

## Research Paper

### Study on the effect of first step aging temperature on the mechanical properties and microstructure of Al-Cu-Mg alloy in two steps aging process

Hamed Talebi<sup>1</sup>, Mohammad Maleki<sup>1</sup>, Yousef Payandeh<sup>1</sup>, \*Bahman Mirzakhani<sup>2</sup>, Mohsen Bahrami<sup>3</sup>

1- Department of Materials Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Department of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3- Research and Development of Techno Arak, Arak, Iran.

**Citation:** Talebi H, Maleki M, Payandeh Y, Mirzakhani B, Bahrami M. Study on the effect of first step aging temperature on the mechanical properties and microstructure of Al-Cu-Mg alloy in two steps aging process. Metallurgical Engineering 2018; 21(1): 24-31 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.77964.1165>

**doi :** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.77964.1165>

## ABSTRACT

In this research, the effect of first step aging temperature during two steps aging process on the strength, ductility, hardness and microstructure of Al-Cu-Mg alloy has been investigated to obtain an optimum combination of strength and ductility. After solution treatment and quenching the samples in the water, they have artificially been aged for 2 hours in 175, 190, 205°C. Then the samples were naturally aged for 10, 50, 100 hours. To investigate the mechanical properties, all the samples were subjected to tensile test and microstructure analysis after each cycle. The data of one and two steps aging treatment and also the effect of first step temperature were compared. The results show that second step of natural aging by affecting the stability of precipitates and microstructure leads to change in tensile properties. With increasing the first step aging temperature, the impact of second step aging process decreases. Also two steps aging process with temperature of 190°C in first step and time of 50 hours in naturally aging results in an optimum combination of strength and ductility.

**Keywords:** Al-Cu-Mg alloy, two steps aging, tensile properties, microstructure.

■ ..... ■

\* *Corresponding Author:*

**Bahman Mirzakhani, PhD**

**Address:** Department of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

**Tel:** +98 (21) 77459151

**E-mail:** b-mirzakhani@iust.ac.ir

## بررسی تأثیر دمای پیرسازی مرحله اول در عملیات پیرسازی دومرحله‌ای، بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم

حامد طالبی<sup>۱</sup>، محمدملکی<sup>۲</sup>، یوسف پاینده<sup>۳</sup>، بهمن میرزاخانی<sup>۴</sup>، محسن بهرامی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲- کارشناسی مواد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۵- کارشناسی ارشد مواد، کارشناس تحقیق و توسعه، شرکت تکنو اراک، اراک، ایران.

### چکیده

در این تحقیق، تأثیر دمای مرحله اول پیرسازی در پیرسختی دو مرحله‌ای بر استحکام، انعطاف‌پذیری، سختی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم مورد بررسی قرار گرفته است تا ترکیب بهینه‌ای از استحکام و نرمی حاصل گردد. به این منظور پس از انجام عملیات انحلالی نمونه‌ها و کوئنچ آن‌ها در آب، ابتدا نمونه‌ها در سه دمای ۱۷۵، ۱۹۰، ۲۰۵ به مدت ۲ ساعت پیرسازی تک مرحله‌ای شدند. سپس نمونه‌ها به صورت طبیعی برای زمان‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ ساعت پیرسازی طبیعی شدند. برای بررسی خواص مکانیکی، تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از اتمام عملیات حرارتی، تحت آزمایش کشش و بررسی ریزساختاری قرار گرفتند. نتایج نمونه‌های پیرسازی تک مرحله‌ای با دو مرحله‌ای با یکدیگر مقایسه و علاوه بر تأثیر پیرسازی دومرحله‌ای، تأثیر دمای مرحله اول نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که پیرسازی طبیعی مرحله دوم با تأثیر بر پایداری رسوبات و ریزساختار منجر به تغییر خواص کششی می‌گردد. بطوریکه هر چه دمای پیرسازی مرحله اول افزایش می‌یابد، تأثیر مرحله دوم پیرسازی کمتر می‌شود. همچنین پیرسازی دومرحله‌ای با دمای مرحله اول ۱۹۰°C و زمان پیرسازی طبیعی مرحله دوم ۵۰ h، به ترکیب بهینه‌ای از استحکام و نرمی منجر شده است.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم، پیرسازی دومرحله‌ای، خواص کششی، ریزساختار

### ۱. مقدمه

الزامات در مورد مواد سازنده آخرین نسل از هواپیماهای نظامی، غیرنظامی، فضاپیماها و وسایل حمل‌ونقل زمینی علاقه‌مندی زیادی برای توسعه آلیاژهای آلومینیوم در سری 2xxx و 7xxx به‌عنوان جایگزینی برای آلیاژهای تجاری استحکام بالا ایجاد کرد [۱]. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل چگالی کم به‌عنوان جایگزین مناسبی برای فولادها در صنایع خودروسازی و هوافضا به‌منظور حفظ منافع اقتصادی و زیست‌محیطی به‌حساب می‌آیند [۲]. به‌منظور دستیابی به خواص مناسب در این آلیاژها، بررسی شرایط تولیدی از جمله عملیات حرارتی الزامی است [۲]. پیرسازی از جمله روش‌های مرسوم است که به‌منظور بهبود استحکام آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر استفاده می‌شود. آلیاژهای آلومینیوم-مس-منیزیم از جمله آلیاژهای عملیات

حرارتی پذیر آلومینیوم بوده که با توجه به نسبت استحکام به وزن بالا، نیاز به کنترل دقیق شرایط عملیات حرارتی دارند، تا محصولات تولیدی از آن‌ها تمام خواص مورد انتظار و ذکر شده در استاندارد را داشته باشد [۳]. عملیات حرارتی‌های چندمرحله‌ای اغلب برای بهبود خواص آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود و ابزاری برای اصلاح اندازه، ترکیب، مورفولوژی و توزیع ذرات رسوب در آلیاژهای آلومینیوم است که به بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند [۴ و ۵]. بهبود خواص مکانیکی به‌وسیله پیرسازی مصنوعی در خصوص برخی از آلیاژهای این گروه مورد مطالعه قرار گرفته است [۶ و ۷]. در این بین محققین دیگری از پیرسازی دومرحله‌ای برای آلیاژهای گروه ۲۰۰۰ استفاده نموده‌اند. پیرسازی دومرحله‌ای اصطلاحی است که به توزیع ذرات رسوبی در زمینه آلیاژی در دمایی کم پس از پیرشدن آلیاژ در دمایی بالا اختصاص می‌یابد که این روش شامل عملیات انحلال و خنک کردن

\* نویسنده مسئول:

دکتر بهمن میرزاخانی

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۷۷۴۵۹۱۵۱ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: b-mirzakhani@iust.ac.ir

ساعت پیرسخت شدند. دماها و زمان‌های عملیات انحلالی با توجه به دماها و زمان‌های ذکر شده در استاندارد و منابع انتخاب گردید [۴ و ۶ و ۷ و ۱۱].

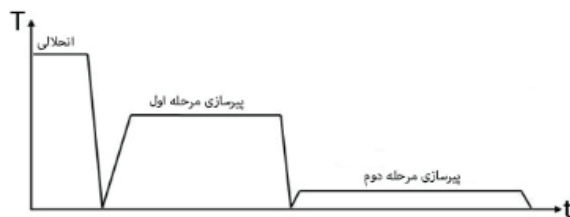
بعد از هر سیکل عملیات حرارتی، بلافاصله بررسی‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش کشش، سختی و ریزساختاری روی نمونه‌ها انجام گرفت. به‌منظور اطمینان در نتایج، در مواردی که بین آماده‌سازی نمونه جهت تست و اتمام سیکل پیرسازی دومرحله‌ای وقفه ایجاد می‌شد، نمونه‌ها برای جلوگیری از ادامه رسوب سختی طبیعی در دمای زیر صفر نگهداری می‌شدند. آزمایش کشش طبق استاندارد E8/E8M روی نمونه‌های به قطر سنجه ۹ mm و طول سنجه ۴۵ mm و با استفاده از دستگاه Santam-STM ۱۵۰ با سرعت ۱ mm/min در دمای محیط انجام گرفت. منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده مورد تحلیل و مقایسه واقع شدند. در این تحقیق همچنین سختی سنجی برینل طبق استاندارد ISO/6506-1 با استفاده از ساچمه فولادی به قطر ۲/۵ mm و نیروی ۶۲/۵ N انجام گرفت. به‌منظور مطالعه ریزساختار، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی تحت بررسی واقع شدند.

### ۳. نتایج و بحث

در این تحقیق نتایج خواص مکانیکی و ریزساختاری به‌دست‌آمده از عملیات پیرسازی تک مرحله‌ای با دو مرحله‌ای مقایسه گردیده و همچنین در نمونه‌هایی که تحت عملیات پیرسازی دو مرحله‌ای واقع شده‌اند، تأثیر دمای مرحله اول بررسی شده است که ارائه خواهد شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم مورد استفاده (%wt)

Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Cr	Zn	Ti	Pb	Al
۳/۶۸	۰/۹۸	۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۱۰	۱/۰۰	بقیه



شکل ۱. چرخه عملیات حرارتی رسوب سختی تک و دو مرحله‌ای مورد استفاده در تحقیق

### پیرسازی تک‌مرحله‌ای

نتایج آزمایش کشش نمونه‌ها پس از اتمام مرحله اول پیرسازی در شکل ۲ نشان داده شده است. در پیرسازی تک‌مرحله‌ای، نمونه‌ها پس از عملیات انحلالی در سه دمای ۱۷۵°C، ۱۹۰ و ۲۰۵ پیرسخت شدند. عملیات حرارتی پیرسختی یکی از

آلیاژ و پس از آن حرارت دادن آلیاژ به دمایی پایین‌تر از دمای محلول‌سازی در یک زمان معین و سپس پیرسازی ثانویه در دمایی متفاوت از پیرسازی نخستین می‌باشد [۸ و ۹]. بر اثر این فرآیند عملیات حرارتی، خواص مکانیکی آلیاژ دچار تغییر می‌شود، که این تغییرات اولین بار توسط لوفلر و همکارانش برای آلیاژهای Al-Zn، که پس از پیرسازی مرحله اول در دمای ۱۸۰°C و پیرسازی مرحله دوم در دمای محیط ادامه یافت، گزارش شده است [۱۰]. در تمامی آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر که مرحله اول پیرسازی آن‌ها در دمای ۱۵۰°C و مرحله دوم پیرسازی آن‌ها در دمای ۲۵°C انجام شده است، ذرات رسوبی ثانویه در زمینه مشاهده شده است [۱۱ و ۱۲]. این سیکل عملیات حرارتی T614 نامگذاری شده است [۱۳]. سیکل T614 به دلیل اعمال پیرسازی مرحله دوم پس از کوئنچ، موجب توزیع و تشکیل ریزساختار ریز و پراکنده می‌شود که ممکن است موجب افزایش همزمان استحکام کششی و چقرمگی در طیف وسیعی از آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر شود [۱۳ و ۱۴]. منسوری نژاد و میرزاخانی [۱۵] با تلفیق سیکل پیرسازی دو مرحله‌ای و کارمکانیکی، استحکام آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم را به بیش از ۱.۵ برابر افزایش دادند.

مطالعات نشان می‌دهد که اگر چه سیکل دو مرحله‌ای در خصوص برخی آلیاژهای گروه آلومینیوم-مس-منیزیم، برای مدت‌زمان‌های طولانی (۷ تا ۱۴ روز) اعمال گردیده و منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است، اما تاکنون در خصوص آلیاژهای ۲۰۰۰ سیکل دو مرحله‌ای پیشنهاد نشده است. در این تحقیق تأثیر پیرسازی یک و دو مرحله‌ای و ضمناً تأثیر دمای پیرسازی مرحله اول بر خواص مکانیکی و ریزساختار، مورد بررسی قرار می‌گیرد تا شرایط بهینه عملیات حرارتی رسوب سختی دو مرحله‌ای، از نظر زمان عملیات حرارتی و ترکیب بهینه‌ای از استحکام و نرمی حاصل گردد.

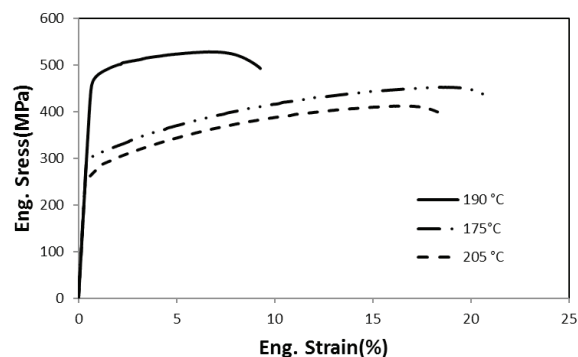
### ۲. مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر از میلگردهای یک آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم اکستروژ گرم شده با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ استفاده گردید. نمونه‌های برش زده از میلگرد اولیه طبق سیکل‌های عملیات حرارتی شکل ۱، ابتدا در دمای ۵۰۰°C به مدت یک ساعت عملیات انحلالی شدند. تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از عملیات انحلالی در آب کوئنچ شدند. سپس تحت دماهای ۱۷۵، ۱۹۰، ۲۰۵ به مدت دو ساعت پیرسازی اولیه، سه نمونه برای بررسی خواص و ریزساختار در پایان پیرسازی تک مرحله‌ای انتخاب گردید و ۹ نمونه دیگر برای پیرسازی مرحله دوم آماده گردید. برای انجام سیکل پیرسازی دو مرحله‌ای (تمپر T614) مطابق شکل ۱، نمونه‌ها در مرحله دوم در دمای ۲۵°C برای زمان‌های ۱۰ و ۵۰ و ۱۰۰

۱۷۵°C استحکام و انعطاف پذیری پایین تری دارد. بنابراین از مقایسه منحنی های تنش- کرنش نمونه های پیرسخت شده تک مرحله ای، این گونه می توان نتیجه گرفت که دمای پیرسازی ۲۰۵°C ضعیف ترین خواص مکانیکی را به دست می دهد. در حالی که دمای پیرسختی ۱۷۵°C انعطاف پذیری عالی و دمای رسوب سختی ۱۹۰°C استحکام بالا را می دهند. تغییرات ریزساختاری نمونه های پیرسازی تک مرحله ای شده در دماهای مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان گونه که در این تصاویر مشاهده می شود، نمونه ای که در دمای ۱۷۵°C پیرسخت شده است، ریزساختار همگن تری دارد. به نظر می رسد، پیرسازی در دمای ۱۷۵°C تا حدی سبب خروج عناصر از زمینه و تشکیل رسوبات شده است و با افزایش دما به ۱۹۰°C، حداکثر رسوبات ریز در ساختار تشکیل شده ولی در ادامه افزایش دما به ۲۰۵°C منجر به فرآیند آلیاژ شده است.

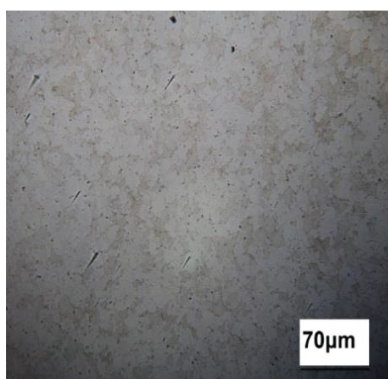
### پیرسازی دومرحله ای - دمای پیرسازی مرحله اول ۱۷۵°C

نتایج به دست آمده از آزمایش کشش نمونه های پیرسازی دومرحله ای شده که دمای پیرسازی مرحله اول آن ها ۱۷۵°C بوده و در مرحله دوم تحت پیرسازی طبیعی (۲۵°C) قرار گرفته اند در شکل ۴ نشان داده شده است، در نمودار شکل ۴، منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه ای که تنها یک مرحله در دمای ۱۷۵°C پیرسازی شده است نیز برای مقایسه و بررسی تأثیر پیرسازی دومرحله ای آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نمونه پیرسازی طبیعی شده به مدت ۱۰ h، استحکام را نسبت به نمونه پیرسازی تک مرحله ای افزایش داده ولی زمان های کمتر پیرسازی طبیعی (یعنی ۱۰ و ۵۰ ساعت) استحکام را کاهش داده است. همان گونه که در تحلیل نمودارهای تنش-کرنش نمونه های پیرسازی تک مرحله ای (شکل ۲ و ۳) ذکر گردید، به نظر می رسد دمای ۱۷۵°C برای پیرسازی مرحله اول منجر به

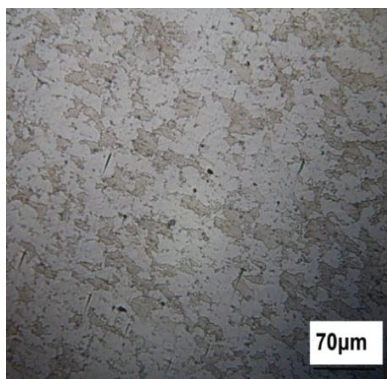


شکل ۲. منحنی تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی نمونه های پیرسازی تک مرحله ای شده در دماهای ۱۷۵°C، ۱۹۰، ۲۰۵ به مدت ۲ ساعت

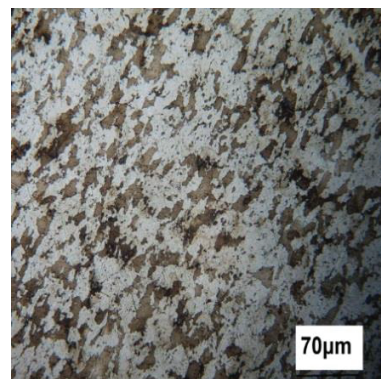
مکانیزم های اصلی استحکام دهی آلیاژهای آلومینیوم است که معمولاً با کاهش نرمی همراه است. مقایسه منحنی های مربوط به سیکل های مختلف در شکل ۲ نشان می دهد که با افزایش دمای رسوب سختی از ۱۷۵°C به ۱۹۰°C، استحکام افزایش چشمگیری یافته است. این افزایش می تواند به دلیل تشکیل رسوبات ریز با کسر حجمی بالا و توزیع مناسب باشد. در واقع این رسوبات ریز و پراکنده، حرکت نابجایی ها را محدود ساخته اند و حرکت آن ها را مشکل می کنند. در نتیجه تنش تسلیم و سیلان را افزایش می دهد ولی در عوض تغییر شکل پلاستیک ماده سخت تر شده و همان طور که مشاهده می شود، انعطاف پذیری افت زیادی را به همراه دارد. با افزایش بیشتر دمای پیرسختی، به نظر می رسد رشد ذرات رسوبی [۱۶ و ۱۷] و در نتیجه کاهش کسر حجمی رسوبات مؤثر، متوسط مسیر طی شده توسط نابجایی ها را زیاد کرده است و سبب کاهش تنش سیلان ولی افزایش تغییر شکل پلاستیک می شود. در نتیجه نمونه پیرسخت شده در دمای ۲۰۵°C نسبت به نمونه رسوب سخت شده در دمای ۱۹۰°C، انعطاف پذیری بیشتری داشته ولی استحکام آن افت زیادی داشته است. همچنین نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۲۰۵°C نسبت به دمای



(ج)



(ب)



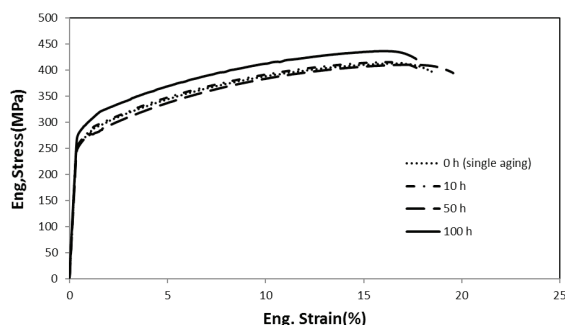
(الف)

شکل ۳. تصاویر متالوگرافی نوری نمونه های پیرسخت شده تک مرحله ای در دماهای: الف- ۱۷۵°C، ب- ۱۹۵°C، ج- ۲۰۵°C

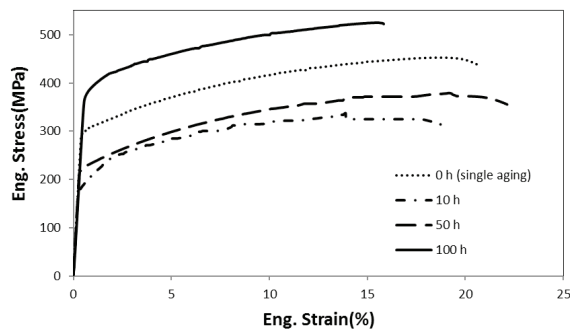
دومرحله‌ای، ملاحظه می‌شود که نمونه مربوط به پیرسازی طبیعی به مدت ۵۰ h استحکام کششی نزدیکی به نمونه پیرسازی تک مرحله‌ای در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  دارد و درعین حال، انعطاف پذیری بسیار بهتر نشان می‌دهد، ولی استحکام تسلیم آن کمتر است. به عبارت دیگر انجام مرحله دوم پیرسازی به افزایش نرخ کارسختی منجر شده است. بنابراین به طور کلی انجام پیرسازی مرحله دوم وقتی که دمای مرحله اول پیرسازی  $190^{\circ}\text{C}$  است، استحکام کاهش ولی انعطاف پذیری بهبود یافته است و در این بین زمان پیرسازی مرحله دوم ۵۰ h زمان بهینه می‌تواند معرفی شود و خواص کششی مناسبی دارد.

### پیرسازی دومرحله‌ای - دمای پیرسازی مرحله اول $205^{\circ}\text{C}$

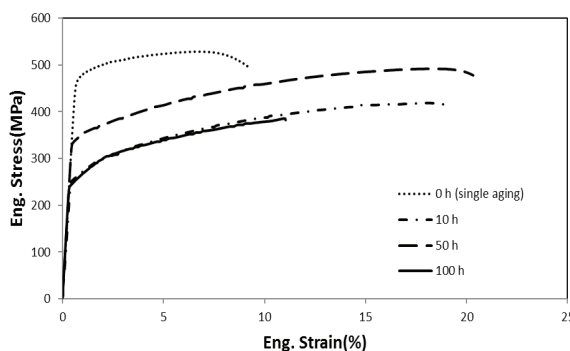
در شکل ۶ منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی به دست آمده از آزمایش کشش نمونه‌های پیرسازی دومرحله‌ای شده که دمای پیرسازی اولیه آن‌ها  $205^{\circ}\text{C}$  و پیرسازی مرحله دوم آن‌ها به صورت طبیعی برای مدت زمان‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ ساعت انجام شده است، نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، انجام پیرسازی طبیعی در زمان‌های مختلف پیرسازی طبیعی، تقریباً تغییری در خواص کششی نمونه‌های پیرسازی دو مرحله‌ای به وجود نیاورده است، به جز زمان پیرسازی ۱۰۰ ساعت که آن هم اثرش ناچیز است. علت این مسئله را این گونه می‌توان تفسیر کرد که با انجام پیرسازی مرحله اول در دمای  $205^{\circ}\text{C}$ ، حداکثر تغییرات ریزساختاری از نظر اندازه، کسر حجمی و مورفولوژی رسوبات و نقص شبکه‌ای جاهای خالی به وجود آمده است. بطوریکه رسوبات به حالت تقریباً پایدار رسیده و با انجام پیرسازی بعدی تمایل چندانی به تغییر ندارند. این مطلب توسط منحنی مربوطه در شکل ۲ و تصاویر ریزساختاری شکل ۳ نیز تأیید می‌شود. از آنجایی که نمونه پیرسازی شده در دمای  $205^{\circ}\text{C}$  پایین‌ترین خواص کششی را در نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان



شکل ۶. منحنی تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی نمونه‌های پیرسازی دو مرحله‌ای شده؛ دمای پیرسازی مرحله اول  $205^{\circ}\text{C}$  و پیرسازی طبیعی مرحله دوم در زمان‌های مختلف



شکل ۴. منحنی‌های تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی نمونه‌های پیرسازی دو مرحله‌ای شده، دمای پیرسازی مرحله اول  $175^{\circ}\text{C}$  و پیرسازی طبیعی مرحله دوم در زمان‌های مختلف.



شکل ۵. منحنی تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی نمونه‌های پیرسازی دو مرحله‌ای شده؛ دمای پیرسازی مرحله اول  $190^{\circ}\text{C}$  و پیرسازی طبیعی مرحله دوم در زمان‌های مختلف.

تشکیل کامل و پایداری رسوبات نگردیده و در ادامه پیرسازی طبیعی به مدت ۱۰۰ h رسوبات ریز و پراکنده تشکیل شده و در نتیجه استحکام افزایش یافته است و انعطاف پذیری اندکی کاهش یافته است.

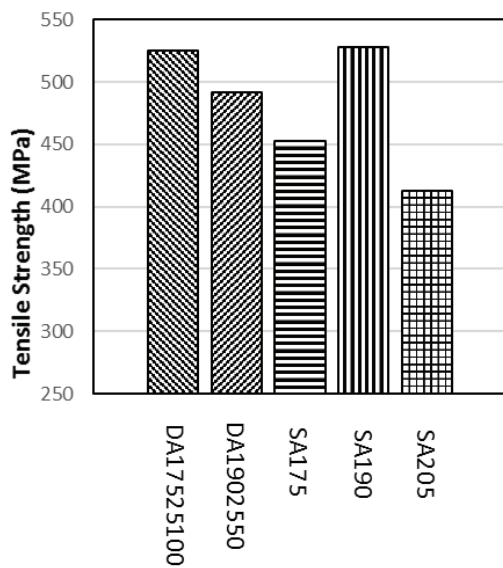
### پیرسازی دومرحله‌ای - دمای پیرسازی مرحله اول $190^{\circ}\text{C}$

نتایج به دست آمده از آزمایش کشش نمونه‌های پیرسازی دومرحله‌ای شده که دمای پیرسازی مرحله اول آن‌ها  $190^{\circ}\text{C}$  است در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود می‌توان گفت که انجام پیرسازی در مرحله دوم و به ازای تمام زمان‌ها، انعطاف پذیری بهبود ولی استحکام افت کرده است. به نظر می‌رسد علت این روند این‌گونه قابل توجیه است که با انجام پیرسازی مرحله اول در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  رسوبات از نظر توزیع و اندازه وضعیت مناسبی داشته بطوریکه نتایج شکل ۲ نیز تأیید کننده این امر است. با اعمال پیرسازی مجدد به صورت طبیعی، رسوبات با از دست دادن کارایی خود در بازدارندگی حرکت نابجایی‌ها سبب افت استحکام گردیده‌اند. در نمونه‌های پیرسخت شده

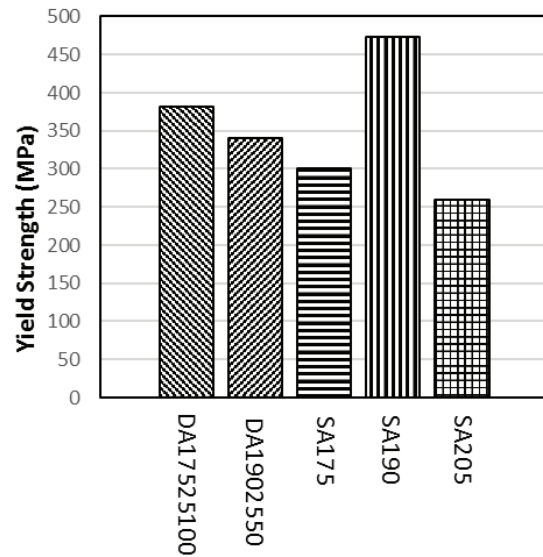
انعطاف پذیری از نمودارهای تنش- کرنش، استخراج و همراه با نتایج سختی در نمودارهای شکل ۷ ترسیم گردید. در بین نمونه‌های پیرسازی تک مرحله‌ای و سیکل‌های بهینه پیرسازی دومرحله‌ای، پیرسازی تک مرحله‌ای با دمای ۲۰۵°C اثری منفی بر خواص کششی آلیاژ دارد؛ زیرا همان‌طور که گفته شد به علت بالا بودن دمای پیرسختی مرحله اول، رسوبات به حالت فراپیری رسیده و با انجام عملیات حرارتی ثانویه، ریزساختار تغییر چندانی نداشته است و رسوبات شکل گرفته در مرحله اول پیر سختی دارای پایداری نسبتاً قابل توجهی است. طبق نمودارهای شکل ۴ و ۵ انجام پیرسازی

نتیجه گرفت که وقتی دمای مرحله اول پیرسازی ۲۰۵°C است، پیرسازی مجدد اثر نداشته است. اما این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که پیرسازی تک مرحله‌ای و دومرحله‌ای با دمای مرحله اول ۲۰۵°C نمی‌تواند سیکل مناسبی برای بهبود استحکام و نرمی آلیاژ باشد، زیرا به علت بالا بودن دمای رسوب سختی، ساختار دچار فراپیری شده است.

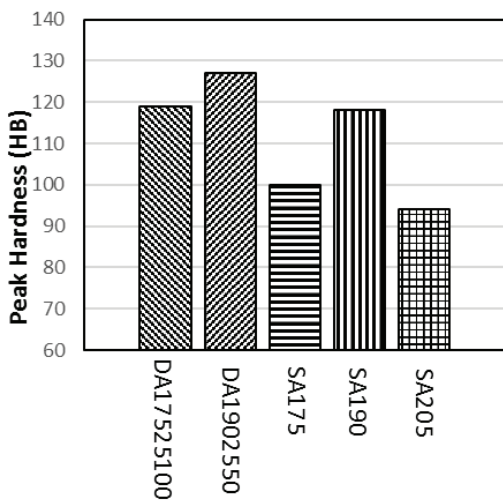
همان‌طور که در تمامی این نمودارها مشاهده می‌شود، بسته به دما و زمان پیرسازی، تغییرات خواص کششی متفاوت است. به‌منظور مقایسه نتایج جهت انتخاب سیکل بهینه رسوب سختی، مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی و



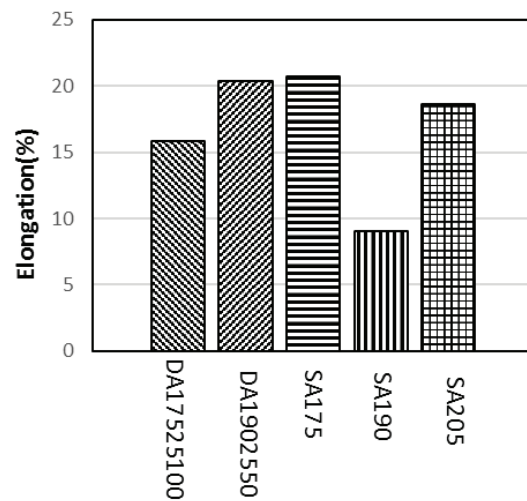
(ب)



(الف)

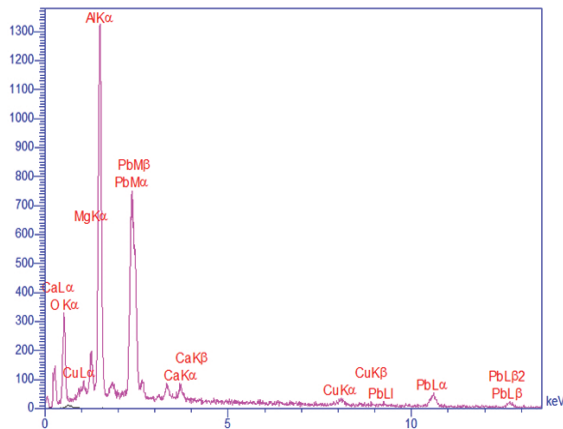
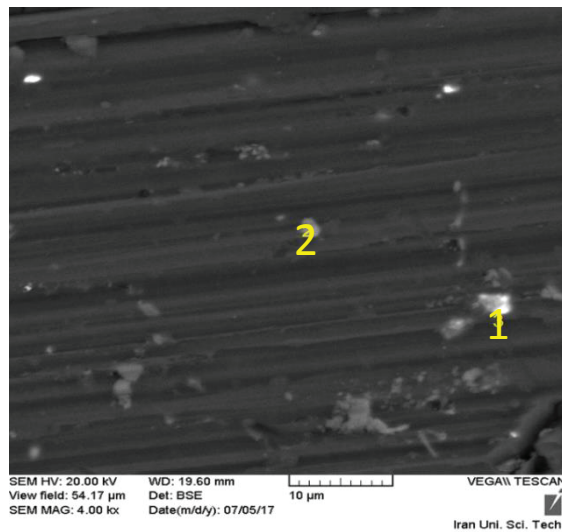
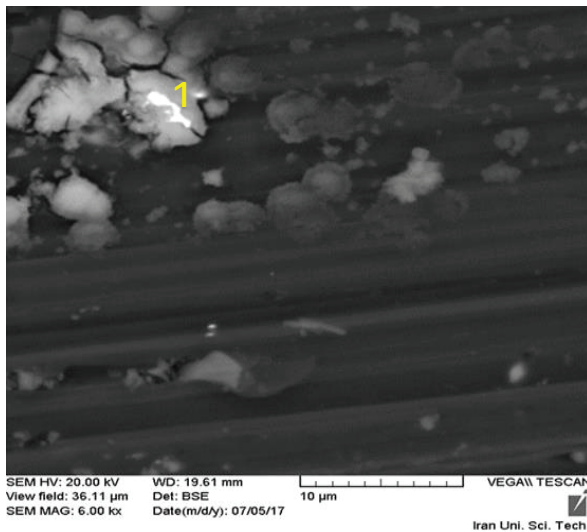


(ت)

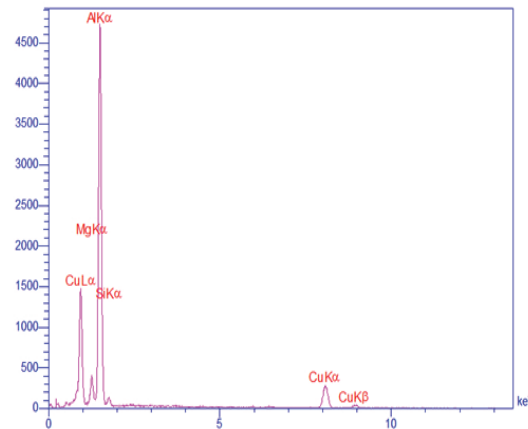


(پ)

شکل ۷. مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های پیرسازی یک مرحله‌ای شده با نمونه‌های DA17525100، DA1902550؛ (الف) استحکام تسلیم- (ب) استحکام کششی- (ج) انعطاف پذیری- (د) سختی



نقطه ۱



نقطه ۲

شکل ۸. تصاویر SEM و آنالیز EDS نمونه پیرسازی دو مرحله‌ای شده DA1902550

کششی می‌توان گفت استحکام تسلیم و استحکام کششی و انعطاف‌پذیری، افزایش قابل توجهی در مقایسه با داده‌های به دست آمده در سیکل تک مرحله‌ای دارند. در این میان سیکل DA1902550، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای خواص مکانیکی قید شده در شکل ۷، در مقایسه با سایر سیکل‌های مورد آزمایش در این تحقیق، مطلوب به نظر می‌رسد.

شکل ۸ تصویر SEM و آنالیز نقطه‌ای فازهای مربوط به سیکل بهینه رسوب سختی، یعنی سیکل DA1902550 را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد، این سیکل در بین تمامی سیکل‌های عملیات حرارتی در مجموع خواص بالاتری را داشته است، همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، فاز رسوبی  $Mg_2Pb$  به صورت خوشه‌ای در زمینه پخش شده است. گزارش شده است که فاز  $Mg_2Pb$  سبب بهبود خواص کششی و سختی آلیاژ می‌گردد و شکل خوشه‌ای رسوبات سبب بهبود خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد [۱۸ و ۱۹].

طبیعی در مرحله دوم عملیات حرارتی، منجر به تغییرات خواص گردیده است. در این میان نمونه‌های DA17525100 و DA1902550 که خواص مناسب‌تری را نسبت به دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهند. در واقع پیرسازی مرحله دوم منجر به تغییرات در کسر حجمی و اندازه رسوبات شده و در نتیجه خواص کششی و سختی تغییر کرده است. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهد، بهترین نتایج استحکام و انعطاف‌پذیری سیکل‌های عملیات حرارتی دومرحله‌ای، برای نمونه‌های DA1902550 و DA17525100 به دست آمده است. دلیل این امر، تشکیل رسوبات ثانویه به صورت خوشه‌ای در جاهای خالی تشکیل شده پس از کونچ مرحله اول است که در منابع [۱۳، ۱۹، ۲۰ و ۲۳] نیز تأیید اشاره است.

در این حالت استحکام افزایش چشمگیری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته ولی در عوض درصد ازدیاد طول تقریباً بدون تغییر است. با مقایسه نتایج به دست آمده در آزمایش

## References

- [1] Chen K, Liu H, Zhang Z, Li S, Todd RI. The improvement of constituent dissolution and mechanical properties of 7055 aluminum alloy by stepped heat treatments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;142(1):190-6.
- [2] Koch S, Abad MD, Renhart S, Antrekowitsch H, Hosemann P. A high temperature nanoindentation study of Al-Cu wrought alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;644:218-24.
- [3] Ambriz R, Jaramillo D. Mechanical behavior of precipitation hardened aluminum alloys welds. *Light Metal Alloys Applications: InTech*; 2014.
- [4] Lumley R, Polmear I, Morton A. Interrupted aging and secondary precipitation in aluminium alloys. *Materials Science and Technology*. 2003;19(11):1483-90.
- [5] Lumley R, Polmear I, Morton A, editors. *Temper developments using secondary ageing*. Materials Forum; 2004.
- [6] Alexopoulos ND, Velonaki Z, Stergiou CI, Kourkoulis SK. The effect of artificial ageing heat treatments on the corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 (Al-Cu) aluminium alloy. *Corrosion Science*. 2016;102:413-24.
- [7] Tsai JM-J. A study of interrupted aging in Al-Cu-Mg alloys: Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library; 2013.
- [8] Polmear I. *Light metals: from traditional alloys to nanocrystals*. Elsevier, Oxford. 2006.
- [9] Emani S, Benedyk J, Nash P, Chen D. Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions. *Journal of materials science*. 2009;44(23):6384-91.
- [10] Löffler H, Kovacs I, Lendvai J. Decomposition processes in Al-Zn-Mg alloys. *Journal of Materials Science*. 1983;18(8):2215-40.
- [11] Lumley R, Polmear I, Morton A. Development of mechanical properties during secondary aging in aluminium alloys. *Materials Science and Technology*. 2005;21(9):1025-32.
- [12] Buha J, Lumley R, Crosky A. Secondary ageing in an aluminium alloy 7050. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;492(1):1-10.
- [13] Marceau R, Sha G, Lumley R, Ringer S. Evolution of solute clustering in Al-Cu-Mg alloys during secondary ageing. *Acta Materialia*. 2010;58(5):1795-805.
- [14] Gao N, Starink M, Kamp N, Sinclair I. Application of uniform design in optimisation of three stage ageing of Al-Cu-Mg alloys. *Journal of materials science*. 2007;42(12):4398-405.
- [15] Mansourinejad M, Mirzakhani B. Influence of sequence of cold working and aging treatment on mechanical behaviour of 6061 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012;22(9):2072-9.
- [16] Nagai Y, Murayama M, Tang Z, Nonaka T, Hono K, Hasegawa M. Role of vacancy-solute complex in the initial rapid age hardening in an Al-Cu-Mg alloy. *Acta materialia*. 2001;49(5):913-20.
- [17] Marceau RK, Tsafnat N, Haley D, Ringer S. Solute diffusion characteristics of a rapid hardening Al-Cu-Mg alloy during the early stages of age hardening. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010;41(8):1887-90.
- [18] Mondolfo L. *Aluminum alloys. Structure and properties*. 1976;338.
- [19] Seyedrezai H, Grebennikov D, Mascher P, Zurob HS. Study of the early stages of clustering in Al-Mg-Si alloys using the electrical resistivity measurements. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;525(1):186-91.

## ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر پیرسختی دو مرحله‌ای بر خواص مکانیکی یک آلیاژ آلومینیوم-مس-منیزیم به منظور بهبود استحکام و سختی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و با پیرسازی تک مرحله‌ای مقایسه شد و نتایج کلی زیر حاصل گردید:

۱. افزایش دمای مرحله نخست پیرسازی در محدوده دمایی مشخصی  $175^{\circ}\text{C} - 190^{\circ}\text{C}$  مناسب ولی افزایش بیشتر دمای مرحله اول پیرسازی به  $205^{\circ}\text{C}$  و بالاتر از آن، سبب کاهش استحکام و افزایش انعطاف پذیری می‌گردد.
۲. با توجه به نتایج حاصله، پیرسازی مرحله اول در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  و مرحله دوم پیرسازی بصورت طبیعی به مدت ۵۰h خواص کششی و سختی آلیاژ را نسبت به سیار نمونه‌ها بهبود داده است.
۳. افزایش زمان پیرسازی طبیعی مرحله دوم، با تغییر در مورفولوژی و اندازه ذرات رسوبی باعث کاهش خواص کششی می‌شود.