



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## ساخت و مشخصه‌یابی آلیاژ آلتروپیک سبک $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$

یگانه بنی‌اسدی<sup>۱</sup>، محمدامین جباره<sup>۲\*</sup>، محمدحسن دانشی‌فر<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

\* نویسنده مکاتبه کننده: Email: m.jabbareh@hsu.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۸

آلیاژهای آلتروپیک سبک دسته‌ای از آلیاژهای سبک هستند که به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی اصلی این آلیاژها سختی بسیار بالا در مقایسه با آلیاژهای سبک استاندارد است. در این تحقیق یک آلیاژ آلتروپیک جدید با ترکیب  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  (برحسب درصد اتمی) تولید و مشخصه‌یابی شده است. آلیاژسازی در کوره القایی انجام گرفت. ریخته‌گری در سه قالب فلزی پیش گرم شده، پیش گرم نشده و آبگرد انجام شد. نتایج نشان داد ریزساختار آلیاژ متشکل از حجم بالایی از ترکیبات بین فلزی  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ،  $Mg_2Sn$ ،  $Al_6Mn$ ،  $Al_4Mn$  به همراه محلول جامد Al است. حدود ۵۰ درصد حجمی از ریزساختار در هر سه نمونه شامل ساختار یوتکتیک  $Al/Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  است. بعد از ساختار یوتکتیک فازهای پرویوتکتیک  $Mg_2Sn$ ،  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  و ترکیبات بین فلزی Al-Mn به ترتیب بیشترین کسر حجمی را در ریزساختار دارند. افزایش نرخ سرمایش منجر به کاهش اندازه فازها می‌شود. مقدار سختی برای نمونه منجمد شده در قالب پیش گرم شده، پیش گرم نشده و آبگرد به ترتیب ۱۹۹/۱۷، ۲۲۷/۱۴ و ۲۳۷/۶۳ ویکرز اندازه‌گیری شد که بسیار بیشتر از سختی آلیاژهای ریخته‌گری استاندارد آلومینیوم است.

### واژه‌های کلیدی:

آلیاژ آلتروپیک متوسط، آلیاژ سبک، ریزساختار، سختی.

### ارجاع به این مقاله:

یگانه بنی‌اسدی، محمدامین جباره، محمدحسن دانشی‌فر، ساخت و مشخصه‌یابی آلیاژ آلتروپیک سبک  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$ ، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۲، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۲۵-۳۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.418420.1186

### ۱- مقدمه

روش برخلاف آلیاژسازی کلاسیک مبتنی بر استفاده از چندین عنصر آلیاژی با غلظت بالا به‌عنوان عنصر پایه است [۵]. هدف اولیه از طراحی آلیاژهای آلتروپیک بالا دست‌یابی به آلیاژهایی با ساختار محلول جامد تک فاز بوده است اما در حال حاضر آلیاژهای آلتروپیک بالا با ساختارهای چند فاز نیز مورد توجه قرار دارند. به‌علاوه مفاهیم جدیدی مانند آلیاژهای آلتروپیک متوسط، آلیاژهای با چند عنصر پایه و آلیاژهای پرعیار چند جزئی به‌منظور تفکیک بین آلیاژهای آلتروپیک ایجاد شده‌اند [۶]. به‌عنوان مثال امروزه تنها آلیاژهای تک فاز با آلتروپیک وضعیت بیشتر از R ۱/۵ آلیاژ آلتروپیک بالا نامیده می‌شوند (R ثابت جهانی گازها است). درحالی‌که آلیاژهای با آلتروپیک وضعیت بین R ۱ تا R ۱/۵ فارغ از اینکه تک فاز یا چند فاز باشند در دسته آلیاژهای آلتروپیک

آلیاژهای سبک گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که ویژگی اصلی آنها نسبت استحکام به وزن بالا است. به همین دلیل در صنایع هوافضا، صنایع نظامی، خودروسازی، زیست پزشکی و ورزشی که در آنها کاهش وزن یک عامل حیاتی است از آلیاژهای سبک به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۱-۳]. با این حال، نقطه ذوب پایین و عدم مقاومت در برابر سایش را می‌توان از اصلی‌ترین محدودیت‌های آلیاژهای سبک دانست [۴]. طراحی مناسب آلیاژ، عملیات حرارتی و عملیات سطحی روش‌های اصلی برای غلبه بر محدودیت‌های فوق هستند.

استفاده از مفهوم آلتروپیک بالا، دریچه جدیدی در طراحی آلیاژهای نو با ویژگی‌های منحصر به فرد ایجاد کرده است. این

حدود آلیاژهای تیتانیم است اما سختی آن بسیار بیشتر و در حدود ۴۶۰ ویکرز گزارش شده است. همچنین چائی [۲۲] و همکاران آلیاژ آنتروپیی بالای  $AlCuFeMnMgTi$  را به روش آلیاژسازی مکانیکی و با شرایط مختلف تولید کردند. نتایج نشان داد در شرایط آلیاژسازی بهینه چگالی آلیاژ  $4/34 \text{ gr/cm}^3$  و سختی آن ۷۷۰ ویکرز است.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد هرچند تاکنون سیستم‌های آلیاژی مختلفی برای طراحی آلیاژهای آنتروپیک سبک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما بسیاری از این سیستم‌ها شامل عناصر گران‌قیمت یا سمی مانند  $Li$ ،  $Sc$  و  $Be$  هستند که کاربرد آنها را محدود می‌کند. به علاوه سیستم‌های مطالعه شده در مقایسه با کل سیستم‌های آلیاژی ممکن، بسیار اندک هستند. لذا بررسی سیستم‌های آلیاژی جدید با هدف دستیابی به آلیاژهایی با خواص متفاوت ضروری است. در این تحقیق یک آلیاژ آنتروپیک سبک در یک سیستم آلیاژی جدید طراحی و تولید شده و خواص آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور عناصر  $Mg$  و  $Al$  به دلیل چگالی پایین مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از  $Zn$  به‌عنوان سومین عنصر اصلی استفاده شد زیرا انواع ترکیبات بین فلزی سه‌تایی  $Al-Mg-Zn$  با سختی بالا، در دامنه وسیعی از ترکیب شیمیایی در این سیستم پایدار هستند [۲۳]. به‌علاوه از عنصر  $Mn$  با هدف تشکیل ترکیبات بین فلزی  $Al-Mn$  و از عنصر قلع با هدف تشکیل ترکیب بین فلزی  $Mg_2Sn$  استفاده شد. به‌این ترتیب سیستم آلیاژی  $Al-Mg-Mn-Sn-Zn$  برای طراحی آلیاژ موردنظر مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر امکان تشکیل فازهای بین فلزی سخت، قیمت پایین عناصر آلیاژی، در دسترس بودن آنها و سهولت آلیاژسازی عناصر به روش ذوبی دیگر مؤلفه‌های تأثیرگذار در انتخاب عناصر آلیاژی بوده است. آلیاژ موردنظر ابتدا با استفاده از ترمودینامیک محاسباتی طراحی شد. سپس به روش ذوبی تولید گردیده و در نهایت ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

طراحی آلیاژ در سیستم  $Al-Mg-Mn-Sn-Zn$  انجام شد. برای این منظور از نرم‌افزار JMatPro7 که پیش‌ازاین کارایی آن در طراحی آلیاژهای آنتروپیی بالا نشان داده شده است [۲۴] جهت پیش‌بینی نمودار فازی این سیستم چند جزئی با ترکیب‌های شیمیایی مختلف استفاده شد. چگالی تئوری کمتر از  $4 \text{ gr/cm}^3$  آنتروپیی بزرگ‌تر از  $1R$  و بالاترین حجم ممکن از ترکیبات بین‌فلزی با هدف رسیدن به سختی بالا به‌عنوان معیارهای طراحی در نظر گرفته شدند. با توجه به معیارهای فوق چندین ترکیب شیمیایی مختلف به‌عنوان آلیاژهای ممکن مد نظر قرار گرفت که از بین

متوسط قرار می‌گیرند [۷]. سختی و استحکام بسیار بالا [۸،۹]، مقاومت در برابر خستگی [۱۰]، خوردگی و اکسیداسیون [۱۱] از جمله ویژگی‌هایی است که برای آلیاژهای آنتروپیک گزارش شده است.

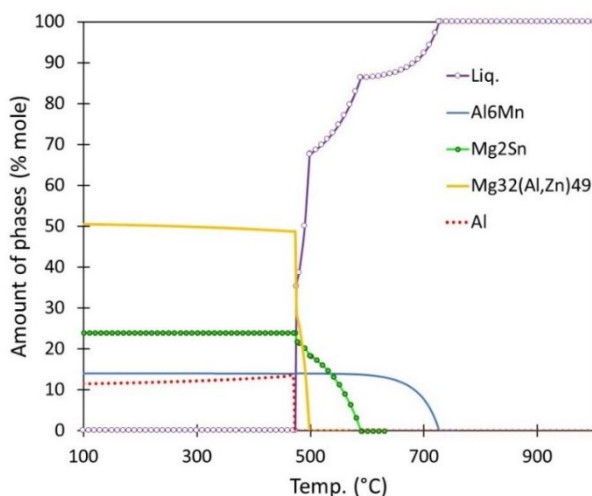
هر چند طراحی آلیاژهای آنتروپیک سبک همواره مورد توجه محققین قرار داشته است [۱۲] اما این دسته از آلیاژهای آنتروپیک در مقایسه با سایر آلیاژهای آنتروپیک کمتر توسعه یافته‌اند [۶]. علت اصلی این موضوع آن است که عناصر سبکی مانند آلومینیم و منیزیم تمایل بسیار زیادی به تشکیل ترکیبات بین فلزی دارند لذا در اغلب موارد حجم بالایی از ترکیبات بین فلزی در ساختار آلیاژهای آنتروپیک سبک ایجاد می‌شود که انعطاف‌پذیری آنها را به شدت کاهش می‌دهد [۱۳،۱۴]. لذا آلیاژهای آنتروپیک سبک عمدتاً برای کاربردهای ساختمانی مناسب نیستند. با این حال سختی بالا و مقاومت به سایش خوب، این آلیاژها را تبدیل به گزینه‌های مناسبی برای ساخت پوشش‌های محافظ کرده است [۱۵].

اولین بار توسط لی و همکاران [۱۶]، گروهی از آلیاژهای سبک آنتروپیک در سیستم آلیاژی  $MgMnAlZnCu$  طراحی و به روش ذوبی تولید شدند. چگالی آلیاژهای تولید شده بسته به ترکیب شیمیایی بین  $2/2 \text{ gr/cm}^3$  تا  $5 \text{ gr/cm}^3$  گزارش شد. همچنین سختی آلیاژها ۱۷۸ تا ۴۶۷ ویکرز اندازه‌گیری شد. وجود فازهای بین فلزی  $Al-Mn$  علت اصلی سختی بالا در این آلیاژها معرفی شد. یوسف و همکاران [۱۷] با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی، آلیاژ آنتروپیی بالای  $Al_{20}Li_{20}Mg_{10}Sc_{20}Ti_{30}$  را با چگالی  $\text{gr/cm}^3$   $2/67$  تولید کردند. ساختار تک فاز fcc و سختی ۵۹۱ ویکرز برای این آلیاژ گزارش شده است. در پژوهشی دیگر تسنگ و همکاران [۱۸] آلیاژ  $Al_{20}Be_{20}Fe_{10}Si_{15}Ti_{35}$  را به روش ذوبی تولید کردند. چگالی آلیاژ  $3/9 \text{ gr/cm}^3$  و سختی آن ۹۱۱ ویکرز گزارش شد. با وجود سختی بسیار بالا، وجود عنصر سمی برلیم کاربرد این آلیاژ را محدود می‌کند. سانچز و همکاران [۱۹،۲۰] مجموعه‌ای از آلیاژهای سبک را بر مبنای عناصر  $Al$ ،  $Cu$ ،  $Cr$ ،  $Fe$ ،  $Si$ ،  $Mn$ ،  $Ti$ ،  $Ca$ ،  $V$ ،  $Zr$  و  $Zn$  توسعه دادند. از میان آلیاژهای مورد مطالعه آلیاژ  $Al_{40}Cu_{15}Cr_{15}Fe_{15}Si_{15}$  با چگالی  $4/5 \text{ gr/cm}^3$  و سختی ۹۱۶ ویکرز سخت‌ترین آلیاژ آنتروپیک سبک در بین تمام آلیاژهای معرفی شده تا به امروز محسوب می‌شود. همچنین آلیاژ  $Al_{65}Cu_5Cr_5Si_{15}Mn_5Ti_5$  با چگالی  $3/7 \text{ gr/cm}^3$  و سختی ۸۸۹ ویکرز بالاترین نسبت سختی به چگالی را در بین تمام آلیاژهای آنتروپیک سبک دارد. چایوهان و همکاران [۲۱] آلیاژ  $Al_{35}Cr_{14}Mg_6Ti_{35}V_{10}$  با چگالی  $4/05 \text{ gr/cm}^3$  را به روش آلیاژسازی مکانیکی تولید کردند. هرچند چگالی این آلیاژ در

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- مدل‌سازی ترمودینامیکی

در شکل ۱ نمودار تغییرات درصد فازها برحسب دما برای آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  آمده که با استفاده از نرم‌افزار JMatPro7 محاسبه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، این آلیاژ در دمای محیط شامل چهار فاز  $Mg_2Sn$ ،  $Al_6Mn$ ،  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  و  $Al$  است. انجماد از دمای ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد و با تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $Al_6Mn$  شروع می‌شود، سپس با تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $Mg_2Sn$  در دمای ۵۸۹ درجه سانتی‌گراد و ترکیب بین‌فلزی سه‌تایی  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  در دمای ۵۰۱ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد و در نهایت با یک استحاله یوتکتیک در دمای ۴۷۶ درجه سانتی‌گراد، فرایند انجماد پایان می‌یابد. بعد از استحاله یوتکتیک، فازها پایدار بوده و استحاله‌ای در حالت جامد برای این آلیاژ پیش‌بینی نشده است. در دمای محیط ترکیب بین‌فلزی  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  با حدود ۵۱ درصد بالاترین کسر مولی و محلول جامد آلومینیم با حدود ۱۱ درصد کمترین کسر مولی را در بین اجزای ساختاری این آلیاژ دارند. بر اساس نتایج شکل ۱، در مجموع ۸۹ درصد (برحسب مول) ساختار آلیاژ شامل ترکیبات بین‌فلزی است. همچنین ۳۵ درصد (برحسب مول) از ریزساختار شامل ساختار یوتکتیکی و مابقی ساختار، فازهای پرویوتکتیک هستند. سختی ترکیب بین‌فلزی  $Al_6Mn$  حدود ۵۰۰ ویکرز [۲۵] و سختی  $Mg_2Sn$  حدود ۱۷۰ [۲۶] ویکرز گزارش شده است. هرچند مقدار مشخصی برای سختی فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  گزارش نشده است اما این فاز اخیراً به‌عنوان یک رسوب سخت به‌منظور بهبود خواص آلیاژهای آلومینیم مورد توجه قرار گرفته است [۲۷]. با توجه به موارد فوق، انتظار می‌رود آلیاژ مورد مطالعه سختی بالایی داشته باشد.



شکل ۱- درصد مولی فازها برحسب دما برای آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  محاسبه شده با نرم‌افزار JMatPro.

آنها آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  با چگالی تئوری  $3/57 \text{ gr/cm}^3$  و آنتروپی وضعیتی  $1/34R$  به‌عنوان آلیاژ مطلوب برای انجام ریخته‌گری انتخاب شد. با توجه به مقدار آنتروپی وضعیتی، این آلیاژ را می‌توان در دسته آلیاژهای آنتروپی متوسط طبقه‌بندی نمود.

آلیاژسازی با استفاده از شمش‌های خالص تجاری  $Al$ ،  $Mg$ ،  $Sn$  و  $Zn$  و آمیزان  $Al-20 \text{ wt.}\% \text{ Mn}$  انجام شد. برای این منظور مقادیر مناسب از آلومینیم و آمیژان آلومینیم-منگنز در بوته آلومینایی شارژ و در کوره القایی ذوب شدند. سپس مقدار مناسب منیزیم به بوته اضافه شد. بعد از ذوب کامل منیزیم، روی و قلع به مذاب اضافه شدند. کلیه مراحل آلیاژسازی تحت گاز محافظ آرگون انجام شد. ریخته‌گری در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و در قالب های فلزی انجام شد. به‌منظور دستیابی به نرخ سرمایش‌های مختلف قالب فلزی شماره یک تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شد (نمونه PH)، قالب شماره دو بدون پیش گرم (نمونه AC) و قالب شماره سه به‌صورت آبگرد (نمونه WC) مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی آلیاژ با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده القایی (ICP) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته شده تطابق خوبی با ترکیب اسمی آن دارد.

چگالی آلیاژ با استفاده از روش ارشمیدس  $3/3 \text{ gr/cm}^3$  اندازه‌گیری شد. جهت مطالعات ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. همچنین جهت شناسایی فازها آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه فیلیپس مدل PW1730 تحت تابش لامپ اشعه ایکس مس با طول موج  $1/54056 \text{ \AA}$  با ولتاژ  $40 \text{ kV}$  و جریان  $30 \text{ mA}$  در گام‌های  $0/05$  درجه و زمان ماندگاری ۱ ثانیه انجام گرفت. از نرم‌افزار پردازش تصویر ImageJ جهت پردازش کمی تصاویر ریزساختاری استفاده شد. آزمون سختی سنجی ویکرز با استفاده از دستگاه QUALITEST مدل QV-1000 تحت بار ۱ کیلوگرم و زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه انجام گرفت. سختی‌سنجی حداقل ۵ مرتبه برای هر نمونه تکرار شده و مقدار میانگین به‌عنوان عدد سختی گزارش شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته‌گری شده در مقایسه با آلیاژ طراحی شده (مقادیر برحسب درصد اتمی است).

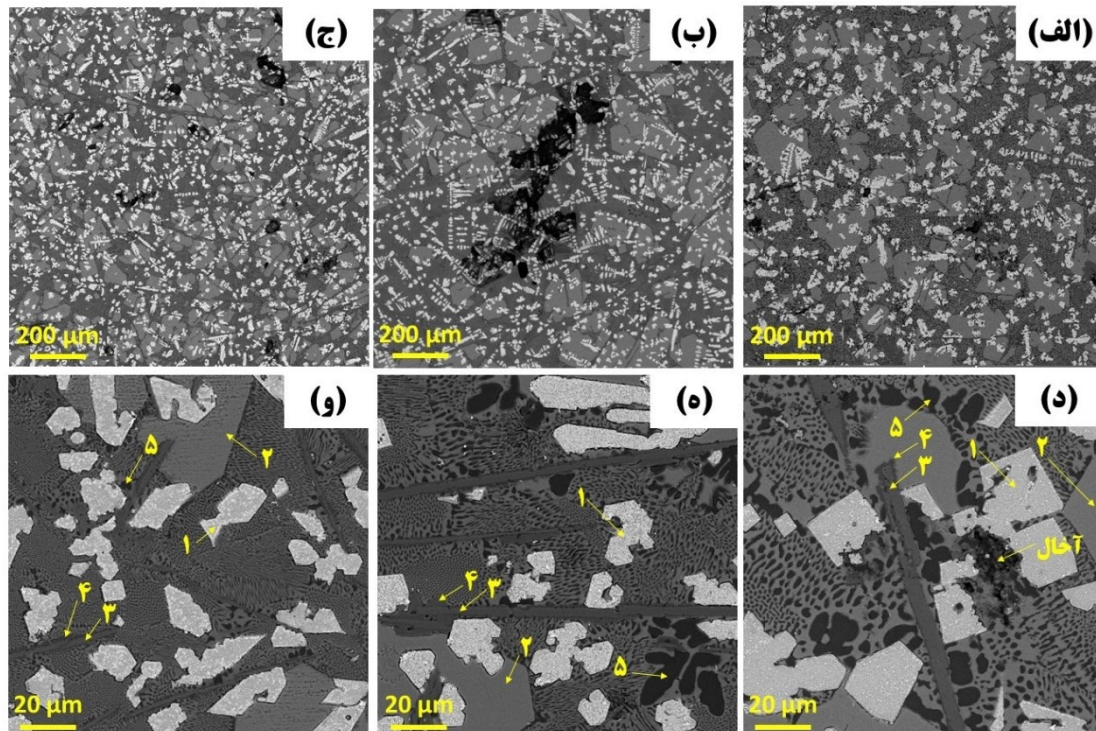
رومی	قلع	منگنز	منیزیم	آلومینیم	طراحی
۲۰	۸	۲	۳۵	۳۵	طراحی
۲۳	۷/۹	۱/۸	۳۳/۹	۳۳/۲	ریخته‌گری

## ۲-۳- مشخصه‌یابی ریزساختاری

شکل ۲، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژهای ریخته شده در سه شرایط سرمایش متفاوت را در دو بزرگنمایی مختلف نشان می‌دهد. شکل ۲ (الف) و (د) مربوط به آلیاژ منجمد شده در قالب پیش گرم شده (نمونه PH)، شکل ۲ (ب) و (ه) مربوط به آلیاژ منجمد شده در قالب پیش گرم نشده (نمونه AC) و شکل ۲ (ج) و (و) مربوط به آلیاژ منجمد شده در قالب آبگرد (نمونه WC) است. ریزساختار آلیاژ در هر سه نمونه به‌وضوح یک ساختار چند فاز را نشان می‌دهد. در هر سه نمونه فازها توزیع یکنواختی دارند. همچنین حفرات انقباضی در اندازه‌های مختلف در هر سه نمونه قابل مشاهده است که ناشی از دامنه انجماد گسترده در این آلیاژ است. در تصاویر با بزرگنمایی پایین در هر سه نمونه دو فاز سفید و خاکستری با مورفولوژی چند وجهی مشاهده می‌شود. این فازها به ترتیب با شماره ۱ و ۲ روی شکل‌های ۲ (د - و) مشخص شده است. به‌علاوه یک فاز خاکستری با مورفولوژی تیغه‌ای در ریزساختار هر سه آلیاژ وجود دارد. در بزرگنمایی‌های بیشتر مشخص می‌شود که این فاز شامل یک بخش مرکزی به رنگ خاکستری روشن‌تر و یک لایه خارجی به رنگ خاکستری تیره‌تر است که به ترتیب با شماره‌های ۳ و ۴ روی شکل‌های ۲ (د - و) مشخص شده است. فضای بین این فازها با یک ساختار یوتکتیکی پر شده است. علاوه بر این در تصاویر با بزرگنمایی بالا فازهای مشکی رنگ با مورفولوژی

دندریتی نیز قابل مشاهده است (نقطه ۵) همین فاز به‌وضوح در ساختار یوتکتیکی نیز مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد تغییر نرخ سرمایش تأثیری بر ماهیت فازهای پایدار در این آلیاژ نداشته است و هر سه نمونه دارای فازهای یکسان با مورفولوژی مشابه هستند.

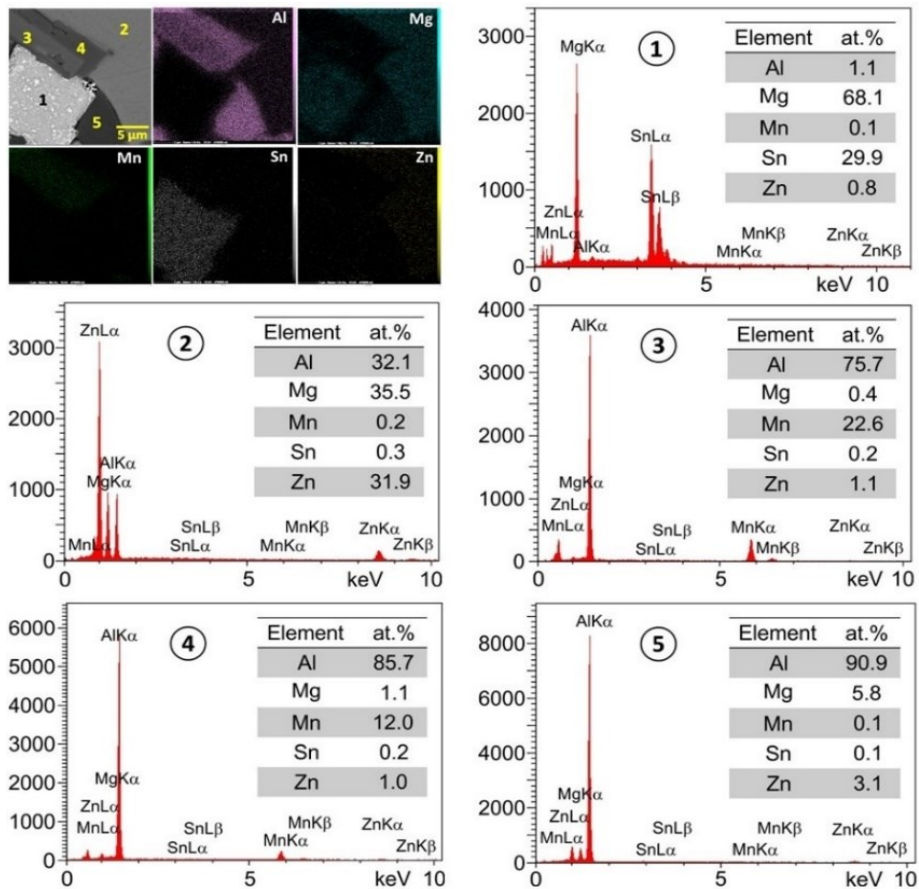
از آنالیز EDS به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی فازهای ۱ تا ۵ در هر سه نمونه استفاده شد. شکل ۳، نتایج آنالیز EDS برای نمونه PH را به همراه نقشه توزیع عناصر آلیاژی برای این نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاز ۱ شامل منیزیم و قلع با نسبت اتمی نزدیک به ۲ به ۱ بوده که نشان دهنده فاز  $Mg_2Sn$  است. فاز ۲ غنی از آلومینیم، منیزیم و روی با نسبت‌های اتمی تقریباً برابر است که می‌تواند نشان دهنده فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  باشد. فازهای ۳ و ۴ هر دو غنی از آلومینیم و منگنز هستند که می‌توانند فازهای  $Al_6Mn$ ،  $Al_4Mn$  و یا  $Al_{11}Mn_4$  باشند و فاز ۵ به‌وضوح محلول جامد روی و منیزیم در آلومینیم است که بیش از ۹۰٪ اتمی، آلومینیم دارد. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نمونه PH که در شکل ۴ نشان داده شده، وجود فازهای  $Mg_2Sn$  با شماره کارت ۲۹۹۷-۰۶۵-۰۳ (فاز ۱)،  $Mg_{32}(Al,Mn)_{49}$  با شماره کارت ۲۹۰۰-۰۱۹-۰۰ (فاز ۲)،  $Al_4Mn$  با شماره کارت ۱۲۸۱-۰۴۸-۰۰ (فاز ۳)،  $Al_6Mn$  با شماره کارت ۱۱۴۸-۰۴۸-۰۰ (فاز ۳)، و آلومینیم با شماره کارت ۲۸۳۷-۰۸۹-۰۱ (فاز ۴) و آلومینیم با شماره کارت ۲۸۳۷-۰۸۹-۰۱



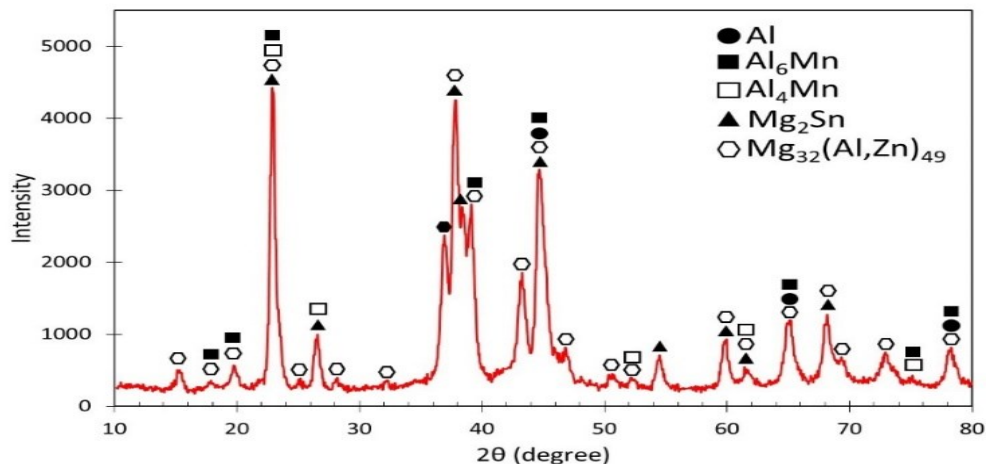
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  در دو بزرگنمایی مختلف. (الف) و (د) انجماد در قالب پیش گرم شده، (ب) و (ه) انجماد در قالب پیش گرم نشده، (ج) و (و) انجماد در قالب آبگرد.

آنتروپیک در موارد متعددی گزارش شده است [۱۹،۲۰،۲۸]. ذکر این نکته ضروری است که محاسبات ترمودینامیکی با دو فرض شرایط تعادل ترمودینامیکی و توزیع همگن عناصر آلیاژی انجام می‌شوند. با توجه به اینکه شرایط واقعی انجماد با شرایط تعادلی فاصله دارد، همچنین امکان غیریکنواختی در مذاب وجود دارد لذا عدم تطابق کامل بین نتایج تجربی و محاسبات ترمودینامیکی امری طبیعی است. نتایج مشابهی برای نمونه‌های AC و WC نیز مشاهده شد.

را در ریزساختار آلیاژ تأیید می‌کند. این نتایج همچنین تطابق خوبی با نتایج محاسبات ترمودینامیکی ارائه شده در شکل ۱ دارد که به‌خوبی تشکیل فازهای پرو یوتکتیک  $Mg_2Sn$ ،  $Al_6Mn$  و  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  را پیش‌بینی می‌کند. به‌علاوه تشکیل یوتکتیک  $Al/Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  که در شکل ۱ پیش‌بینی شده است در تصاویر ریزساختاری نیز مشاهده می‌شود. تنها تفاوت عمده وجود فاز  $Al_4Mn$  در ریزساختار است که توسط محاسبات ترمودینامیکی پیش‌بینی نشده است. عدم تطابق جزئی بین محاسبات ترمودینامیکی و نتایج تجربی در مورد آلیاژهای

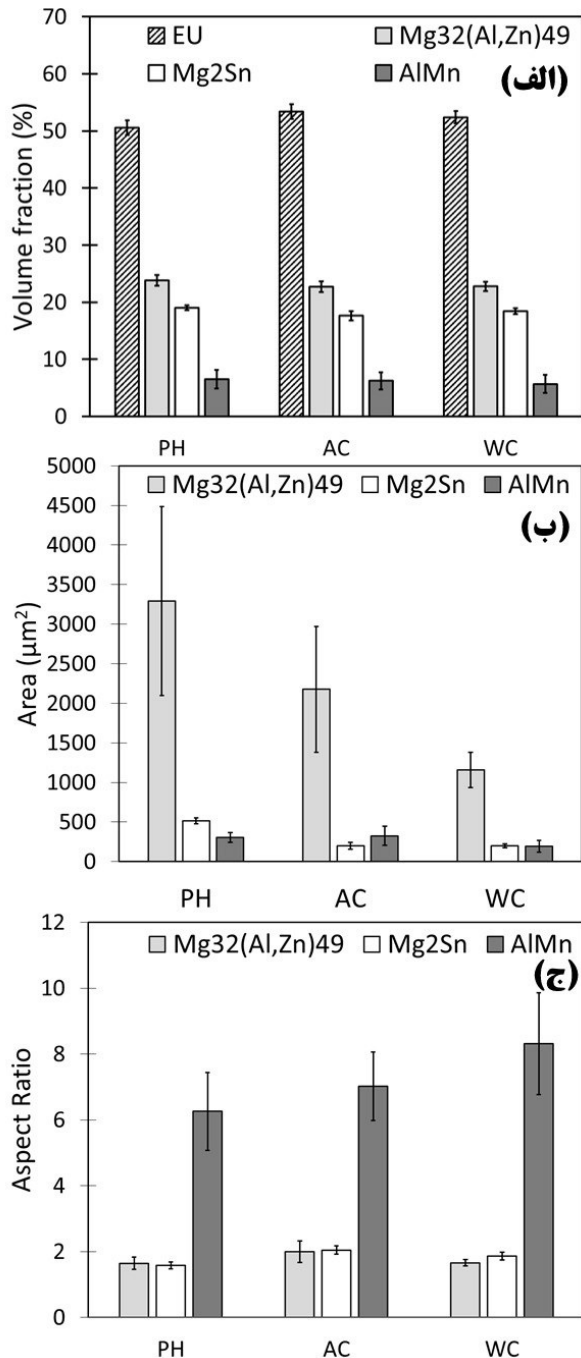


شکل ۳- نقشه آنالیز عنصری به همراه نتایج آنالیز EDS از نقاط (فازهای) ۱ تا ۵ نشان داده شده بر روی تصویر SEM.



شکل ۴- طیف پراش پرتو ایکس آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$

اندازه متوسط فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  بسیار بیشتر از اندازه فازهای  $AlMn$  و  $Mg_2Sn$  است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ سرمایش اندازه فاز پرویوتکتیک  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  به‌طور پیوسته کاهش یافته است. به‌طوری که در نمونه AC اندازه این فاز ۳۴ درصد و در نمونه WC اندازه این فاز ۶۵ درصد نسبت به نمونه PH کاهش یافته است. کاهش تدریجی اندازه با افزایش نرخ سرمایش در مورد فاز  $Mg_2Sn$  نیز مشاهده می‌شود. در مورد این فاز کاهش اندازه ذرات در نمونه AC و WC نسبت به PH به



شکل ۵- مشخصه‌های ریزساختاری فازهای پرویوتکتیک  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ،  $Mg_2Sn$  و فازهای تیغه‌ای ( $AlMn$ ) و ساختار یوتکتیک در نمونه‌های PH، AC و WC. (الف) کسر حجمی، (ب) اندازه متوسط ذرات و (ج) ضریب شکل.

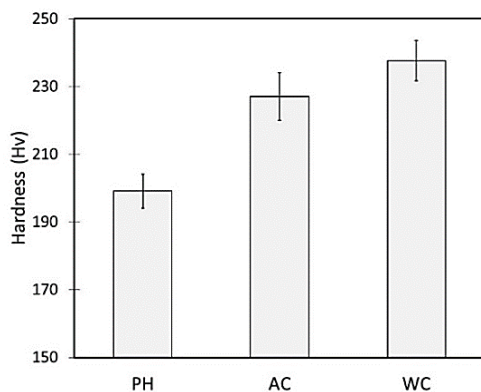
به‌منظور بررسی اثر شرایط مختلف انجمادی بر ریزساختار آلیاژ، پردازش کمی تصاویر ریزساختاری انجام شد که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این شکل،  $AlMn$  بیان‌گر مجموع فازهای تیغه‌ای  $Al_6Mn$  و  $Al_4Mn$  است. همچنین مقادیر گزارش شده برای  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  صرفاً مربوط به نواحی پرویوتکتیک بوده و مقدار این فاز در ساختار یوتکتیک را شامل نمی‌شود. شکل ۵-الف کسر حجمی اجزای سازنده ریزساختار را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر کسر حجمی به همراه خطای مربوط به محاسبات در جدول ۲ آورده شده است. در هر سه نمونه به ترتیب ساختار یوتکتیک، فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ،  $Mg_2Sn$  و فازهای تیغه‌ای  $AlMn$  بیشترین کسر حجمی را در ریزساختار دارند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، نمونه PH که کمترین نرخ سرمایش را داشته، کمترین میزان ساختار یوتکتیکی را دارد (۵۰/۶ درصد) و با افزایش نرخ سرمایش در نمونه‌های AC و WC میزان ساختار یوتکتیک تا حدود ۲ درصد افزایش یافته است. باید توجه داشت که اختلاف درصد یوتکتیک در دو نمونه AC و WC در محدوده خطای اندازه‌گیری است. لذا درصد ساختار یوتکتیک در این دو نمونه را می‌توان مشابه در نظر گرفت. بنابراین با افزایش نرخ سرمایش از نمونه PH به AC میزان ساختار یوتکتیک به میزان جزئی افزایش یافته ولی با افزایش بیشتر نرخ سرمایش از نمونه AC به WC میزان ساختار یوتکتیک تغییری نداشته است. این روند در مورد فازهای  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  و  $Mg_2Sn$  برعکس است. به این ترتیب که کسر حجمی این دو فاز در نمونه PH به ترتیب ۲۳/۹ و ۱۹/۰ درصد است که با افزایش نرخ سرمایش هر کدام حدود ۱ درصد کاهش یافته است. در مورد این دو فاز هم میزان اختلاف مقادیر محاسبه شده برای دو نمونه AC و WC در حد خطای اندازه‌گیری است، لذا کسر حجمی این دو فاز در هر دو نمونه AC و WC را می‌توان یکسان در نظر گرفت. در مورد ساختار تیغه‌ای هیچ تغییری در کسر حجمی فازها با تغییر در نرخ سرمایش مشاهده نمی‌شود و اختلاف جزئی در نتایج گزارش شده در محدوده خطای اندازه‌گیری است. در مجموع می‌توان گفت افزایش نرخ سرمایش موجب کاهش جزئی فازهای پرویوتکتیک و افزایش جزئی ساختار یوتکتیک شده است. با افزایش نرخ سرمایش مدت زمان تشکیل فازهای پرویوتکتیک کاهش می‌یابد در نتیجه حجم کمتری از این فازها تشکیل شده و مذاب بیشتری به دمای یوتکتیک می‌رسد لذا حجم ساختار یوتکتیک با افزایش نرخ سرمایش افزایش می‌یابد [۲۹،۳۰].

شکل ۵-ب متوسط اندازه فازهای موجود در ساختار سه نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه نمونه

جدول ۲- داده‌های مربوط به کسر حجمی و متوسط مساحت اجزای ریزساختاری آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  در شرایط مختلف انجمادی.

متوسط مساحت ( $\mu m^2$ )			کسر حجمی (%)				نمونه
AlMn	Mg <sub>2</sub> Sn	Mg <sub>32</sub> (Al,ZN) <sub>49</sub>	AlMn	Mg <sub>2</sub> Sn	Mg <sub>32</sub> (Al,ZN) <sub>49</sub>	Eutectic	
۳۰۳±۶۰	۵۱۴±۳۶	۳۲۹۳±۱۱۹۳	۶/۵±۱/۶	۱۹/۰±۰/۴	۲۳/۹±۰/۹	۵۰/۶±۱/۳	PH
۳۲۶±۱۲۱	۲۰۰±۴۳	۲۱۷۵±۷۹۵	۶/۲±۱/۵	۱۷/۶±۰/۸	۲۲/۷±۰/۹	۵۳/۴±۱/۲۹	AC
۱۹۱±۷۳	۱۹۷±۲۵	۱۱۵۸±۲۲۰	۵/۷±۱/۶	۱۸/۴±۰/۵	۲۲/۸±۰/۸	۵۲/۴±۱/۰۶	WC

نشان می‌دهد. افزایش سختی با افزایش نرخ سرمایش را می‌توان به کاهش اندازه فازهای پرویوتکتیک با افزایش نرخ سرمایش که نتایج آن در شکل ۵ گزارش شده است و همچنین کاهش فاصله لایه‌های یوتکتیک با افزایش نرخ سرمایش نسبت داد. در نمودار اشی شکل ۷-الف، سختی آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  در سه شرایط انجمادی مختلف با سختی آلیاژهای ریخته‌گی و کار شده آلومینیم و همچنین آلیاژهای تیتانیوم استاندارد مقایسه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده سختی برای هر سه نمونه بسیار بیشتر از مقادیر سختی در آلیاژهای استاندارد ریخته‌گی آلومینیم است. به‌عنوان مثال سخت‌ترین آلیاژ ریخته‌گی آلومینیم آلیاژ A201 است که حداکثر سختی معادل ۱۵۲ ویکرز دارد درحالی که کمترین سختی در بین نمونه‌های این تحقیق ۱۹۹/۲ ویکرز است که ۳۱ درصد بیشتر از سختی آلیاژ A201 است. سختی آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  در حالت ریخته‌گی را می‌توان در محدوده سختی آلیاژ کار شده ۷۰۵۵ یکی از سخت‌ترین آلیاژهای آلومینیم دانست. از طرفی سختی آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  از بسیاری از آلیاژهای تیتانیومی نیز بیشتر است و سختی قابل مقایسه با آلیاژ Ti-3Al-5Mo دارد. این درحالی است که چگالی آن حدوداً ۲۹ درصد کمتر از چگالی آلیاژهای تیتانیوم است.

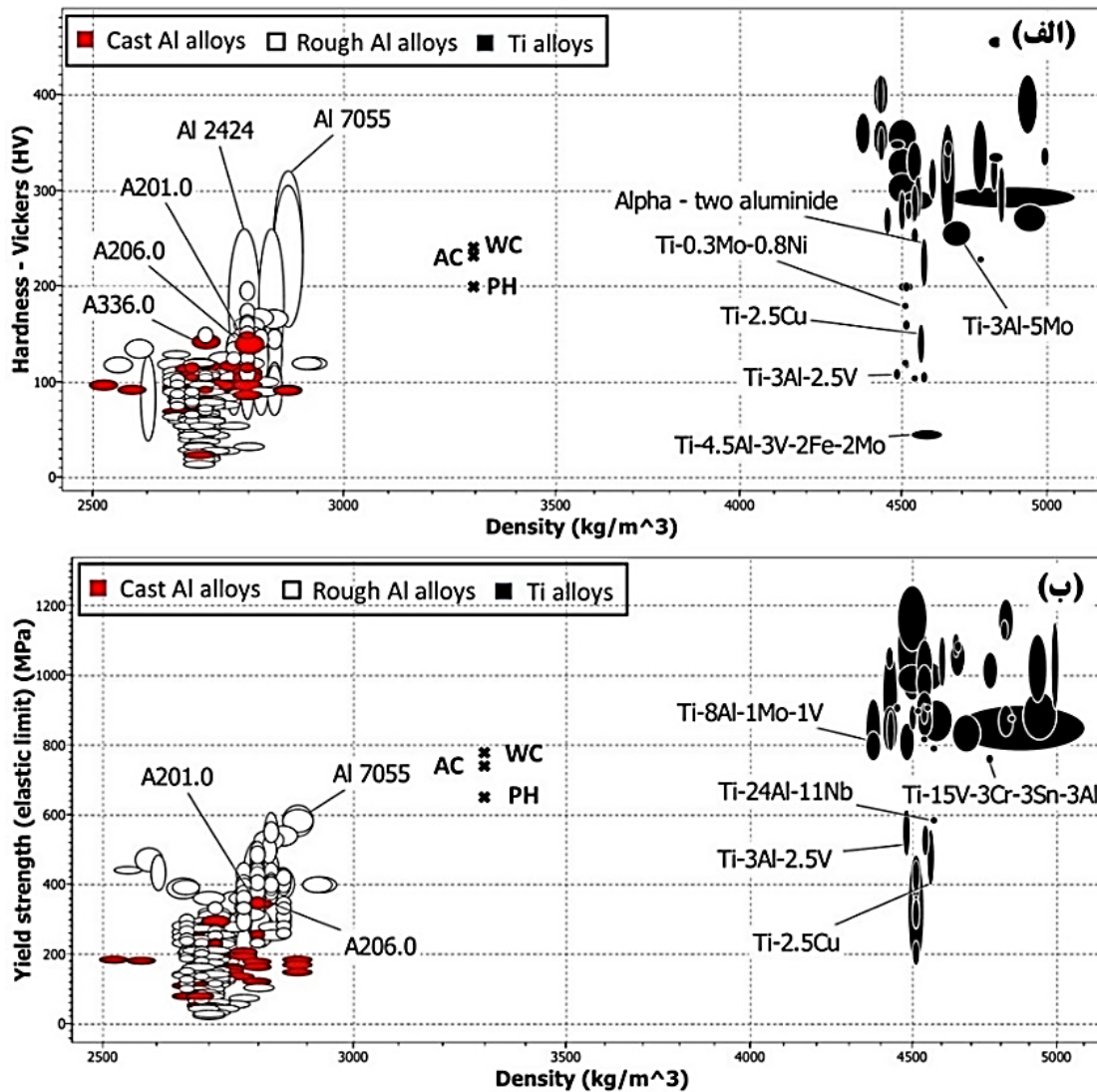


شکل ۶- نتایج سختی‌سنجی برای نمونه‌های با شرایط سرد شدن متفاوت.

ترتیب برابر با ۶۱ درصد و ۶۲ درصد است که نشان می‌دهد برخلاف فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  اندازه ذرات  $Mg_2Sn$  در دو نمونه AC و WC تقریباً برابر است. برخلاف  $Mg_2Sn$  برای فازهای تیغه ای AlMn کاهش اندازه، تنها در نمونه WC که بالاترین نرخ سرمایش را دارد به‌طور چشم‌گیری مشاهده می‌شود (۳۷ درصد نسبت به نمونه PH) و اندازه تیغه‌ها در دو نمونه PH و AC تقریباً برابر است. داده‌های مربوط به شکل ۵-ب در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب شکل اندازه‌گیری شده برای فازها در شکل ۵-ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب شکل فازهای  $Mg_2Sn$  و  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  با افزایش نرخ سرمایش تغییر چندانی ندارد اما برای فازهای تیغه‌ای AlMn به‌وضوح افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزایش نرخ سرمایش ضخامت فازهای تیغه‌ای کاهش یافته است که این موضوع در تصاویر ریزساختاری ارائه شده در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است. نتایج شکل ۵-ب و ۵-ج در کنار تصاویر ریزساختاری شکل ۲ در مجموع نشان می‌دهد که افزایش نرخ سرمایش منجر به کاهش اندازه و توزیع یکنواخت‌تر فازهای پرویوتکتیک در ساختار آلیاژ شده است. به‌علاوه تصاویر ریزساختاری شکل ۲، کاهش ضخامت لایه‌های یوتکتیک با افزایش نرخ سرمایش را نیز به‌وضوح نشان می‌دهد هرچند که ضخامت لایه‌های یوتکتیکی به‌طور کمی اندازه‌گیری نشده است.

### ۳-۳- خواص مکانیکی

نتایج حاصل از سختی‌سنجی سه نمونه PH، AC و WC در شکل ۶ ارائه شده است. سختی نمونه PH معادل ۱۹۹/۲ ویکرز اندازه‌گیری شد. با افزایش نرخ سرمایش در نمونه AC سختی به عدد ۲۲۷/۱ رسیده است که افزایشی ۱۴ درصدی را نسبت به نمونه PH نشان می‌دهد. مقدار سختی برای نمونه WC برابر با ۲۳۷/۶ ویکرز اندازه‌گیری شد که در مقایسه با نمونه PH به میزان ۱۹ درصد و در مقایسه با نمونه AC حدوداً ۵ درصد افزایش را



شکل ۷- نمودار اشیی جهت مقایسه خواص مکانیکی آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  با آلیاژهای استاندارد آلومینیم و تیتانیوم.

(الف) سختی برحسب چگالی و (ب) استحکام تسلیم برحسب چگالی.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آلیاژ آنتروپیک متوسط  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  طراحی و به روش ذوبی در سه نرخ سرمایش مختلف تولید شد. چگالی آلیاژ تولید شده  $3/3 \text{ gr/cm}^3$  اندازه‌گیری شد که کمتر از چگالی آلیاژهای تیتانیوم و اندکی بیشتر از چگالی آلیاژهای استاندارد آلومینیم است. مطالعات ریزساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده موارد زیر را نشان می‌دهد.

۱- آلیاژ  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  یک ساختار چند فازی را نشان می‌دهد که شامل فازهای پرویوتکتیک  $Mg_2Sn$ ،  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ،  $Al_6Mn$  و  $Al_4Mn$  و ساختار یوتکتیکی  $Al-Mn$  است. فازهای پرویوتکتیک  $Al/Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  دارای مورفولوژی تیغه‌ای و فازهای  $Mg_2Sn$  و  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  دارای مورفولوژی چند وجهی هستند.

از رابطه تابور [۳۱] که استحکام تسلیم را براساس نتایج سختی ویکرز تخمین می‌زند، برای محاسبه استحکام تسلیم نمونه‌ها استفاده شد. بر اساس این رابطه استحکام تسلیم مواد ترد تقریباً یک‌سوم سختی آنها برحسب ویکرز است. دقت شود که در این رابطه عدد سختی برحسب مگاپاسکال مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس استحکام تسلیم نمونه‌های AC، PH و WC به ترتیب ۶۵۰، ۷۴۰ و ۷۸۰ مگاپاسکال پیش‌بینی شد. این مقادیر با استحکام تسلیم آلیاژهای استاندارد آلومینیم و تیتانیوم در نمودار اشیی شکل ۷-ب مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استحکام تسلیم نمونه‌ها از تمام آلیاژهای ریختگی و کار شده آلومینیم بیشتر است. همچنین نمونه‌های تولید شده ضمن کاهش چگالی استحکام تسلیمی در حد متوسط استحکام تسلیم آلیاژهای تیتانیوم دارند.

- [9] Wang Z., Li J., Yang Y., Pang L., Liu M., Li H., Liu Q., Fu B., Guo Y. and Wang Z., A novel high-entropy alloy with exceptional strength and elongation via bimodal grains and lamellar nano-precipitates, *Materials Science and Engineering A*, 2023, 870, 144851.
- [10] Chen P., Lee C., Wang S.-Y., Seifi M., Lewandowski J. J., Dahmen K. A., Jia H., Xie X., Chen B., Yeh J. W., Tsai C.-W., Yuan T. and Liaw P. K., Fatigue behavior of high-entropy alloys: A review, *Science China Technological Sciences*, 2018, 61, 168-178.
- [11] Shi Y., Yang B. and Liaw P. K., Corrosion-resistant high-entropy alloys: A review, *Metals*, 2017, 7, 1-18.
- [12] Jeong I.S., Lee J.H., Single-phase lightweight high-entropy alloys with enhanced mechanical properties, *Materials & Design*, 2023, 227, 111709.
- [13] Xiong W., Cheng L., Zhan S., Guo A.X.Y., Liaw P.K., Cao S.C., Recent advances on lightweight high-entropy alloys: Process, design, and applications, *High Entropy Alloys & Materials*, 2023. doi:10.1007/s44210-023-00014-y.
- [14] Feng R., Gao M. C., Lee C., Mathes M., Zuo T., Chen S., Hawk J. A., Zhang Y. and Liaw P. K., Design of light-weight high-entropy alloys, *Entropy*, 2016, 18, 16-29.
- [15] Kumar A. and Gupta M., An insight into evolution of light weight high entropy alloys: A review, *Metals*, 2016, 6, 199.
- [16] Li R., Gao J. C. and Fan K., Study to microstructure and mechanical properties of Mg containing high entropy alloys, *Materials Science Forum*, 2010, 650, 265-271.
- [17] Youssef K. M., Zaddach A. J., Niu C., Irving D. L. and Koch C. C., A novel low-density, high-hardness, high-entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures, *Materials Research Letters*, 2014, 3, 95-99.
- [18] Tseng K. K., Yang Y. C., Juan C. C., Chin T. S., Tsai C. W. and Yeh J. W., A light-weight high-entropy alloy Al<sub>20</sub>Be<sub>20</sub>Fe<sub>10</sub>Si<sub>15</sub>Ti<sub>35</sub>, *Science China Technological Sciences*, 2018, 61, 184-188.
- [19] Sanchez J. M., Vicario I., Albizuri J., Guraya T., Koval N. E. and Garcia J. C., Compound formation and microstructure of as-cast high entropy aluminums, *Metals*, 2018, 8, 167.
- [20] Sanchez J. M., Vicario I., Albizuri J., Guraya T. and Garcia J. C., Phase prediction, microstructure and high hardness of novel light-weight high entropy alloys, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8, 795-803.
- [21] Chauhan P., Yebaji S., Nadakuduru V.N., Shanmugasundaram T., Development of a novel light weight Al<sub>35</sub>Cr<sub>14</sub>Mg<sub>6</sub>Ti<sub>35</sub>V<sub>10</sub> high entropy alloy using mechanical alloying and spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820, 153367.
- [22] Chae M.J., Sharma A., Oh M.C., Ahn B., Lightweight AlCuFeMnMgTi high entropy alloy with high strength-to-density ratio processed by powder metallurgy, *Metals and Materials International*, 2021, 27, 629-638.
- [23] Liang P., Tarfa T., Robinson J. A., Wagner S., Ochinnikov P., Harmelin M. G., Seifert H. J., Lukas H. L. and Aldinger F., Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Al-Mg-Zn system, *Thermochimica Acta*, 1998, 314, 87-110.
- [24] Wang L., Yao C., Shen J., Zhang Y., Liu G., Wu X. and Zhang G., A new method to design eutectic high-entropy alloys by determining the formation of single-phase solid solution and calculating solidification paths, *Materials Science and Engineering A*, 2022, 830, 142325.
- [25] Lan X., Li K., Wang J., Lu Q., Yang T., Xiao Y. and Du Y., Preparation of ultra-large intermetallic particles in Al alloys for accurate determination of their mechanical properties, *Intermetallics*, 2023, 152, 107771.
- [26] Castillo-Hernandez G., Yasseri M., Klobes B., Ayachi S., Müller E. and Boor J., Room and high temperature
- ۲- در هر سه نمونه، ساختار یوتکتیک،  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  پرو-یوتکتیک،  $Mg_2Sn$  و فازهای تیغه‌ای Al-Mn به ترتیب بیشترین کسر حجمی ریزساختار را تشکیل می‌دهند. با افزایش نرخ سرمایش کسر حجمی فازهای پرویوتکتیک تا ۲ درصد کاهش و کسر حجمی ساختار یوتکتیک تا ۲ درصد افزایش یافت.
- ۳- با افزایش نرخ سرمایش در نمونه سرد شده در قالب آبگرد در مقایسه با قالب پیش گرم شده، متوسط اندازه فاز  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$  تا ۶۵ درصد، متوسط اندازه فاز  $Mg_2Sn$  تا ۶۲ درصد و متوسط اندازه فازهای تیغه‌ای AlMn تا ۳۷ درصد کاهش یافت.
- ۴- سختی آلیاژ برای سه نمونه سرد شده در قالب پیش گرم شده، قالب پیش گرم نشده و قالب آبگرد به ترتیب ۱۹۹/۲، ۲۲۷/۱ و ۲۳۷/۶ ویکرز اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد افزایش نرخ سرمایش موجب افزایش سختی آلیاژ شده است. این مسئله را می‌توان ناشی از کاهش اندازه اجزای ریزساختاری با افزایش نرخ سرمایش دانست.
- ۵- سختی نمونه‌های تولید شده بسیار بیشتر از سختی آلیاژهای آلومینیم ریختگی استاندارد است و تقریباً در محدوده سختی آلیاژ کار شده ۷۰۵۵ است. همچنین سختی آلیاژهای تولید شده قابل مقایسه با سختی برخی از آلیاژهای تیتانیومی مانند Ti-3Al-5Mo است.

## مراجع

- [1] Zhang W. and Xu J., Advanced lightweight materials for Automobiles: A review, *Materials Design*, 2022, 221, 110994.
- [2] Emadi P., Andilab B. and Ravindran C., Engineering lightweight Aluminum and Magnesium alloys for a sustainable future, *Journal of Indian Institute of Science*, 2022, 102, 405-420.
- [3] Siengchin S., A review on lightweight materials for defense applications: Present and future developments, *Defense Technology*, 2023, 24, 1-17.
- [4] Buling A. and Zerrer J., Unknown tribological possibilities - Wear resistance for light metals by PEO, hybrid, and laser functionalized surface solutions, *Wear*, 2023, 523, 204825.
- [5] Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H. and Chang S. Y., Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6, 299-303.
- [6] Miracle D. B. and Senkov O. N., A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta Materialia*, 2017, 122, 448-511.
- [7] Yeh J. W., Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys, *JOM*, 2013, 65, 1759-1771.
- [8] Edalati P., Mohammadi A., Ketabchi M. and Edalati K., Ultrahigh hardness in nanostructured dual-phase high-entropy alloy AlCrFeCoNiNb developed by high-pressure torsion, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 884, 161101.

- Al-Ni alloys, Journal of Physics: Conference Series, 2011, 327, 012010.
- [30] Chen R., Shi Y., Xu Q. and Liu B., Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24, 1645–1652.
- [31] Tabor D., The physical meaning of indentation and scratch hardness, British Journal of Applied Physics, 1956, 7, 159–166.
- mechanical properties of  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Sn$  and their solid solutions, Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845, 156205.
- [27] Zhu X., Liu F., Wang S. and Ji S., The development of low-temperature heat-treatable high-pressure die-cast Al-Mg-Fe-Mn alloys with Zn, Journal of Materials Science, 2021, 56, 11083–11097.
- [28] Sun W., Huang X. and Luo A. A., Phase formations in low density high entropy alloys, Calphad, 2017, 56, 19–28.
- [29] Ilbagi A., Delshad Khatibi P., Henein H., Lengsdorf R. and Herlach D. M., Effect of cooling rate on solidification of



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Synthesis and Characterization of Lightweight $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$ Entropic Alloy

Yeganeh Baniasadi<sup>1</sup>, Mohammad Amin Jabbareh<sup>2\*</sup>, Mohammad Hassan Daneshifar<sup>3</sup>

1. MSc, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

\* Corresponding author: [m.jabbareh@hsu.ac.ir](mailto:m.jabbareh@hsu.ac.ir)

#### Paper history:

Received: 28 September 2023  
Accepted: 09 November 2023

#### Keywords:

Medium entropy alloy,  
Lightweight alloy,  
Microstructure,  
Hardness.

#### Abstract:

Entropic lightweight alloys are a category of lightweight alloys that have recently gained attention. The main characteristic of these alloys is their high hardness compared to standard lightweight alloys. In this study, a new entropic alloy with  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  (in atomic percentage) composition was produced and characterized. The alloy was synthesized in an induction furnace. The casting process was performed in three molds including preheated mold, non-preheated mold, and water-cooled mold. The results showed that the microstructure of the alloy consists of a high volume fraction of intermetallic compounds  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ,  $Mg_2Sn$ ,  $Al_6Mn$ , and  $Al_4Mn$ , along with a solid solution of Al. Approximately 50% of the volume fraction in all three samples consists of a eutectic structure of  $Al/Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ . After the eutectic structure, the phases of pre-eutectic  $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ,  $Mg_2Sn$ , and intermetallic Al-Mn compounds have the highest volume fraction in the microstructure respectively. Increasing the cooling rate results in a reduction in the size of the phases. The hardness values for the samples frozen in preheated mold, non-preheated mold, and water-cooled mold were measured as 199.17, 227.14, and 237.63 Vickers, respectively, which is much higher than the hardness of standard cast aluminum alloys.

#### Please cite this article using:

Yeganeh Baniasadi, Mohammad Amin Jabbareh, Mohammad Hassan Daneshifar, Synthesis and Characterization of Lightweight  $Al_{35}Mg_{35}Mn_2Sn_8Zn_{20}$  Entropic Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2023, 7(1) 25-34.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.418420.1186

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)