ceram. Inter.*, **39**, 2013, 2045.
- [33] H. Abdizadeh, M.A. Baghchesara, *J. Mech. Sci. Technol.*, **26**, 2012, 367.
- [34] R. Hertzber, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", Wiley, 2012.
- [35] M. Almeida, R. Brook, T. Carruthers, *J. Mater. Sci.*, **14**, 1979, 2191.

(ریخته‌گری گردابی) تطابق قابل قبولی با مقادیر محاسبه شده از قانون مخلوطها دارد. افزایش دانسیته دلیلی به جز حضور ذرات منیزیا در کامپوزیت ندارد و همچنین کاهش آن بدلیل ایجاد تخلخل در کامپوزیت به دلایل افزایش درصد حجمی و دماست که اثر غالب مجموعه‌ای از عوامل افزایشنده و یا کاهشنده دانسیته، نسبت به شرایط، باعث صعود و یا نزول نمودار می‌گردد.

- از آنجا که منیزیا سختی بسیار بالاتری در مقایسه با آلومینیم دارد، با افزودن ذرات پودر منیزیا به آلیاژ آلومینیم A356، سختی کامپوزیت حاصل افزایش قابل توجهی دارد. بیشترین سختی مربوط به نمونه تهیه شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  با ۵ درصد حجمی فاز تقویت کننده می‌باشد.

- بیشترین استحکام فشاری در بین نمونه‌های کامپوزیتی برای نمونه ریخته‌گری شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  با ۱/۵ درصد حجمی منیزیا برابر  $896\text{ MPa}$  می‌باشد. دلیل افزایش استحکام کامپوزیت را می‌توان، افزایش دانسیته نابجایی‌ها در اثر تجمع آنها در پشت موانع که ذرات منیزیا می‌باشند، دانست. همچنین علت کاهش استحکام و سیر نزولی منحنی، تخلخل‌های ایجاد شده در کامپوزیت ناشی از فرآیند تولید می‌باشد.

- با توجه به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و نمودارهای مربوطه، به نظر می‌رسد که دمای بهینه برای تولید کامپوزیتی با خواص مناسب نسبت به خواص حاصله و روش تولیدی خاص خود، دمای  $850^{\circ}\text{C}$  می‌باشد.

## سپاسگزاری

بدینوسیله از کلیه مسولان و کارشناسان که در انجام این پژوهش یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌گردد. لازم به ذکر است که این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی تحت عنوان، "تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با تقویت کننده نانو اکسید منیزیم به روش ریخته‌گری گردابی و بررسی خواص آن" بوده و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان انجام گرفته است.