

## بررسی تاثیر استرانسیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91

آریا افشارنادری<sup>۱</sup>، جعفر راثی زاده غنی<sup>۲</sup>، مهدی ملکان<sup>۳\*</sup> و مسعود امامی<sup>۴</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۷، ش.ص ۳۱-۴۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵)

### چکیده

در این پژوهش، ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 در شرایطی که به آن مقادیر مختلف عنصر استرانسیم (۰، ۰/۵، ۱ و ۵ درصد وزنی) افزوده شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار و خواص مکانیکی هر یک از آلیاژها، توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، دستگاه آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و دستگاه تست کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزودن استرانسیم، کسر حجمی فاز  $Mg_{17}Al_{12}$  در آلیاژ کاهش یافته است. همچنین با افزایش استرانسیم اندازه دانه‌ها بعد از عملیات حرارتی همگن‌سازی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. در این حالت اندازه دانه‌ها از ۱۳۱ میکرومتر در AZ91 بدون استرانسیم به ۴۳ میکرومتر در آلیاژ AZ91 همراه با ۱ درصد وزنی استرانسیم کاهش یافت. علاوه بر این مشاهده شد که بیش‌ترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در بین آلیاژهای مورد بررسی، در آلیاژ AZ91 به همراه ۱ درصد وزنی استرانسیم رخ می‌دهد. با افزایش استرانسیم از صفر تا یک درصد وزنی، استحکام کششی از ۱۲۹ MPa به ۱۷۷ MPa و میزان درصد ازدیاد طول از ۱/۱ به ۲ درصد، افزایش می‌یابد. همچنین بررسی سطح شکست نیز نشان داد که شکست در این آلیاژها به صورت کلیواژ (ترد) می‌باشد و با افزودن شدن استرانسیم تغییری در نوع سطح شکست به وجود نمی‌آید.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژ منیزیم AZ91، استرانسیم (Sr)، ریزساختار، خواص مکانیکی، اندازه دانه.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۴- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

\*- نویسنده مسئول مقاله: mmalekan@ut.ac.ir

## پیشگفتار

در سال‌های اخیر، تقاضا برای آلیاژهای منیزیم به دلیل وزن مخصوص پایین‌تر و در نتیجه مصرف سوخت کم‌تر، در صنایع خودروسازی به شدت افزایش یافته است. پیش‌بینی می‌شود که سالانه به طور متوسط ۱۵ درصد، میزان استفاده از آلیاژهای منیزیم در قطعات اتومبیل‌ها در سطح جهان افزایش یابد [۱]. در بین آلیاژهای منیزیم، آلیاژ AZ91 یکی از پرمصرف‌ترین آلیاژها در بین آلیاژهای تجاری است که شامل ۹ درصد وزنی آلومینیم، ۱ درصد وزنی روی و مقدار کمی منگنز است. با این وجود کاربرد آلیاژ منیزیم AZ91 به دلیل استحکام و خواص مکانیکی محدود آن کم است [۲].

یکی از روش‌های شناخته شده و مهم که به منظور بهبود خواص مکانیکی و افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای منیزیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از فرآیند ریزدانه‌سازی است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که افزودن استرانسیم، باعث ریزتر شدن دانه‌ها در سری آلیاژهای Mg-Al می‌شود. به طور مثال ژنگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۳] گزارش دادند که افزودن استرانسیم خالص به آلیاژ منیزیم AZ31، موجب تشکیل دانه‌های ریزتر در این آلیاژ شده و این امر موجب بهبود خواص مکانیکی در این آلیاژ می‌شود. همچنین چن<sup>۲</sup> و همکارانش [۴] اثر آمیزان Al-Sr را بر روی ریزساختار آلیاژ ریختگی AZ31 مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آن‌ها مشخص شد که با افزوده شدن آمیزان به آلیاژ، اندازه دانه‌ها ریزتر شده و در نتیجه خواص کششی آلیاژ بهبود یافته است. سرینیواسان<sup>۳</sup> و همکارانش [۵] و نیز نام<sup>۴</sup> و همکارانش [۶] گزارش دادند که افزودن آمیزان Al-۱۰Sr به آلیاژ منیزیم AZ91 که حاوی عنصر سیلیسیم نیز بود، با تشکیل دانه‌های ریزتر باعث بهبود ریزساختار در این آلیاژ می‌شود.

در شرایط انجماد تعادلی ریزساختار آلیاژ AZ91 شامل فاز محلول جامد  $\alpha$  به همراه رسوبات فاز  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) است؛ ولی در شرایط انجماد غیرتعادلی،

آلیاژی دارای ریزساختار دندریتی است که در آن فاز ترد  $\beta$  بین بازوهای دندریتی موجود است. علاوه بر ساختار دندریتی، ناهمگنی‌های دیگری نیز در ساختار نمونه‌های ریختگی مشاهده می‌شود که می‌تواند موجب تردی و کاهش شکل‌پذیری آلیاژ شود [۷، ۸]. مهم‌ترین پارامترها در هنگام فرآیند همگن‌سازی عبارتند از: دمای نگهداری، زمان نگهداری و نرخ سرد شدن نمونه تا دمای اتاق. به عنوان مثال افزایش زمان نگهداری نمونه‌ها در داخل کوره، موجب افزایش استحکام کششی و کاهش داکتیلیتی نمونه‌ها می‌شود [۹].

یاکوبتسو<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۰] تاثیر عملیات حرارتی را بر روی خواص کششی آلیاژ AZ80 در دمای اتاق مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که حل شدن رسوبات فاز  $\beta$ ، موجب افزایش داکتیلیتی در دمای اتاق می‌شود.

در این پژوهش به بررسی تاثیر استرانسیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 که در قالب فلزی ریخته شده، پرداخته شده است. همچنین تاثیر عملیات حرارتی همگن‌سازی بر روی ریزساختار و اندازه دانه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق، آلیاژ منیزیم AZ91 است. برای تهیه این آلیاژ از شمش خالص تجاری منیزیم (با خلوص ۹۹/۹۷٪) و شمش آلومینیم خالص (با خلوص ۹۹/۹۵٪) استفاده شد. همچنین در این آلیاژ، روی به صورت  $Al-۰.۵Zn$ ، منگنز به صورت  $Al-۰.۱۸Mn$  و استرانسیم به صورت  $Al-۰.۱۰Sr$  به آلیاژ افزوده شدند. مواد مورد نیاز آلیاژ در داخل یک بوته گرافیتی ریخته و توسط یک کوره ذوب القایی الکتریکی ذوب شده و سپس تحت اتمسفر گاز محافظ متشکل از ۹۵ درصد گاز آرگون و ۵ درصد گاز  $SF_6$  قرار گرفت. سطح مذاب در اثر واکنش بین گاز  $SF_6$  با منیزیم و تشکیل لایه‌های محافظ نازک (protective films)، محافظت می‌گردد. این لایه‌ها از جنس منیزیم فلئورید و منیزیم سولفید هستند و چگالی آن‌ها از چگالی لایه نازکی که در اثر تماس مذاب با هوا ایجاد می‌شود، بیش‌تر

1- Zhang

2- Chen

2- Srinivasan

4- Nam

5- Yakubtsov

کشش شکسته شده مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان مکانیزم‌های شکست را در حین کشش مورد بررسی قرار داد. مشخصات سطح شکست نیز توسط دستگاه SEM مورد مطالعه قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### مشاهدات ریزساختاری

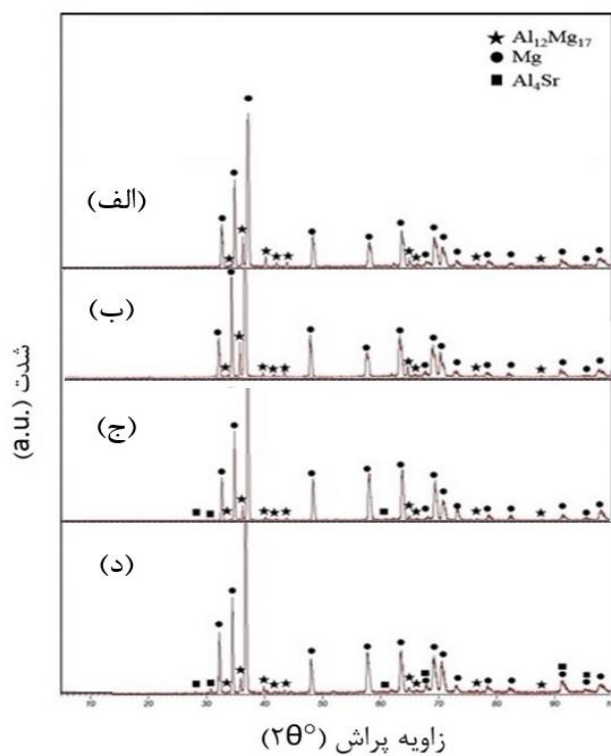
شکل ۱ نمودار پراش اشعه ایکس نمونه‌های AZ91 را همراه با مقادیر مختلف استرانسیم نشان می‌دهد. در حالت کلی، گزارش شده که آلیاژ AZ91 از دو فاز  $\alpha$ -Mg و  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> تشکیل شده است [۱۳]. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، دو فاز اصلی  $\alpha$ -Mg و  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> در تمام نمونه‌ها حضور دارند. علاوه بر این مشخص است که با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی استرانسیم فاز جدیدی در این آلیاژ تشکیل نشده است؛ اما زمانی که استرانسیم به میزان ۰/۵ و ۱ درصد وزنی به آلیاژ افزوده می‌شود، ترکیب بین‌فلزی Al<sub>4</sub>Sr در آلیاژ به وجود می‌آید.

شکل ۲- (الف-د) تصاویر ریزساختار نوری آلیاژ AZ91 به همراه مقادیر مختلف استرانسیم را نشان می‌دهد. در این تصاویر، فاز تیره‌رنگ  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> و فاز  $\alpha$ -Mg به رنگ روشن مشخص هستند که این موضوع مطابق با یافته‌های وانگ<sup>۱</sup> و همکارانش می‌باشد [۱۴]. با توجه به دیاگرام تعادلی دو فاز Mg-Al، فاز Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> زمانی در ساختار یوتکتیک تشکیل می‌شود که مقدار آلومینیم به ۱۳ درصد وزنی برسد. با این حال، این فاز یوتکتیک در شرایط سرد شدن غیرتعادلی حتی در آلیاژهایی که چیزی در حدود ۲ درصد وزنی آلومینیم دارند، نیز پدیدار می‌شود [۱۵].

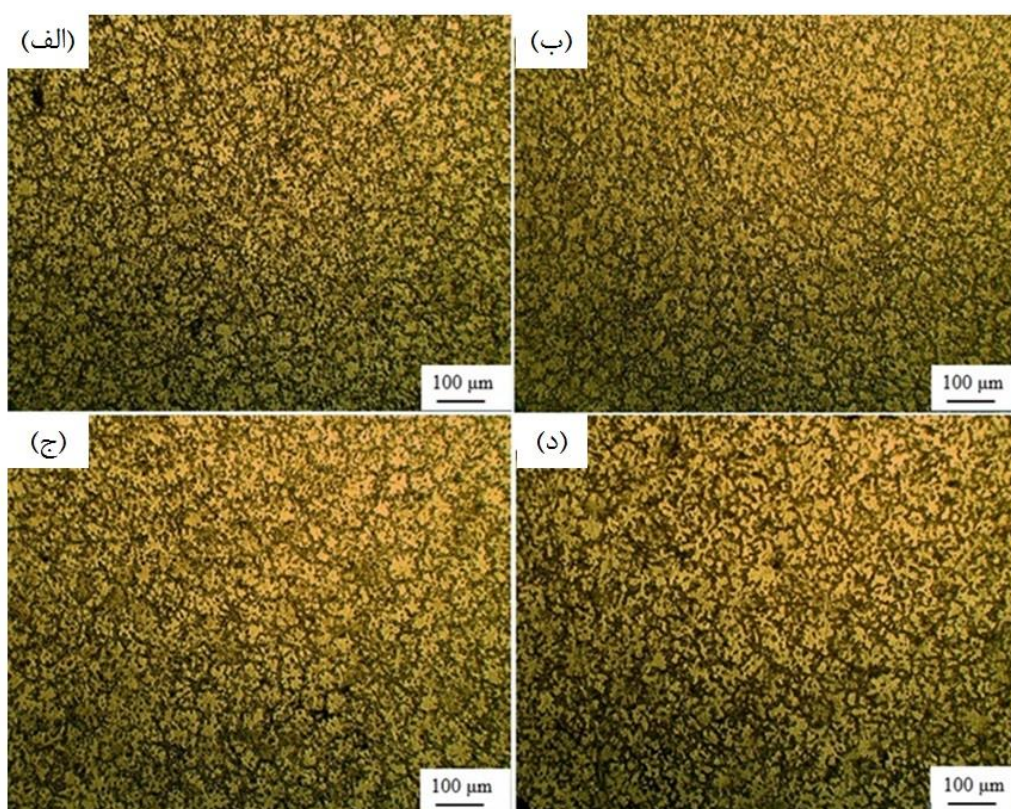
است. به همین دلیل از گاز آرگون به همراه SF<sub>6</sub> به عنوان گاز محافظ استفاده می‌شود [۱۱].

عنصر استرانسیم در انتها و زمانی که دمای مذاب به حدود ۷۵۰°C رسید، به مذاب اضافه شد. سپس مذاب به داخل یک قالب چدنی که تا دمای ۲۰۰°C پیش‌گرم شده بود، ریخته شد. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون و سوختن مذاب منیزیم، درون قالب به پودر مخصوص آغشته شد. درصد‌های مختلفی از عنصر استرانسیم (۰، ۰/۰۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) مورد استفاده قرار گرفت تا تاثیر آن‌ها بر روی آلیاژ AZ91 مورد بررسی قرار گیرد. پس از پایان ریخته‌گری، از هر یک از ذوب‌های ریخته شده، نمونه‌های متالوگرافی در ابعاد ۱cm × ۱cm × ۱cm تهیه شد. سپس هر یک از نمونه‌های تهیه شده با استفاده از ورقه‌های سنباده از شماره ۶۰ تا ۳۰۰۰ به روش تر سنباده زده شدند. سپس هر یک از نمونه‌ها با محلول آلومینای ۰/۰۵ میکرومتر پولیش شده و اچ شدند. محلول اچ مورد استفاده متشکل از ۵ میلی‌لیتر استیک اسید، ۵ میلی‌لیتر آب، ۱/۲ گرم پیکریک اسید و ۳۵ میلی‌لیتر اتانول می‌باشد. برای به‌دست آوردن اندازه دانه هر آلیاژ، در ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۷۰°C و سپس ۱۸ ساعت در دمای ۴۱۵°C، در معرض عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفتند [۱۲]. پس از آن نمونه‌ها در هوا کوئنچ شده و مشاهدات ریزساختاری مربوط به هر آلیاژ توسط میکروسکوپ نوری LEICA DRMX و با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری (Clemex Vision Pro. Ver. 3.5.025) مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این ریزساختار هر یک از نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به مدل Vega©Tescan SEM+ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تشخیص فازها با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) و به مدل PHILIPS binary diffractometer و توسط اشعه Cu-k $\alpha$  مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تست کشش مطابق با استاندارد B 557M-02a تهیه شد و نمونه‌های کشش توسط یک ماشین تست کشش کامپیوتری (SANTAM STM-20) با سرعت حرکت فک ثابت ۱mm/min، تحت کشش قرار گرفتند. مشخصات سطح شکست نیز بر روی نمونه‌های تست

<sup>۱</sup>-Wang



شکل ۱- تصویر پراش اشعه ایکس (XRD) از آلیاژهای (الف) AZ91 (ب) AZ91 + 0.5% Sr (ج) AZ91 + 1% Sr



شکل ۲- تصاویر ریزساختار نوری از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91 + 0.5% Sr (ج) AZ91 + 1% Sr (د) AZ91 + 1% Sr

که در شکل ۱ به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که نقطه B نشان‌دهنده فاز  $\alpha$ -Mg می‌باشد. همچنین آنالیز نقطه C از شکل ۵-د نشان می‌دهد که این فاز دارای  $\text{Sr}$  و  $65 \text{ at.}\% \text{ Mg}$ ،  $0.5 \text{ at.}\% \text{ Zn}$ ،  $28/34 \text{ at.}\% \text{ Al}$  و  $6/16 \text{ at.}\%$  می‌باشد. در این حالت به دلیل کوچک بودن این فاز، منیزیم موجود در زمینه نیز در آنالیز EDS به دست آمده است. در این حالت نسبت اتمی  $\text{Al}$  و  $\text{Sr}$  در نقطه C در حدود ۱:۴ است. با استفاده از این آنالیز و همچنین نتایج XRD که در شکل ۱ به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که نقطه C نشان‌دهنده فاز  $\text{Al}_4\text{Sr}$  می‌باشد. با افزوده شدن استرانسیم از ۰/۵ درصد به ۱ درصد وزنی، فاز  $\text{Al}_4\text{Sr}$  بزرگ‌تر شده و به صورت صفحات سوزنی شکل در می‌آید (شکل ۴-ج و د)). همچنین مشخص است که با افزایش استرانسیم، فاز  $\alpha$ -Mg درشت‌تر شده و مورفولوژی فاز  $\beta$ - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  تغییر می‌کند. مقدار فاز  $\beta$  که به صورت یک ترکیب بین‌فلزی شبکه مانند است، با افزایش مقدار استرانسیم به تدریج کاهش یافته است. میانگین اندازه دانه‌ها در آلیاژ AZ91 بدون استرانسیم برابر با ۱۳۱ میکرومتر است. این در حالی است که میانگین اندازه دانه در آلیاژ AZ91 که دارای ۱ درصد وزنی استرانسیم است، برابر ۴۳ میکرومتر بوده و در بین آلیاژهای مورد بررسی دارای کوچک‌ترین اندازه دانه می‌باشد. همچنین با افزایش استرانسیم در آلیاژ، کسر حجمی فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  از ۲۵/۶٪ در AZ91 بدون استرانسیم تا ۱۶/۱٪ در AZ91 حاوی ۱ درصد استرانسیم کاهش می‌یابد. جدول ۱ میانگین اندازه دانه و کسر حجمی فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  را در هر یک آلیاژهای بررسی شده، نشان می‌دهد.

طبق نتایجی که از پژوهش‌های لی<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۶] به دست آمده است، حد حلالیت استرانسیم در منیزیم در حالت جامد به نسبت کم است. همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد، به دلیل سرعت انجماد زیاد، انجماد در شرایط غیرتعادلی انجام می‌پذیرد. در فرآیند انجماد، ابتدا کریستال‌های  $\alpha$ -Mg تشکیل شده و رشد می‌کند و اتم‌های استرانسیم محلول باقیمانده در مذاب، به سمت فصل مشترک جامد-مایع نفوذ کرده و مانع رشد دانه می‌شود. به همین دلیل همان‌گونه که در شکل ۳ نشان

شکل ۳-الف-د) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ AZ91 را همراه با مقادیر مختلف استرانسیم بعد از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی به مدت ۱۸ ساعت نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است، بعد از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی، فاز  $\beta$ - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  تقریباً به صورت کامل در زمینه حل شده و مرزهای دانه در تصاویر پدیدار شده‌اند. همان‌طور که در تصاویر نیز مشخص است، با افزوده شدن مقادیر مختلف استرانسیم به آلیاژ AZ91، اندازه دانه‌ها کاهش یافته است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آلیاژهای AZ91 همراه با مقادیر مختلف استرانسیم در شکل ۴-الف-د) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴-الف و ب) مشخص است، فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  در آلیاژ AZ91 معمولاً در مناطق بین‌دندریتی تشکیل می‌شوند. در شکل ۴-الف و ب) زمینه که به رنگ تیره است، نمایش‌دهنده فاز  $\alpha$ -Mg و فاز روشن‌تر نمایش‌دهنده فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  است. با استفاده از EDS نیز می‌توان تشخیص داد که در تمام آلیاژها تمرکز عنصر آلومینیم در مناطق بین‌دندریتی بیش‌تر از زمینه است. همچنین تمرکز عنصر منیزیم در زمینه بیش‌تر از این لایه‌ها می‌باشد (شکل ۵). در شکل ۴-ج و د) به ترتیب تصاویر SEM آلیاژ AZ91 شامل مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی استرانسیم به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در تصویر نیز مشخص است، فاز جدیدی با مورفولوژی متفاوت نسبت به فازهای اصلی تشکیل شده است. شکل ۵ تصویر SEM و آنالیز EDS مربوط به آن را در آلیاژ AZ91 همراه با ۱ درصد وزنی استرانسیم نشان می‌دهد. در شکل ۵-ب-د) آنالیز EDS از نقاط A، B، C که در شکل ۵-الف مشخص شده‌اند، به نمایش درآمده است. آنالیز نقطه A در شکل ۵-ب نشان می‌دهد که این فاز دارای  $\text{Al}$  ۳۰/۶ at.٪،  $\text{Zn}$  ۱/۲۶ at.٪ و  $\text{Mg}$  ۶۸/۱۴ at.٪ می‌باشد. با استفاده از این آنالیز و همچنین نتایج XRD که در شکل ۱ به نمایش درآمده، می‌توان نتیجه گرفت که این لایه‌ها، فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  هستند و در نتیجه نقطه A نشان‌دهنده فاز  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  می‌باشد. آنالیز نقطه B از شکل ۵-ج نشان می‌دهد که این فاز دارای  $\text{Al}$  ۳/۹۹ at.٪،  $\text{Zn}$  ۰/۱۴ at.٪ و  $\text{Mg}$  ۹۵/۸۷ at.٪ می‌باشد. با استفاده از این آنالیز و همچنین نتایج XRD

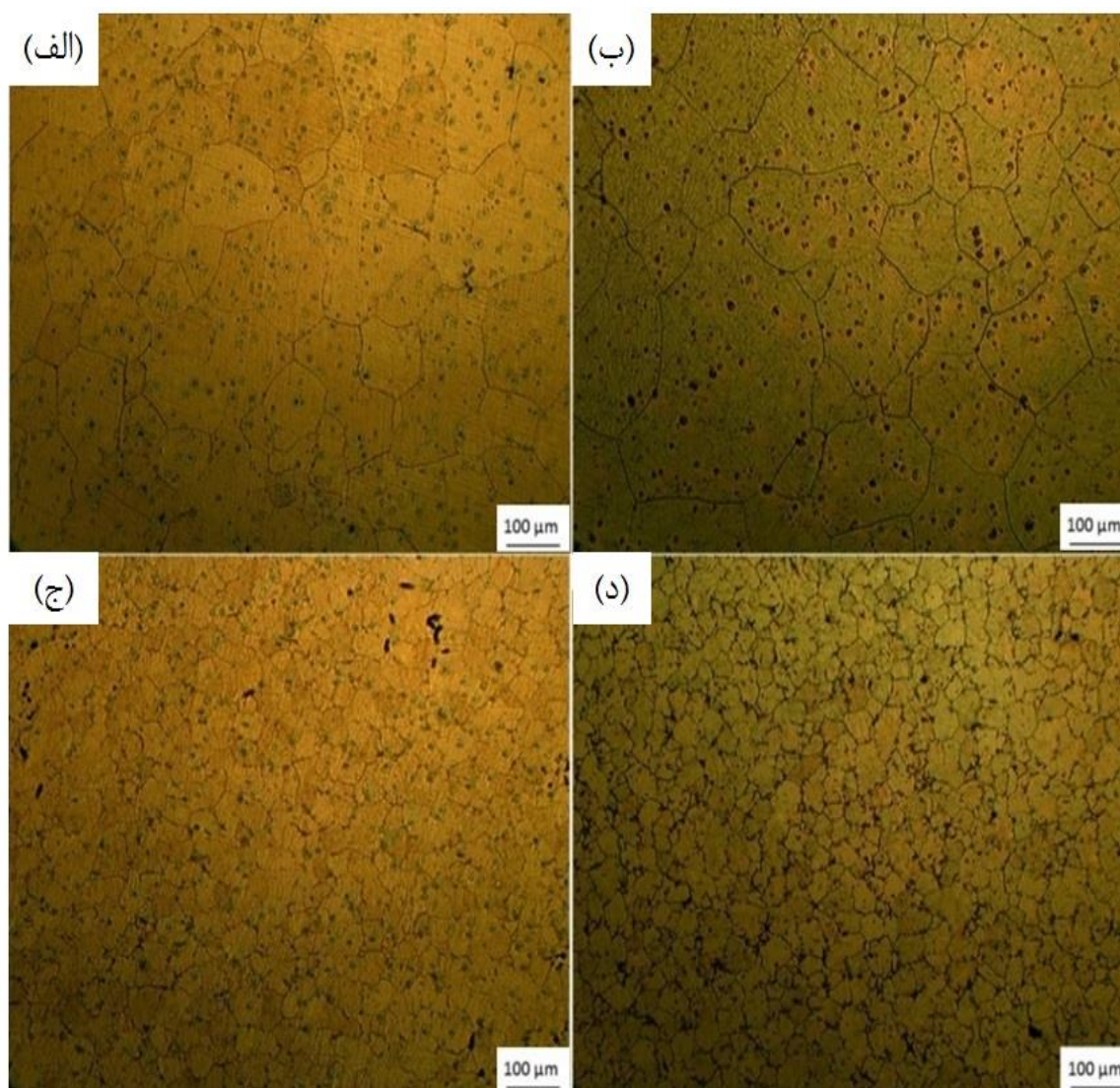
<sup>۱</sup>- Lee

طبق رابطه (۱)، مقدار GRF با افزایش  $C_{0,Sr}$  افزایش خواهد یافت که دلیل آن افزودن عنصر استرانسیم به آلیاژ می‌باشد. همچنین اندازه دندریت‌ها و دانه‌ها در آلیاژ AZ91 با افزایش عنصر استرانسیم از صفر تا یک درصد وزنی، طبق مکانیزم GRF کاهش می‌یابد. در نتیجه ریزساختار آلیاژ AZ91 در این حالت بهبود می‌یابد. این مطلب منطبق با اشکال ۲- (الف-د) و ۳- (الف-د) می‌باشد.

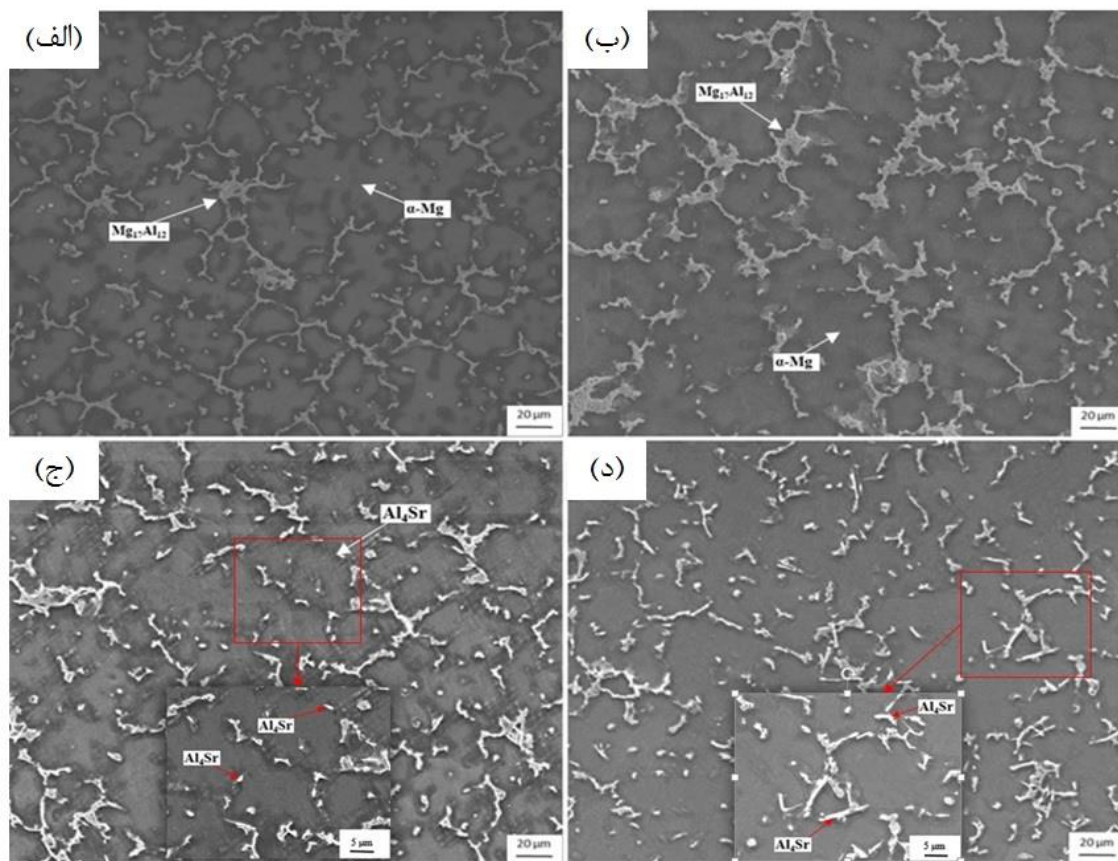
داده شده، عنصر استرانسیم به مقدار قابل توجهی موجب ریزدانه‌گی آلیاژ AZ91 می‌شود. مذاب با ایجاد تحت تبرید ترکیبی (در اثر رشد دانه در مجاورت ذرات جوانه‌زای معلق در مذاب) جوانه زده و رشد می‌کند [۱۷ و ۱۸]. مفهوم تحت تبرید ترکیبی ساده شده و فاکتور محدودکننده رشد (GRF) نامیده می‌شود. فاکتور محدودکننده رشد به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$GRF = \sum_i m_i c_{0,i} (k_i - 1) \quad (1)$$

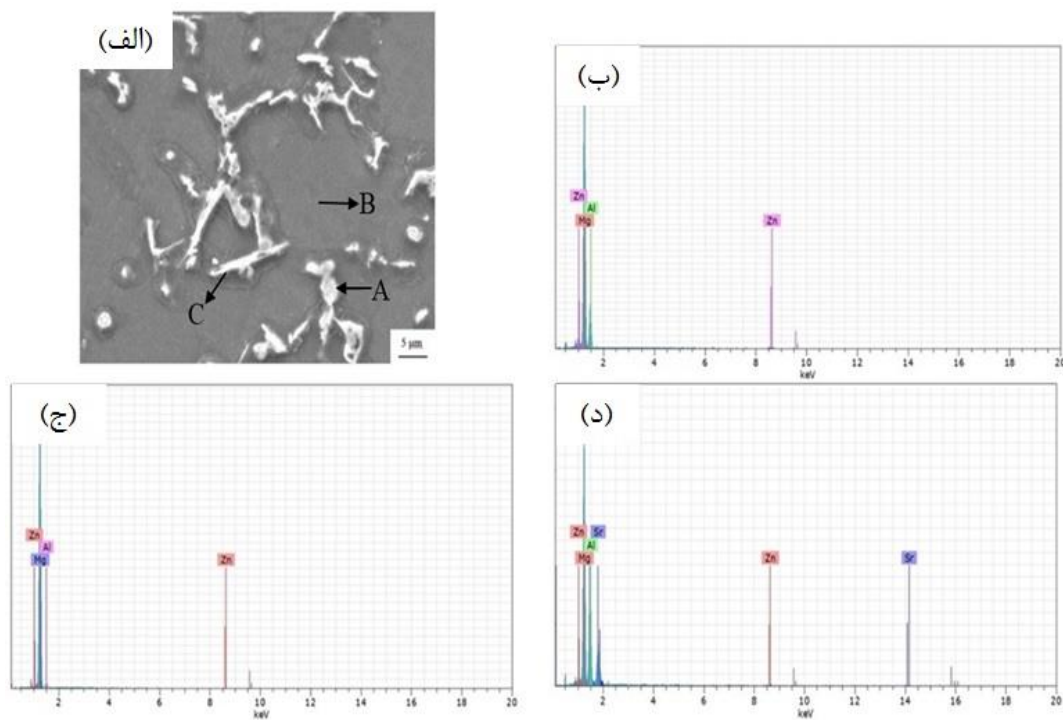
در رابطه (۱)  $m_i$  شیب خط لیکوئیدوس،  $c_{0,i}$  غلظت اولیه عنصر  $i$  و  $k_i$  ضریب تقسیم برای عنصر  $i$  است. در این پژوهش  $i$  به ترتیب Al، Zn و Sr می‌باشد.



شکل ۳- تصاویر ریزساختار نوری از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91 + ۰/۰۵Sr (ج) AZ91 + ۰/۵Sr (د) AZ91 + ۱Sr پس از عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای ۴۱۵°C به مدت ۱۸ ساعت



شکل ۴- تصاویر SEM از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91 + ۰/۰۵Sr (ج) AZ91 + ۰/۱Sr (د) AZ91 + ۰/۵Sr



شکل ۵- تصویر SEM و آنالیز EDS از آلیاژ ریختگی AZ91 + ۱Sr (الف) تصویر SEM (ب) آنالیز EDS از نقطه A (ج) آنالیز EDS از نقطه B (د) آنالیز EDS از نقطه C

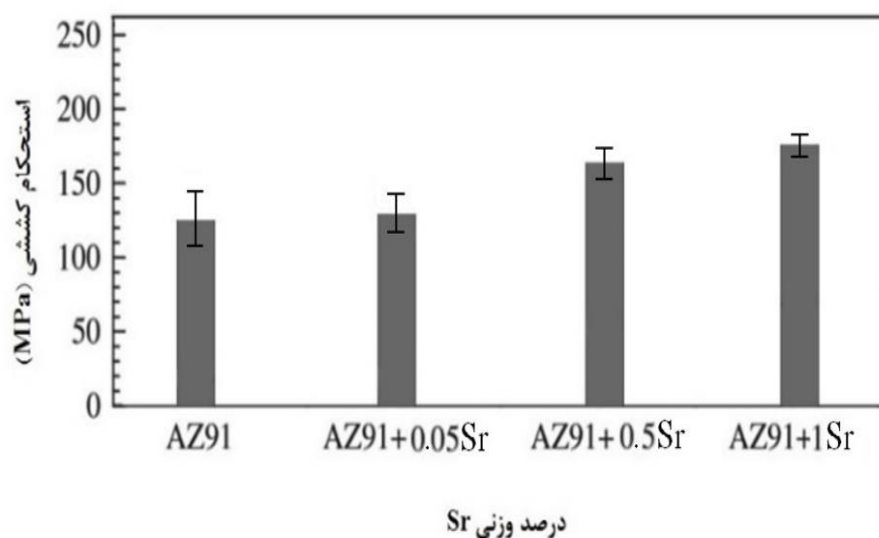
جدول ۱- میانگین اندازه دانه و کسر حجمی فاز  $Mg_{17}Al_{12}$  در آلیاژ AZ91 همراه با مقادیر مختلف استرانسیم

مقدار استرانسیم (برحسب درصد وزنی)	میانگین اندازه دانه (میکرومتر)	کسر حجمی فاز $Mg_{17}Al_{12}$ (درصد)
۰	۱۳۱	۲۵/۶
۰/۰۵	۱۲۲	۲۲/۴
۰/۵	۵۴	۱۹/۴
۱	۴۳	۱۶/۱

### بررسی خواص کششی

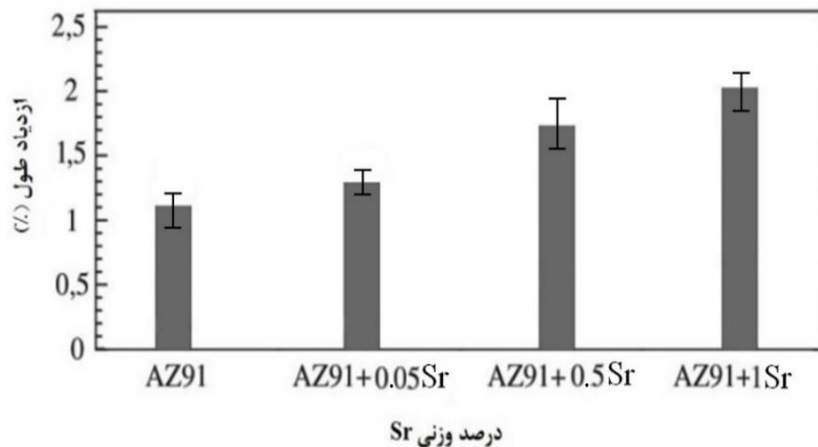
در این آلیاژ به ترتیب برابر با ۱۷۷ MPa و ۲٪ است. این امر بدین معنی است که نسبت به آلیاژ AZ91، با افزایش استرانسیم در این آلیاژ، استحکام کششی حدود ۴۰ درصد و ازدیاد طول حدود ۸۰ درصد افزایش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش استرانسیم به میزان ۱ درصد به آلیاژ AZ91 استحکام کششی و داکتیلیتی افزایش می‌یابد. علت این امر نیز به دلیل کاهش اندازه دانه‌ها و کاهش میزان فاز ترد  $Mg_{17}Al_{12}$  در اثر افزودن استرانسیم به این آلیاژ است.

تست کشش در دمای اتاق بر روی آلیاژ منیزیم AZ91 که شامل مقادیر مختلف استرانسیم است، انجام شد. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب استحکام کششی و درصد ازدیاد طول را بر حسب میزان استرانسیم در آلیاژ AZ91 نشان می‌دهند. استحکام کششی و ازدیاد طول آلیاژ AZ91 بدون استرانسیم به ترتیب برابر با ۱۲۹ و ۱/۱٪ است. بیش‌ترین میزان استحکام کششی و ازدیاد طول نیز مربوط به آلیاژ AZ91 شامل ۱ درصد وزنی استرانسیم می‌باشد. استحکام کششی و ازدیاد طول



شکل ۶- استحکام کششی آلیاژ AZ91 بر حسب تابعی از مقدار استرانسیم





شکل ۷- درصد ازدیاد طول آلیاژ AZ91 بر حسب تابعی از مقدار استرانسیم

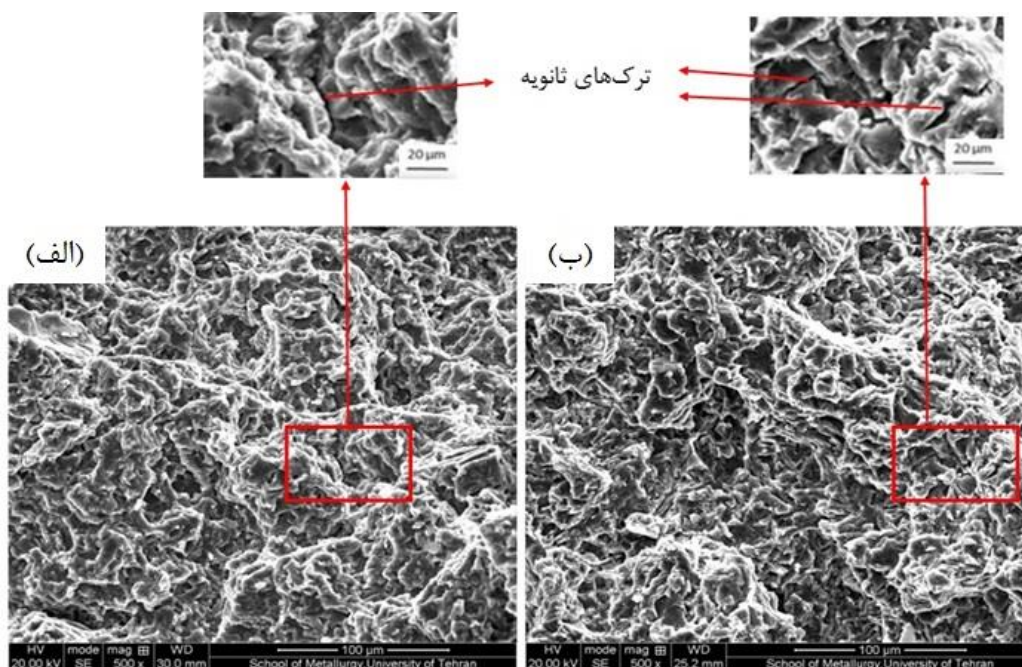
### رفتار شکست کششی

کریستالی مکعب مرکز پر (b.c.c.)، با ساختار h.c.p. منیزیم زمینه ناسازگار است که این امر، موجب شکنندگی فصل مشترک  $Mg/Mg_{17}Al_{12}$  می‌شود. علاوه بر این فاز  $Mg_{17}Al_{12}$ ، دارای استحکام کمی بوده و تمایل به شکست دارد. به همین دلیل میکروتورها و تمایل دارند تا در فصل مشترک  $Mg/Mg_{17}Al_{12}$  و یا حتی در ذرات  $Mg_{17}Al_{12}$  جوانه بزنند. کسر حجمی و مورفولوژی  $Mg_{17}Al_{12}$  تا حد زیادی خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 را تعیین می‌کند [۲۰].

در آلیاژ AZ91 ریختگی، ذرات  $Mg_{17}Al_{12}$  به صورت غیر متصل به هم، در زمینه آلیاژ توزیع شده‌اند. جوانه‌زنی ترک در ابتدا در مجاورت ذرات  $Mg_{17}Al_{12}$  و مرز دانه‌ها، به‌خصوص فصل مشترک‌های  $Mg/Mg_{17}Al_{12}$  رخ می‌دهد. ترک‌ها اصطلاحاً به رود بلندی از ترک تبدیل می‌شوند که به ترک اصلی وصل بوده و به صورت ترک ثانویه حضور داشته است. این ترک ثانویه عمیق و پیشرفته نشان می‌دهد که ترک زمان کافی برای رشد در شرایط تست کشش داشته است. همچنین این امر بیانگر قابلیت شکل‌پذیری ضعیف آلیاژ AZ91 است. ویژگی‌های معمول شکست کلیواژ شامل پله‌های کلیواژی، رودهای کلیواژی و ترک‌های ثانویه است. رودهای کلیواژی برآمده از ترکیب پله‌های کلیواژی هستند. با این همه، پله‌های کلیواژی یا از طریق کلیواژ ثانویه یا تقاطع ترک کلیواژ و نابجایی‌ها و یا از طریق پارگی تشکیل می‌شوند [۲۰].

شکل ۸ سطح شکست آلیاژ AZ91 را به همراه مقادیر مختلف عنصر استرانسیم نمایش می‌دهد. مشخص است که شکست در هر دو قسمت شکل ۸ از نوع ترد و به صورت کلیواژ است. هر دو تصویر دارای تعداد زیادی ترک ثانویه هستند. همچنین تعداد کمی الگوی رود مانند نیز در دو تصویر دیده می‌شود. همچنین تعدادی میکرو حفره در هر دو سطح شکست قابل مشاهده است. در شکل ۸- (ب) تعداد بیشتری از مناطق تغییر شکل پلاستیک که به صورت تقریباً یکنواخت در تمام طول سطح شکست پخش شده‌اند، نسبت به شکل ۸- (الف) مشاهده می‌شود. همین امر می‌تواند دلیلی باشد که داکتیلیتی و استحکام کششی در آلیاژ AZ91 همراه با استرانسیم، بیش از آلیاژ AZ91 بدون استرانسیم بوده است.

منیزیم، دارای ساختار کریستالی هگزاگونال (h.c.p.) می‌باشد. به همین دلیل سیستم‌های لغزش منیزیم دارای محدودیت هستند که این امر، منجر به کاهش شکل‌پذیری و کارسختی در آن می‌شود. مهم‌ترین مانع برای تغییر شکل در آلیاژهای AZ91 مرزدانه‌ها هستند. شکست در آلیاژهای منیزیم عموماً به صورت شکست ترد رخ می‌دهد که در این بین، شکست‌های کلیواژ و شبه‌کلیواژ معمول‌ترین نوع شکست در این آلیاژها محسوب می‌شوند. شکست کلیواژی در منیزیم معمولاً در جهت صفحه کریستالی (۰۰۰۱) رخ می‌دهد. در آلیاژ AZ91، فاز  $Mg_{17}Al_{12}$  مهم‌ترین ترکیب بین‌فلزی استحکام بخش می‌باشد. فاز  $Mg_{17}Al_{12}$ ، با ساختار



شکل ۸- سطح شکست نمونه‌های تست کشش آلیاژ AZ91 (الف) بدون Sr (ب) همراه ۱ درصد Sr

۳- بهترین خواص مکانیکی در بین آلیاژهای مورد مطالعه، در آلیاژ AZ91 + ۱٪ Sr بدست آمد که استحکام کششی و میزان ازدیاد طول در آن به ترتیب برابر با ۱۷۷ MPa و ۲٪ است.

۴- با افزودن استرانسیم تا ۱ درصد وزنی، استحکام کششی و داکتیلیتی در آلیاژ AZ91، به ترتیب از ۱۲۹ MPa و ۱/۱٪ به ۱۷۷ MPa و ۲٪ است.

۵- بررسی سطح شکست نمونه‌های تست کشش نشان داد که شکست در دمای اتاق در هر یک از نمونه‌ها به صورت کلیواژ است و با افزودن استرانسیم نیز تغییری در نوع شکست ایجاد نمی‌شود.

### References:

- 1- B. L. Mordike, T. Ebert, Magnesium: Properties -Applications-Potential, Materials Science and Engineering, Vol. 302, pp. 37-45, 2001.
- 2- K. U. Kainer, Magnesium Alloys and Technology, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

### نتیجه‌گیری

تاثیر عنصر استرانسیم بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 به روش ریخته‌گری در قالب فلزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از این پژوهش به دست آمد:

۱- افزودن عنصر استرانسیم به آلیاژ AZ91 تا ۱ درصد وزنی، باعث کاهش اندازه دانه از ۱۳۱ به ۴۳ میکرومتر شده و همچنین موجب کاهش کسر حجمی فاز  $Mg_{17}Al_{12}$  از ۲۵/۶٪ تا ۱۶/۱٪ در این آلیاژ می‌شود.

۲- علاوه بر فازهای  $\alpha$ -Mg و  $Mg_{17}Al_{12}$  موجود در ریزساختار آلیاژ AZ91، در صورت افزودن بیش از ۰/۵ درصد وزنی استرانسیم به این آلیاژ، فاز سوزنی شکل  $Al_4Sr$  نیز در آن تشکیل می‌شود.

- 3- X. Q. Zhang, Y. X. Wang, W. J. Ding, "Effect of Strontium on the Microstructure, Mechanical properties and Fracture Behavior of AZ31 Magnesium Alloys", Metal Mater Trans, Vol. 37, pp. 1333-1341, 2006.

- 4- R. J. Chen, A. T. Tang, M. B. Yang, F. S. Pan, "Effects of Al-Sr Master Alloys on

the As-Cast Microstructure of the AZ31 Magnesium Alloys”, *Materials Science Forum*, Vol 546, pp 183-186. , 2007.

5- A. Srinivasan, U. T. Pillai, J. Swaminathan, S. K. Das, B. C. Pai, “Observations of Microstructural Refinement in Mg-Al-Si Alloys Containing Strontium”, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 6087-6089, 2006.

6- K. Y. Nam, D. H. Song, C. W. Lee, “Modification of Mg<sub>2</sub>Si Morphology In As-Cast Mg-Al-Si Alloys With Strontium and Antimony”. *Materials Science Forum*, Vol 510, pp. 224-238, 2006.

7- B. Chen, D. L. Lin, L. Jin, X. Q. Zeng, C. Lu, “Equal-channel angular pressing of magnesium alloy AZ91 and its effects on microstructure and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 483-484, pp. 113-116, 2008.

8- E. Cerri, P. Leo, P. De Marco, “Hot Compression Behavior of the AZ91 Magnesium Alloy Produced by High Pressure die casting”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, pp. 97-106, 2007.

9- M. M. Avedesian, H. Baker, *Magnesium and Magnesium Alloys*. ASM Specialty Handbook, Materials Park, ASM International, 1999.

10- I. A. Yakubtsov, B. J. Diak, C. A. Sager, B. Bhattacharya, W. D. Macdonald, M. Niewcsaz, “Effects of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Deformation of Mg AZ80 Alloy at Room Temperature”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 496, pp. 247-255, 2008.

11- A. V. Koltygin, T. A. Bazlova, and I. V. Plisetskaya, “Effect of Calcium on The Process of Production and Structure of Magnesium Melted by Flux-Free Method”, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 54, Nos. 9 – 10, January,

2013.

12- H. Chandler, “Heat Treater’s Guide practices and procedures for Nonferrous Alloys”, *The Materials Information Society*, ASM International, 3<sup>rd</sup> Edition, March, 2006.

13- A. Kielbus, L. Cizek, L. Pawlica, “Microstructural Changes of AZ91 Magnesium Alloy After Heat Treatment”, 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications. Ed.: Kainer, K. U. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, pp. 196-202. 2004.

14- Wang Qu-dong, Chen Wen-zhou, Zeng Xiao-qin, Lu Yi-zhen, Ding Wen-jiang, Zhu Yan-ping, Xu Xiao-ping, “Effects of Ca Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloy”, *Journal of Materials Science*, Vol. 36, pp. 3035-3040, 2001.

15- Y. Cheng, T. Qin, H. Wang, Z. Zhang, “Comparison of Corrosion Behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 Magnesium alloys”, *Trans. Nonferrous Met. Soc., China*, Vol. 19, pp 517-524, 2009.

16- S. Lee, S. H. Lee, D. H. Kim, “Effect of Y, Sr and Nd Addition in the Microstructure and Microfracture Mechanism of Squeeze-Cast AZ91x Magnesium Alloys”, *Metal Mater Trans*, Vol. 29, pp 1221-1235, 1998.

17- Y. C. Lee, D. H. StJohn, J. E. C. Hutt, A. K. Dahle, “Effect of Grain Refinement and Silicon Content on Grain Formation in Hypoeutectic Al-Si Alloys”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 259, pp. 43-52, 1999.

18- J. E. C. Hutt, A. K. Dahle, Y. C. Lee, D. H. StJohn, “Effects of Growth Restriction and Effective Nucleant Potency on Grain Size and Morphology in Al-Si and Al-Cu Alloys”, *Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting*. Warrendale, PA, USA, Minerals,

Metals & Materials Society (TMS), pp. 685-692, 1999.

19- A. K. Dahle, Y. C. Lee, M. D. Nave, P. L. Schaffer, D. H. StJohn, "Development of As-Cast Microstructure in Magnesium-Aluminum Alloys".

Journal of Light Metals, Vol. 1, pp. 61-72, 2001.

20- Y. Z. Lu, Q. D. Wang, W. J. Ding, X. Q. Zeng, Y. P. Zhu, "Fracture Behavior of AZ91 Magnesium alloy", Materials Letters, Vol. 44, pp. 265-268, 2000.