

# اثر کاهش اندازه دانه بر خواص مکانیکی آلیاژ Al-0.7Fe با افزودن سدیم مولیبدات به مذاب

مصطفی علیزاده\* و محسن حاجی‌زمانی

گروه فلزات پژوهشگاه مواد، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۰۷/۲۰)

**چکیده** - سدیم مولیبدات ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ) به عنوان ماده‌ای برای اصلاح اندازه دانه در آلیاژ Al-0.7Fe استفاده شد. نمونه‌های Al-Fe با افزودن درصد‌های وزنی مختلفی از سدیم مولیبدات شامل ۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ۴/۰ و ۵/۰ به وسیله ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای در  $750^\circ\text{C}$  تولید شدند. بررسی ریزساختارهای حاصل از ریخته‌گری، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتوی ایکس و اثر بر ریزساختار توسط سدیم مولیبدات، با اندازه‌گیری متوسط اندازه دانه و پهنای ترکیب بین‌فلزی تشکیل شده و انجام آزمون‌های کشش و سختی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزودن سدیم مولیبدات، اصلاح ریزساختار با کاهش متوسط اندازه دانه صورت پذیرفت. هم‌چنین، مقدار بهینه برای افزودن سدیم مولیبدات به مذاب در این پژوهش معادل ۳/۰ درصد وزنی بود.

**واژگان کلیدی:** اصلاح اندازه دانه، سدیم مولیبدات، آلیاژ آلومینیوم-آهن، ترکیب بین‌فلزی

## Effect of Grain Size Reduction by Sodium Molybdate on Mechanical Properties of Al-0.7Fe Alloy

M. Alizadeh<sup>1\*</sup> and M. Hajizamani<sup>2</sup>

Department of Metals, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences,  
Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mostafa\_alizadeh56@yahoo.com

**Abstract:** Sodium molybdate ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ) as a grain refiner was used to refine the microstructure of Al-0.7Fe alloy. Al-Fe samples with the addition of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 wt.% sodium molybdate were fabricated by casting in sand molds at 750 °C. The microstructures of the as-cast samples were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and the present phases were revealed by X-ray diffraction (XRD). The effect of sodium molybdate on the microstructure was examined by measuring the average grain sizes of the alloys, determining the widths of intermetallic compounds and carrying out hardness and tensile tests. The results showed that the addition of sodium molybdate modified the microstructure of Al-Fe alloy by reducing the average grain sizes. Also, it was found that the optimum amount of sodium molybdate to add to Al-0.7Fe alloy melt was 0.3 wt.% in this study.

**Keywords:** Grain size reduction, Sodium molybdate, Aluminum-Iron alloy, Intermetallic compound

## ۱- مقدمه

کم تر باشد خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم و کششی به طور محسوسی افزایش می یابد. دانه های ریز باعث ایجاد ویژگی هایی در ماده می شوند که از جمله می توان به مواردی مانند خواص مکانیکی بهبود یافته، افزایش مقاومت به خوردگی، توزیع فازهای ثانویه در مقیاسی کوچک، ترک خوردن کم تر شمش، مقاومت بهتر در برابر ترک گرم و افزایش قابلیت ماشین کاری اشاره کرد [۶، ۷]. برای دستیابی به دانه بندی ریز می توان از روش های مختلفی مانند نرخ سرد کردن سریع، جوانه زایی ناهمگن، افزودن ماده حل شونده و به هم زدن مذاب استفاده نمود. به دلیل سادگی و بازدهی خوب، استفاده هم زمان از افزودن ماده حل شونده و جوانه زایی ناهمگن بطور معمول در صنایع مورد استفاده قرار می گیرد [۸].

پژوهشگران بسیاری بر اصلاح آلیاژهای Al-Fe از طریق تغییر اندازه و مورفولوژی ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Fe}$  با استفاده از روش هایی مانند انجماد سریع [۹-۱۲]، انجماد یک جهته [۱۳] و افزودن آمیزانها [۱۴] تمرکز نموده اند، اما گزارشی مبنی بر اصلاح این نوع آلیاژ با استفاده از یک جوانه زای در دست نیست.

مطابق گزارش برخی مقاله ها، سدیم باعث کاهش اندازه دانه [۱۵] و مولیبدن باعث جلوگیری از رشد دانه می شوند [۱۶]. بنابراین این امکان وجود دارد که بتوان ترکیب هایی را که از سدیم و مولیبدن تشکیل شده اند برای اصلاح اندازه دانه به کار برد. سدیم مولیبدات، ترکیبی غیرسمی و دوستدار محیط زیست است که بیش تر به عنوان ممانعت کننده از خوردگی آلومینیوم استفاده می شود [۱۷، ۱۸]. به دلیل قیمت کم و امکان استفاده از

امروزه آلیاژهای پایه آلومینیوم کاربردهای روزافزونی در صنایع مدرن دارند. بنابراین، بهبود خواص این مواد همواره یکی از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران بوده است. یکی از این آلیاژها، Al-Fe است که مطابق آنچه سیلوا و همکاران [۱] مرور کرده اند، کاربردهای مختلفی از جمله بسته بندی، ورق های ساختمانی و لیتوگرافی پیدا کرده است. به علاوه، به دلیل وجود ترکیبات بین فلزی در این آلیاژ و بالا بودن دمای ذوب این ترکیبات، می توان در کاربردهای سازه ای با دمای بالا از این آلیاژ استفاده نمود [۲]. آهن یکی از ناخالصی های عمده در آلیاژهای پایه آلومینیومی است. غلظت این عنصر ممکن است قابل توجه باشد و به مقدار ۱ درصد وزنی برسد. از آنجا که آهن حلالیت جامد بسیار کمی در آلومینیوم دارد (بیشینه ۰/۰۵ درصد وزنی در تعادل)، کل آهن موجود، معمولاً تشکیل ترکیب بین فلزی از نوع Al-Fe می دهد [۳، ۴].

ریزساختار و اندازه ترکیبات بین فلزی در آلیاژهای Al-Fe، بر خواص نهایی نظیر قابلیت شکل پذیری، که غالباً وابسته به اندازه و توزیع ترکیب بین فلزی است، اثرگذار است، زیرا ذرات درشت  $\text{Al}_3\text{Fe}$  دارای تمایل به ترک خوردن هستند و ایجاد ترک از قابلیت شکل پذیری و مقاومت به خستگی می کاهد [۵]. از دیگر سو، اندازه دانه نیز به عنوان یک عامل عمده موثر بر خواص مواد مطرح است. مطابق با رابطه هال-پچ،  $t_y = t_i + kd^{-1/2}$ ، که  $t_y$  تنش تسلیم،  $t_i$  یک ثابت ماده بیانگر تنش ابتدایی به منظور حرکت نابجایی و  $k$  ضریب استحکام دهی است، هر چه اندازه دانه

مقادیر بسیار کم این ماده برای اصلاح اندازه دانه و ریزساختار، سدیم مولیبدات می‌تواند یک گزینه اقتصادی در مقایسه با آمیزان‌های مرسوم باشد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان اصلاح اندازه دانه و ریزساختار آلیاژ Al-0.7Fe با استفاده از مقادیر مختلف سدیم مولیبدات ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ )، برای یافتن مقدار بهینه برای افزودن به مذاب و نیز بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای اصلاح شده شامل استحکام تسلیم و کششی، ازدیاد طول و سختی برای مقایسه آلیاژ اصلاح نشده است.

## ۲- مواد و روش پژوهش

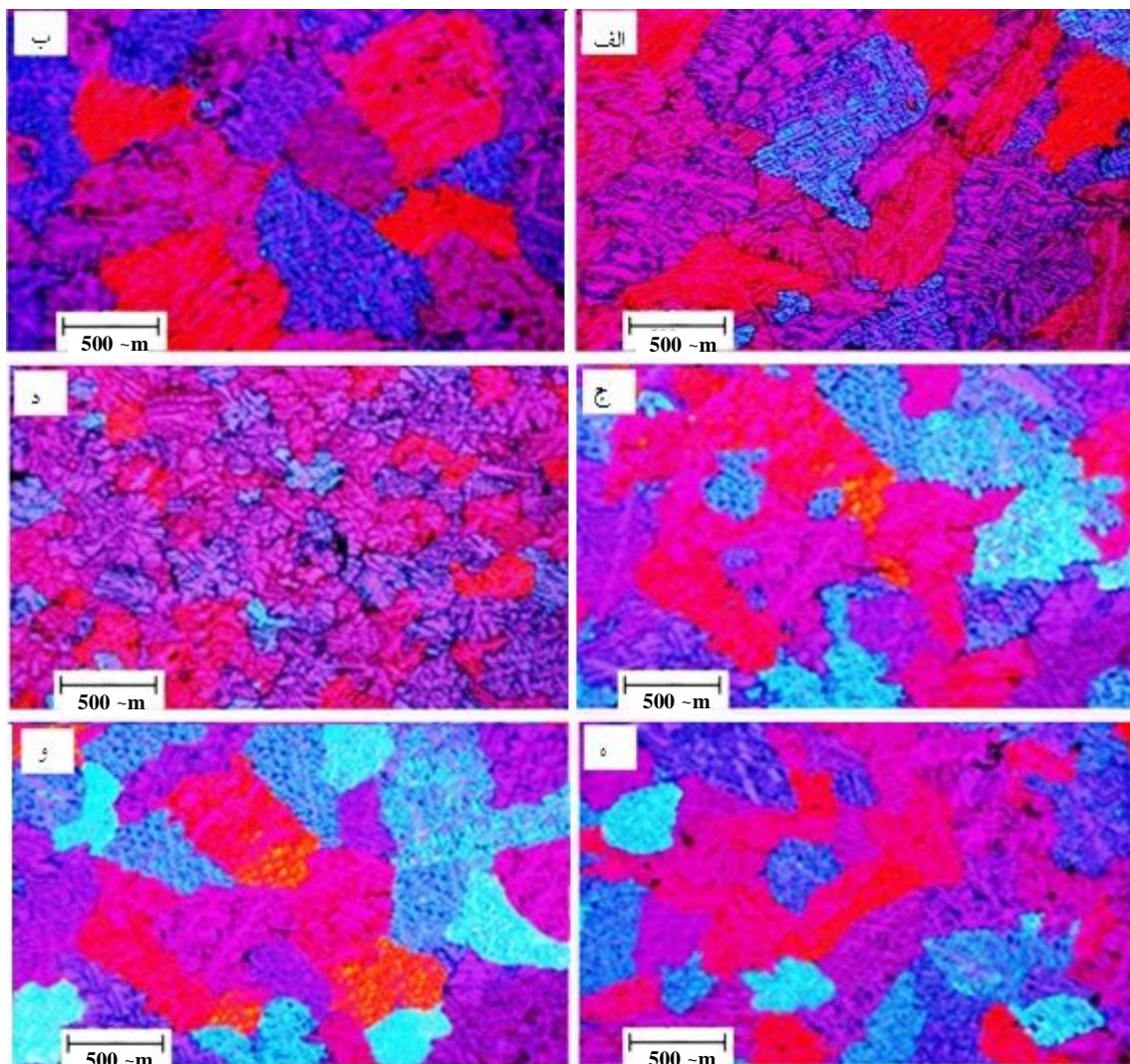
آلیاژ اولیه Al-0.7Fe در یک کوره مقاومت الکتریکی با ذوب مجدد و رقیق‌سازی آلیاژ Al-1.8Fe با آلیاژ تجاری خالص آلومینیوم (Al-0.15Fe) و ریخته‌گری به شکل شمش آماده شد. آلیاژ Al-0.7Fe در یک کوره مقاومت الکتریکی در یک بوتله از جنس کاربید سیلیسیم ذوب شد. پودر سدیم مولیبدات با اندازه متوسط حدود  $5\ \mu\text{m}$  به وسیله فویل آلومینیومی در دمای  $750^\circ\text{C}$  درون کوره به مذاب اضافه و هم‌زمان به مدت کوتاهی (حدود ۱۰ ثانیه) به هم زده شد. مذاب به مدت ۵ دقیقه [۱۹] در دمای  $750^\circ\text{C}$  درون کوره پس از افزوده شدن سدیم مولیبدات نگه داشته شد و سپس درون قالب ماسه‌ای در همان دما ریخته شد. برای مشاهده ریزساختار، متالوگرافی انجام شد. نمونه‌های پولیش شده توسط محلول ۵٪ درصد حجمی HF در آب حکاکی شدند. هم‌چنین، در تصاویر میکروسکوپ نوری نشان‌دهنده تخلخل، از محلول ۳۰٪ درصد حجمی NaOH در آب برای حکاکی استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری مجهز به سیستم تحلیل تصویر (Clemex Vision Pro. Ver.3.5.025) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-Philips XL30) مجهز به طیف‌سنج پراکنش گر انرژی (EDS) انجام شد. متوسط اندازه دانه نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM E-112 اندازه‌گیری شد. نوار

خطای موجود در نمودارهای مربوط به اندازه دانه و پهنای متوسط ترکیب بین‌فلزی، بیانگر انحراف معیار از مقدار میانگین اندازه‌گیری شده برای ۲۵ بار اندازه‌گیری و در نمودار سختی مربوط به ۵ بار تکرار آزمون است. در اندازه‌گیری پهنای ترکیب بین‌فلزی سعی شد از قسمت‌های مختلف این ترکیبات استفاده شود تا میانگین واقعی تر باشد. فازهای موجود نیز توسط روش پراش پرتوی ایکس (XRD) مشخص شدند. آزمون کشش در دمای اتاق (INSTRON 5586 testing machine) مطابق با استاندارد ASTM-B557 و ۳ بار تکرار برای هر نمونه صورت گرفت. با استفاده از روش ویکرز، سختی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E10 با استفاده از دستگاه Eseyaw ثبت شد.

## ۳- نتایج و بحث

شکل ۱ ساختار دانه آلیاژهای Al-0.7Fe اصلاح نشده و اصلاح شده توسط سدیم مولیبدات را نشان می‌دهد. واضح است که افزودن سدیم مولیبدات منجر به کاهش شدید اندازه دانه به‌ویژه با افزودن ۲٪ و ۳٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات شده است. هم‌چنین، تعداد دانه‌های بزرگ در آلیاژهای اصلاح شده کاهش یافته است و به‌طور مشخص در آلیاژ اصلاح شده با ۳٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات، بیش‌تر دانه‌ها هم‌محور شده‌اند (شکل ۱- ج).

شکل ۲، تغییرات اندازه دانه آلیاژهای Al-0.7Fe را با تغییر مقدار سدیم مولیبدات نشان می‌دهد. اندازه متوسط دانه آلیاژ اصلاح نشده حدود  $685\ \mu\text{m}$  است. پس از افزودن ۱٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات، اندازه متوسط دانه به یکباره به  $483\ \mu\text{m}$  کاهش یافت. با افزایش مقدار سدیم مولیبدات به ۳٪ درصد وزنی، اندازه متوسط دانه به  $360\ \mu\text{m}$  رسید. اما با افزودن بیش از ۳٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات، افزایش اندازه متوسط دانه آغاز شد. بنابراین، در مورد آلیاژ Al-0.7Fe مقدار بهینه افزودن سدیم مولیبدات ۳٪ درصد وزنی برای کاهش اندازه دانه است و بیش از این مقدار منجر به خشن شدن ساختار دانه می‌شود.

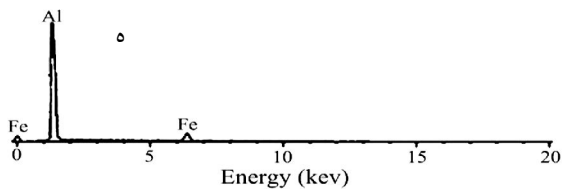
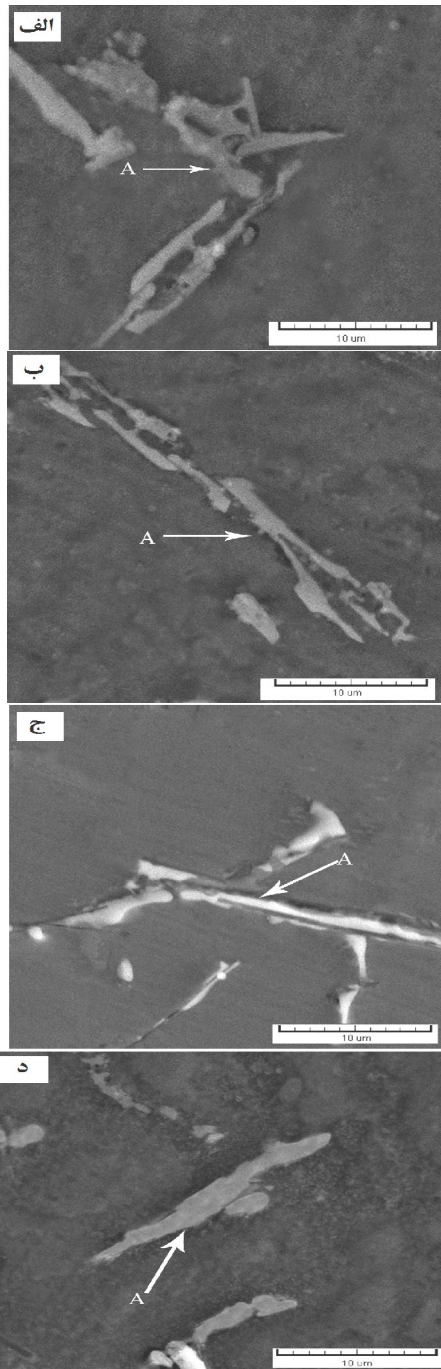


شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار دانه آلیاژ  $Al-0.7Fe$  (الف) آلیاژ اصلاح نشده، و آلیاژ اصلاح شده توسط افزودن سدیم مولیبدات به میزان ب) ۱ درصد وزنی، ج) ۲ درصد وزنی، د) ۳ درصد وزنی، ه) ۴ درصد وزنی و و) ۵ درصد وزنی

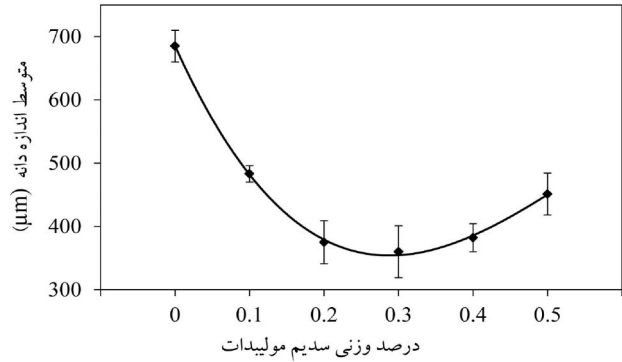
ریزکنندگی در مقادیر بیش از ۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات ممکن است به دلیل کوتاه بودن زمان به هم زدن مذاب در هنگام افزوده شدن این ترکیب به مذاب باشد به طوری که احتمالاً مقادیری از این ترکیب در سطح مذاب باقی مانده، به سرباره پیوسته است. این احتمال در هنگام افزایش مقدار سدیم مولیبدات افزایش می یابد. در نتیجه در مقادیر بالاتر، به دلیل شرایط ریخته گری و هدر رفتن ماده، توانایی سدیم مولیبدات در ریزکنندگی کاهش یافته است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آلیاژهای اصلاح

دلیل عمده ریزشدن دانه، افزایش مکان های جوانه زایی مذاب با افزوده شدن سدیم مولیبدات است هر چند تشخیص ترکیب این مکان ها دشوار است. به علاوه، این ترکیب از سدیم و مولیبدن تشکیل شده است. مطابق آنچه کری و همکاران [۲۰] مرور کرده اند سدیم یک اصلاح کننده خوب محسوب می شود. همچنین مطابق گزارش دیاز و همکاران [۱۶]، مولیبدن به عنوان یک ممانعت کننده از رشد دانه استفاده می شود. در نمونه های دارای ۴ و ۵ درصد وزنی سدیم مولیبدات، نه تنها ریزکنندگی دانه مشاهده نشد بلکه رشد دانه آغاز شد. کاهش اثر



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آلیاژ Al-0.7Fe: الف) آلیاژ اصلاح نشده، و آلیاژ اصلاح شده توسط افزودن سدیم مولیبدات به میزان ب) ۰/۱ درصد وزنی، ج) ۰/۳ درصد وزنی، د) ۰/۵ درصد وزنی و ه) طیف EDS نقاط نشان داده شده با A در تصاویر SEM



شکل ۲- تغییرات اندازه متوسط دانه با میزان سدیم مولیبدات افزوده شده به آلیاژ Al-0.7Fe

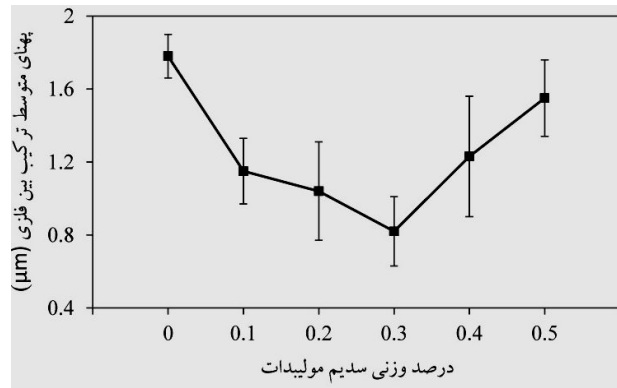
نشده و اصلاح شده در شکل ۳ ارائه شده است. تمرکز بر شکل و پهنای ترکیبات بین فلزی نشان داده شده مشخص می‌کند که اگرچه همه این ترکیبات سوزنی شکل و دارای یک ترکیب هستند اما پهنای این ترکیبات مطابق شکل ۴ یکسان نیست.

از پهنای اندازه‌گیری شده ترکیبات بین فلزی آلیاژها از شکل ۴ برای آلیاژهای اصلاح نشده و دارای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سدیم مولیبدات، به علاوه تصاویر میکروسکوپ نوری برای آلیاژهای دارای ۰/۲ و ۰/۴ درصد وزنی سدیم مولیبدات، می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن سدیم مولیبدات، پهنای متوسط ترکیب  $Al_3Fe$  از مقدار  $1/8 \mu m$  در آلیاژ اصلاح نشده به مقدار  $0/8 \mu m$  در آلیاژ اصلاح شده توسط ۰/۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات کاهش یافت. اما پهنای متوسط در آلیاژ اصلاح شده با ۰/۵ درصد وزنی سدیم مولیبدات، به مقدار  $1/5 \mu m$  افزایش یافت که نشان می‌دهد، اصلاح ترکیبات بین فلزی نیز مانند اصلاح اندازه دانه در غلظت‌های کم رخ می‌دهد. به‌طور خلاصه، افزودن سدیم مولیبدات تا ۰/۳ درصد وزنی ایجاد ترکیبات بین فلزی کمی نازک‌تر می‌کند و مقادیر بیش‌تر آن اثر پهن‌کنندگی دارد. مطابق آنچه راتود و همکاران [۱۵] مرور کرده‌اند، با توجه به مکانیزم اثر سدیم در آلیاژهای Al-Si، مکانیزم اثر سدیم مولیبدات تحت تاثیر وجود سدیم در این ترکیب به این علت است که سدیم باعث کاهش دمای یوتکتیک می‌شود. به همین دلیل، نرخ جوانه‌زایی در شرایط تحت تبرید شده حاصل، بیش‌تر می‌شود و

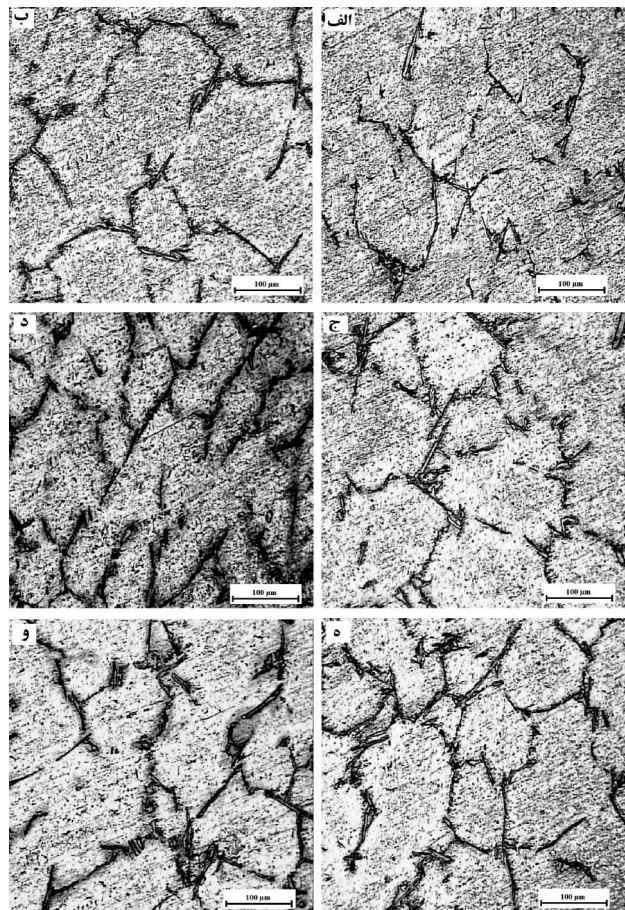
ترکیب به دست آمده نازک تر و نیز از ترکیب یوتکتیک دورتر می شود. به همین دلیل است که در آلیاژ اصلاح نشده، ترکیبات بین فلزی یعنی سوزن واره های  $Al_3Fe$  نزدیک به یکدیگر واقع شده اند ولی در آلیاژهای اصلاح شده، توزیع بهتری از ترکیب  $Al_3Fe$  در مقایسه با آلیاژ اصلاح نشده موجود است که باعث بهبود خواص مکانیکی می شود. توزیع بهتر ترکیب بین فلزی توسط تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل ۵ نیز تأیید می شود. توضیح آن که زمینه روشن، آلومینیوم و تیغه های به رنگ تیره ترکیب بین فلزی  $Al_3Fe$  است. دلیل از دست رفتن خاصیت کاهش پهنای ترکیب بین فلزی در مقادیر بالاتر سدیم مولیدات همانند مورد ریزکنندگی دانه، شرایط ریخته گری و هدر رفتن ماده به دلیل کم بودن زمان هم زده شدن مذاب است. در مجموع، افزودن سدیم مولیدات تا ۰/۳ درصد وزنی، تاثیر کمی بر لاغر شدن ترکیب بین فلزی داشته است، در نتیجه اثر آن در اصلاح ترکیب بین فلزی بسیار اندک بوده است.

الگوهای پراش پرتوی ایکس چهار آلیاژ شکل ۳ که در شکل ۶ ارائه شده ثابت می کند که ترکیبات بین فلزی از نوع  $Al_3Fe$  هستند و افزودن سدیم مولیدات هیچ تاثیری بر تغییر ترکیب فاز بین فلزی تشکیل شده نداشته است. مطابق آنچه عزیزاده و همکاران [۲۱] مرور کرده اند نرخ سرمایش در قالب ماسه ای از  $1 K s^{-1}$  تجاوز نمی کند و در نتیجه فاز عمده همان  $Al_3Fe$  است. نرخ سرمایش  $1-10 K s^{-1}$  تشکیل  $Al_3Fe$  را متوقف می کند و به جای آن معمولاً  $Al_6Fe$  و  $Al_xFe$  در ریزساختار مشاهده می شود. افزایش بیش تر نرخ سرمایش بالاتر از  $10 K s^{-1}$  منجر به تشکیل  $Al_mFe$  به عنوان ترکیب بین فلزی غالب در ریزساختار می شود. مشاهده نشدن ترکیباتی از سدیم و مولیدات در الگوهای XRD به دلیل آن است که مقدار ترکیب سدیم مولیدات در این پژوهش بسیار کم بوده است. نتایج XRD همراه با نتیجه طیف EDS در شکل ۳- د نشان می دهد که ترکیبات بین فلزی موجود در تصاویر SEM از Al و Fe تشکیل شده است.

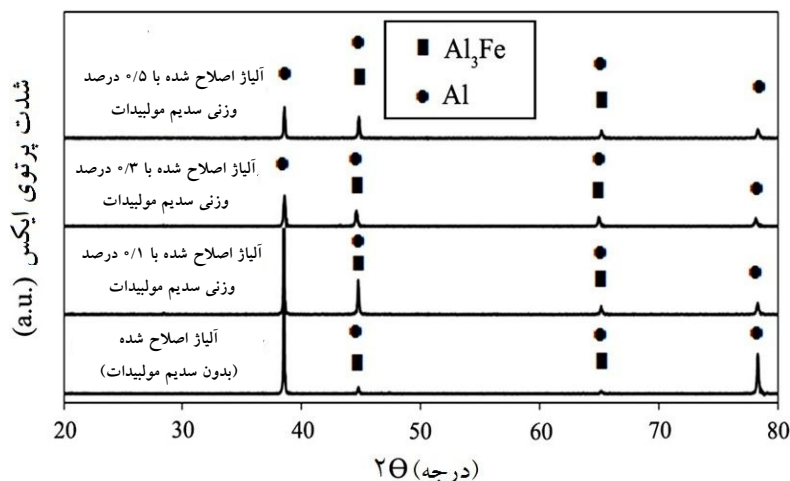
شکل ۷، نتایج آزمون کشش اجرا شده روی آلیاژهای



شکل ۴- تغییرات پهنای متوسط ترکیب بین فلزی با میزان سدیم مولیدات افزوده شده به آلیاژ  $Al-0.7Fe$



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ  $Al-0.7Fe$ : (الف) آلیاژ اصلاح نشده، و آلیاژ اصلاح شده توسط افزودن سدیم مولیدات به میزان (ب) ۰/۱ درصد وزنی، (ج) ۰/۲ درصد وزنی، (د) ۰/۳ درصد وزنی، (ه) ۰/۴ درصد وزنی و (و) ۰/۵ درصد وزنی (زمینه روشن آلومینیوم و تیغه های به رنگ تیره ترکیب بین فلزی  $Al_3Fe$  هستند).

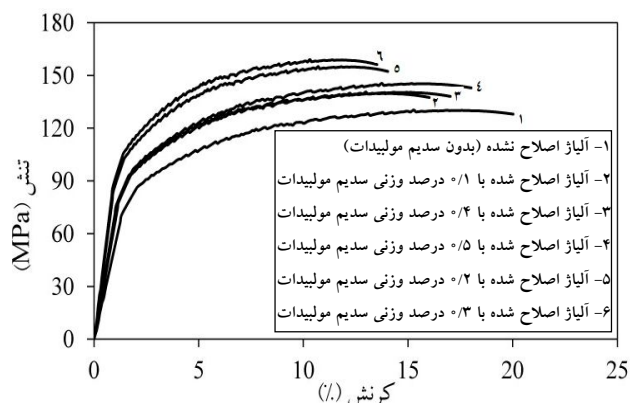


شکل ۶- الگوهای پراش پرتوی ایکس (XRD) نمونه‌های آلیاژی نشان داده شده در شکل ۳

جدول ۱- نتایج آزمون کشش انجام شده بر آلیاژهای اصلاح نشده و اصلاح شده

نمونه	استحکام کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول
Al-0.7Fe	۱۳۰/۱	۲۰/۱
Al-0.7Fe + 0.1 wt.% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	۱۳۹/۷	۱۶/۲
Al-0.7Fe + 0.2 wt.% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	۱۵۴/۹	۱۴/۴
Al-0.7Fe + 0.3 wt.% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	۱۵۸/۸	۱۳/۵
Al-0.7Fe + 0.4 wt.% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	۱۴۰/۴	۱۷/۱
Al-0.7Fe + 0.5 wt.% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	۱۴۵/۳	۱۸/۳

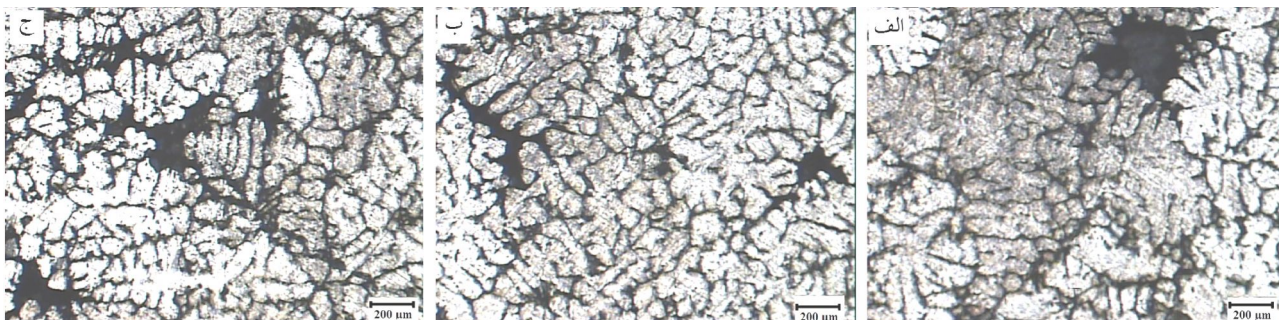
از آلیاژ اصلاح نشده است. این موضوع، اثر مثبت استفاده از سدیم مولیبدات را به طور کلی نشان می‌دهد. بهترین نتیجه مربوط به آلیاژ اصلاح شده توسط ۰/۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات می‌شود، زیرا این آلیاژ دارای کمترین اندازه دانه (۳۶۰ μm) و ظریف‌ترین فاز بین‌فلزی Al<sub>3</sub>Fe (۰/۸ μm) است. نتایج بهتر برای استحکام کششی آلیاژهای اصلاح شده مطابق رابطه مشهور هال-پچ توجیه می‌شود. این رابطه بیان می‌کند که هرچه اندازه دانه کوچک‌تر باشد، استحکام تسلیم و کششی افزایش می‌یابد [۷، ۲۲]. از دیگر سو، مطابق تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل ۶، توزیع یکنواخت فاز بین‌فلزی دلیلی دیگر برای نتایج بهتر برای استحکام کششی در آلیاژ اصلاح شده توسط ۰/۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات است. اما ازدیاد طول یا انعطاف‌پذیری آلیاژ اصلاح نشده بهتر از آلیاژهای



شکل ۷- نمودار تنش- کرنش آلیاژ Al-0.7Fe اصلاح نشده و

آلیاژهای اصلاح شده توسط مقادیر مختلف سدیم مولیبدات

اصلاح نشده و اصلاح شده را نشان می‌دهد. مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول هر نمونه در جدول ۱ آورده شده است. واضح است که استحکام کششی آلیاژهای اصلاح شده بیش‌تر



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نوری: الف) آلیاژ اصلاح نشده، ب) آلیاژ اصلاح شده توسط ۵٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات و ج) آلیاژ اصلاح شده توسط ۳٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات

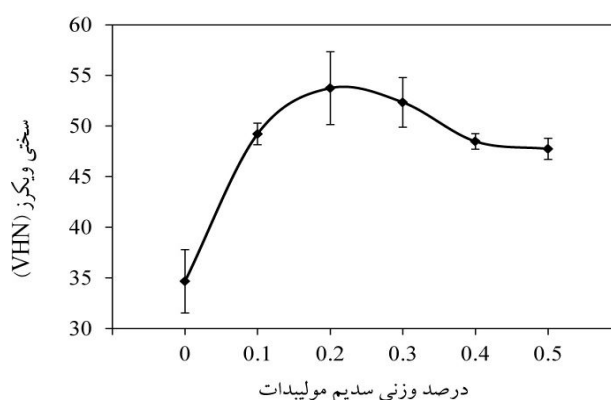
از آلیاژ اصلاح نشده است. دلیل عمده این موضوع، توزیع یکنواخت تر ترکیب بین فلزی  $Al_3Fe$  در آلیاژهای اصلاح شده است که تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل این موضوع را تایید می نماید. مقایسه نتایج استحکام در جدول ۱ با نتایج سختی نشان می دهد بالاترین استحکام در نمونه دارای ۳٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات اتفاق افتاده است در حالی که نمونه دارای ۲٪ درصد وزنی سدیم مولیبدات بالاترین سختی را دارد. این عدم تطابق نتایج به این دلیل است که همان طور که قبلا بیان شد پراکندگی و نوع تخلخل نمونه ها با یکدیگر متفاوت بوده است. بنابراین، احتمالاً پراکندگی و نوع تخلخل بر نتایج سختی اثرگذار بوده است هرچند تفاوت استحکام دو نمونه فقط در حدود ۴ MPa است.

#### ۴- نتیجه گیری

تاثیر استفاده از سدیم مولیبدات بر اصلاح ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ  $Al-0.7Fe$  بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- با استفاده از سدیم مولیبدات تا ۳٪ درصد وزنی، اندازه دانه آلیاژ کاهش یافت، اما با افزایش مقدار آن اثر ریزکنندگی سدیم مولیبدات متوقف و رشد دانه آغاز شد. با این حال، اندازه دانه هنوز هم از آلیاژ ریختگی بدون استفاده از سدیم مولیبدات کم تر بود.

- ۲- اثر افزودن سدیم مولیبدات بر ترکیب بین فلزی محسوس نبود و فاز بین فلزی  $Al_3Fe$  اندکی لاغرتر شد. لاغرترین فاز



شکل ۹- تغییرات سختی ویکرز با میزان سدیم مولیبدات افزوده شده

اصلاح شده است، زیرا غالباً استحکام و انعطاف پذیری ناسازگارند یعنی یک ماده مستحکم یا انعطاف پذیر است اما به ندرت هر دو ویژگی را هم زمان داراست [۲۳]. علت بهبود نیافتن همزمان انعطاف پذیری را می توان به افزایش میزان تغییر نحوه توزیع تخلخل در نمونه های اصلاح شده با سدیم مولیبدات نسبت داد. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است در نمونه اولیه تعداد تخلخل کم تر اما بزرگ تری نسبت به آلیاژ اصلاح شده با سدیم مولیبدات دیده می شود اما در آلیاژهای اصلاح شده تعداد تخلخل بیش تر و عمدتاً در مرز دانه ها واقع شده اند که دلیل اصلی کاهش انعطاف پذیری است.

سختی آلیاژهای اصلاح شده و اصلاح نشده در شکل ۹ آمده است. نتایج نشان می دهد که سختی آلیاژهای اصلاح شده بالاتر



مذاب به دلیل توزیع یکنواخت ترکیب بین فلزی حاصل شد.  
۶- به طور کلی، بهترین نتایج در غلظت‌های کم سدیم مولیبدات مشاهده شد. این موضوع نشان داد که این ترکیب شیمیایی در غلظت‌های کم به ویژه کم‌تر از ۰/۳ درصد وزنی مؤثرتر است.

### قدردانی

نویسندگان این مقاله، سپاس و قدردانی خود را از حمایت‌های انجام شده توسط پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی و دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان ابراز می‌دارند.

با افزودن ۰/۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات مشاهده شد. بنابراین می‌توان گفت که افزودن این ماده باعث اصلاح چشم‌گیر ریزساختار از نظر ترکیب بین فلزی نمی‌شود.  
۳- افزودن سدیم مولیبدات، باعث افزایش استحکام کششی شد و بالاترین استحکام در آلیاژ اصلاح شده با ۰/۳ درصد وزنی سدیم مولیبدات دیده شد.

۴- با افزودن سدیم مولیبدات، استحکام کششی همه نمونه‌ها نسبت به آلیاژ اولیه افزایش یافت اما انعطاف‌پذیری همه نمونه‌ها کاهش نشان داد هرچند بعد از افزودن ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی سدیم مولیبدات، انعطاف‌پذیری بهتر شد.  
۵- آلیاژهای اصلاح شده از سختی بالاتری برخوردار بودند. بالاترین سختی با افزودن ۰/۲ درصد وزنی سدیم مولیبدات به

### مراجع:

- Allen, C.M., Kumar, S., Carrol, L., O'Reilly, K.A.Q. and Cama, H., "Electron Beam Surface Melting of Model 1200 Al Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 604, pp. 304-306, 2001.
- Mukhopadhyay, D.K., Suryanarayana, C. and Froes, F.H., "Structural Evolution in Mechanically Alloyed Al-Fe Powders", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 26A, pp. 1939-1946, 1995.
- Bendersky, L.A., Mcalister, A.J. and Biancaniello, F.B., "Phase Transformation during Annealing of Rapidly Solidified Al-rich Al-Fe-Si Alloys", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19A, pp. 2893-2900, 1998.
- Skjerpe, P., "Intermetallic Phases Formed during DC-Casting of an Al-0.25WtPct Fe-0.13WtPct Si Alloy", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 18A, pp. 189-200, 1987.
- Goulart, P.R., Lazarine, V.B., Spinelli, J.E., Leal, C.V., Cheung, N. and Garcia, A., "Investigation of Intermetallics in Hypoeutectic Al-Fe Alloys by Dissolution of the Al Matrix", *Intermetallics*, Vol. 17, pp. 753-761, 2009.
- Bian, X.F., Pan, X.M., Zhao, C. and Yuan, S.J., "Refinement of Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> in Al-Fe Alloys by Plasma Remelting Process", *Materials Science and Technology*, Vol. 17, pp. 917-920, 2001.
- Lu, L. and Dahle, A.K., "Effects of Combined Additions of Sr and AlTiB Grain Refiners in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 435-436, pp. 288-296, 2006.
- Chandrashekar, T., Muralidhara, M.K., Kashyap, K.T. and Raghothama R.P., "Effect of Growth Restricting Factor on Grain Refinement of Aluminum Alloys", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 234-241, 2009.
- Griger, A. and Stefaniay, V., "Equilibrium and Non-equilibrium Intermetallic Phases in Al-Fe and Al-Fe-Si Alloys", *Journal of Materials Science*, Vol. 31, pp. 6645-6652, 1996.
- Cotton, J.D. and Kaufman, M.J., "Microstructural Evolution in Rapidly Solidified Al-Fe Alloys: An Alternative Explanation", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 927-934, 1991.
- Zhang, Y.H., Liu, Y.C., Han, Y.J., Wei, C. and Gao, Z.M., "The Role of Cooling Rate in the Microstructure of Al-Fe-Si Alloy with High Fe and Si Contents", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 473, pp. 442-225, 2009.
- Hughes, I.R. and Jones, H., "Coupled Eutectic Growth in Al-Fe Alloys", *Journal of Materials Science*, Vol. 11, pp. 1781-1793, 1976.
- Sahoo, K.L., Das, S.K. and Murty, B.S., "Formation of Novel Microstructures in Conventionally Cast Al-Fe-V-Si Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 355, pp. 193-200, 2003.
- Emregul, K.C. and Aksut, A.A., "The Effect of Sodium Molybdate on the Pitting Corrosion of aluminum", *Corrosion Science*, Vol. 45, pp. 2415-2433, 2003.
- Rathod, N.R. and Manghani, J.V., "Effect of Modifier and Grain Refiner on Cast Al-7Si

- Aluminum Alloy: A review”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, Vol. 5, pp. 574-582, 2012.
16. Diaz, L.A., Valdes, A.F., Diaz, C., Espino, A.M. and Torrecillas, R., “Alumina/Molybdenum Nanocomposites Obtained in Organic Media”, *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 23, pp. 2829-2834, 2003.
  17. Li, X., Deng, S. and Fu, H., “Sodium Molybdate as a Corrosion Inhibitor for Aluminum in  $H_3PO_4$  solution”, *Corrosion Science*, Vol. 53, pp. 2748-2753, 2011.
  18. Liao, H., Sun, Y. and Sun, G., “Effect of Al-5Ti-1B on the Microstructure of Near-Eutectic Al-13.0%Si Alloys Modified with Sr”, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, pp. 3489-3495, 2002.
  19. Kim, Y.M., Wang, L. and You, B.S., “Grain Refinement of Mg–Al Cast Alloy by the Addition of Manganese Carbonate”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 490, pp. 695–699, 2010.
  20. Kori, S.A., Murty, B.S. and Chakraborty, M., “Development of an efficient Grain Refiner for Al-7Si Alloy and its Modification with Strontium”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 283, pp. 94-104, 2000.
  21. Alizadeh, M. and Karamouz, M., “Effect of Periodic Melt Shearing Process and Cooling Rate on Structure and Hardness of Al–0.7Fe Aluminum Alloy”, *Materials and Design*, vol. 55, pp. 204-211, 2014.
  22. Shanmugasundaram, T., Heilmaier, M., Murty, B.S. and Subramanya S.V., “On the Hall–Petch Relationship in a Nanostructured Al–Cu Alloy”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 7821-7825, 2010.
  23. Zhao, Y.H., Liao, X., Cheng, S., Ma, E. and Zhu, Y.T., “Simultaneously Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys”, *Advanced Materials*, Vol. 18, pp. 2280-2283, 2006.