

## Research Paper

### Effect of Deep Cryogenic Treatment on Precipitation Hardening of Aluminum 2024 and 7075

Fariborz Faraji<sup>1</sup>, \*Seyed Ebrahim Vahdat<sup>2</sup>, Hadi Nazarian<sup>3</sup>

1- MSc. Student, Naghsh Jahan Esfahan School University, Esfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

3- MSc., Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

**Citation:** Faraji F, Vahdat S.E, Nazarian H. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Precipitation Hardening of Aluminum 2024 and 7075. Metallurgical Engineering 2018; 21(3): 225-236 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.77520.1164>

**doi** : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.77520.1164>

#### **ABSTRACT**

Sub-zero treatment is an efficient method for increasing the efficiency of metal alloys. In addition, aging is a common method for increasing the ratio of the strength to weight of aluminum alloys 2024 and 7075 for using in a passenger aircraft. In this research, the effect of sub-zero treatment at temperature of  $-196^{\circ}\text{C}$  (deep cryogenic treatment) and time of 4 hours on the hardness of aluminum alloys 2024 and 7075 are studied. For this purpose, scanning electron microscopy (SEM) and scanning transmission electron microscopy (STEM) have been applied to study the microstructure. Also, tensile and hardness tests have been applied to study mechanical properties. The results show that the formation of precipitation around the particles (especially for iron particles) is facilitated by performing sub-zero treatment. Because the difference in the coefficient of iron contraction with the aluminum matrix at sub-zero treatment causes elements (such as copper in 2024 and magnesium in alloy 7075) are easier to absorb the areas around iron particles at aging temperature of  $100^{\circ}\text{C}$ . The new precipitates increased the yield strength of aluminum 2024 and 7075 compared to the control specimen, 32 and 20 MPa, respectively, and the tensile strength of aluminum 2024 and 7075 increased 26 and 21 MPa, respectively. While in both specimens, the change of hardness was not noticeable.

**Keywords:** Population density of particles; Liquid nitrogen; Heat treatment; Precipitation Hardening; Age Hardening.

■.....■  
**\* Corresponding Author:**

**Seyed Ebrahim Vahdat, PhD**

**Address:** Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

**Tel:** +98 (11) 43217129

**E-mail:** e.vahdat@iauamol.ac.ir

## اثر عملیات زیر صفر عمیق روی رسوب سختی آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵

فریبرز فرجی<sup>۱</sup>، سید ابراهیم وحدت<sup>۲</sup>، هادی نظریان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه غیرانتفاعی نقش جهان اصفهان، اصفهان، ایران.  
۲- استادیار، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

### چکیده

عملیات زیر صفر یک روش کارآمد برای افزایش کارایی آلیاژهای فلزی است و به علاوه، پیرسختی یک روش متداول برای افزایش نسبت استحکام به وزن آلیاژهای آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ به منظور استفاده در بدنه هواپیماهای مسافربری است. در این تحقیق، اثر عملیات زیر صفر در دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد (زیر صفر عمیق) با مدت زمان نگهداری ۴ ساعت روی میزان رسوب سختی آلیاژهای آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ مطالعه می‌شود. به همین منظور، برای مطالعه ریزساختار از میکروسکوپهای الکترونی روبشی (SEM) و روشی عبوری (STEM) استفاده شده است. همچنین، برای مطالعه خواص مکانیکی از آزمون کشش و سختی استفاده شده است. نتایج نشان داده است که با انجام عملیات زیر صفر، تشکیل ذرات رسوب در مجاورت ذرات موجود در زمینه بویژه برای ذره آهن، تسهیل می‌شود زیرا در دماهای زیر صفر، اختلاف ضریب انقباض آهن با زمینه آلومینیم موجب می‌شود تا در دمای پیرسختی برابر با ۱۰۰ درجه سانتیگراد، اتمهای عناصر آلیاژی (مانند مس در آلیاژ ۲۰۲۴ و منیزیم در آلیاژ ۷۰۷۵) راحت تر جذب نواحی اطراف ذره آهن شوند. تشکیل رسوبهای جدید موجب شده است که استحکام تسلیم آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳۲ و ۲۰ مگاپاسکال و همچنین استحکام کششی آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۶ و ۲۱ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. درحالیکه در هر دو جنس، سختی تغییر محسوسی نکرده است.

**واژه‌های کلیدی:** تعداد ذرات در واحد سطح؛ نیتروژن مایع؛ عملیات حرارتی؛ رسوب سختی؛ پیرسختی.

### ۱. مقدمه

در دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد و سپس گرمایش، گزارش کرده اند. بهبود استحکام در فرآیند فوق به ریزدانه شدن و رسوب ذرات جدید نسبت داده شده است.

بعلاوه، محمودی (۵) نشان داد که در آلیاژهای آلومینیم، ریزدانه شدن عامل بهبود استحکام است. وقتی که اندازه دانه از ۲ میکرومتر کمتر شود این اثر واضح تر است. زیرا ذرات ترکیبات بین فلزی موجود در مرزدانه، حرکت مرز دانه را کند می‌کنند.

شاعری و همکاران (۶) نشان دادند که پس از عملیات آنیل، پاس اول شکل‌دهی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ در کانالهای همسان زاویه دار موجب بهبود استحکام می‌شود در حالی که تکرار پاس‌ها موجب کاهش استحکام می‌شود. در آن پژوهش، بهبود استحکام به همگن شدن ریزساختار نسبت داده شده است.

به علاوه، مطالعات زیادی روی استفاده از دماهای پایین به منظور بهبود فرآیند شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیم (۷ و ۸) انجام شده است که اغلب آنها موفق بوده است.

بدنه هواپیماهای مسافربری از جنس آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ و یا آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ است. هر دو آلیاژ، قابل پیرسختی بوده و پس از پیرسختی، استحکام تسلیم آنها تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. در این شرایط، چگالی بسیار کم آلیاژهای نامبرده موجب می‌شود که استحکام ویژه این آلیاژها از مستحکم‌ترین فولادها فزونی یافته و لذا این آلیاژهای نسبتاً ارزان را برای کاربردهای عمومی در هوا-فضای رقیب می‌سازد (۱).

مطالعات روی آلیاژهای آلومینیم نشان داده است که نگهداری در سرمایش و سپس گرمایش موجب تغییر ریزساختار و در نهایت تغییر خواص خواهد شد.

به طور مثال، نایان و همکاران (۲، ۳) بهبود خواص کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را پس از فرارگیری در دماهای بسیار پایین (تا ۲۵۳- درجه سانتیگراد) و سپس گرمایش، گزارش کرده‌اند. همچنین، لی و همکاران (۴) بهبود استحکام و ریزدانه شدن آلیاژ آلومینیم گروه ۵۰۰۰ را پس از نگهداری

\* نویسنده مسئول:

دکتر سید ابراهیم وحدت

نشانی: آمل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی، دانشکده مهندسی.

تلفن: ۴۳۲۱۷۱۲۹ (۱۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: e.vahdat@iautamol.ac.ir

**جدول ۱.** ترکیب شیمیایی آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ مورد استفاده در پژوهش

نام عنصر	آلومینیم	سیلیسیم	مس	سرب	وانادیم	بور	منیزیم	آهن	روی	منگنز
۲۰۲۴ درصدوزنی	بقیه	۰/۱۴	۴/۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۱/۴	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۴۳
۷۰۷۵ درصدوزنی	بقیه	۰/۲۹	۱/۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۲/۳	۰/۲۱	۵/۳	۰/۱۶

(Scanning Transmission Electron Microscopy= STEM) با نام تجاری TITAN<sup>۱</sup> (هر دو) مجهز به طیف سنج تفکیک انرژی (Energy Dispersive Spectroscopy= EDS) استفاده شده است. برای اندازه گیری مقاومت کششی از دستگاه GOTECH 7100L بهره گرفته شده است. برای تامین صحت و دقت نتایج از مراکز آزمایشگاهی معتبر (مورد تایید موسسه استاندارد ایران) استفاده شده است.

برای عملیات زیرصفر عمیق، مطابق شکل ۱، ابتدا در مخزن پایینی دستگاه، بیست لیتر نیتروژن مایع ریخته شد. سپس از هر جنس، ۴ نمونه آزمون کشش و ۱ نمونه آزمون ریزساختار در مخزن بالایی قرار داده شد تا با سرعت ۱ درجه سانتیگراد در دقیقه تا دمای ۶۰- درجه سانتیگراد سرد شود. بلافاصله تمام نمونه‌ها از طریق دریچه تعبیه شده در مخزن بالایی به داخل مخزن پایینی، حاوی نیتروژن مایع خالص با دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد، به مدت ۴ ساعت غوطه ور شدند. در آخر، نمونه‌ها از مخزن خارج شده و در هوا به دمای اتاق رسیدند. برای تشکیل رسوب جدید، تمام نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ ساعت قرار داده شدند. چرخه<sup>۲</sup> روش پژوهش در شکل ۲ و گردش کار<sup>۳</sup> آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



**شکل ۱.** دستگاه عملیات زیرصفر ساخت دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی

1. Material Science and Biomaterials Department, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

2. Cycle

3. Flow chart

در هر صورت، دلیل این بهبودی‌ها به ریزساختار بر می‌گردد حال آنکه پس از عملیات زیرصفر و گرمایش، مطالعات زیادی روی ریزساختار آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ انجام نشده است. هدف از این پژوهش، پاسخ به برخی از این ابهامات است.

از طرف دیگر، لی و همکاران (۹) تنش ناشی از اختلاف ضریب انقباض فاز با زمینه را در فولادهای ابزار پرکربن یکسوم تنش ناشی از استحاله آستنیت باقیمانده به مارتنزیت گزارش کردند و دریافتند که در تشکیل رسوب ثانویه، تنش ناشی از اختلاف ضریب انقباض فاز با زمینه اثر کمتری دارد. فرضیه این است که اختلاف در ضریب انقباض حرارتی آلومینیم و فازهای موجود در زمینه (مانند ناخالصی آهن و ترکیبات بین فلزی اولیه) در دمای زیرصفر موجب بوجود آمدن تنش و نهایتاً حلقه نابجایی در اطراف ذرات شده و با گذشت زمان حلقه نابجایی گسترش می‌یابد. سپس در دمای برگشت، جذب اتم‌های آلیاژی (تشکیل دهنده رسوبهای جدید) به سمت مناطق پرتنش (حلقه نابجایی) موجود در اطراف ذرات، تسهیل شده و لذا رسوب جدید تشکیل می‌شود. در آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ نفوذ برای اتمهایی متصور است که شعاع اتمی نزدیک به آلومینیم یعنی ضریب نفوذ بالا (مانند منیزیم و مس) در زمینه آلومینیم داشته باشند.

با توجه به توضیحات فوق، برای دستیابی به حداکثر اختلاف در ضریب انقباض حرارتی بین ذره و زمینه از دمای زیر صفر برابر با ۱۹۶- درجه سانتیگراد (یعنی دمای نیتروژن مایع خالص) و یا به عبارت دیگر، عملیات زیرصفر عمیق، استفاده شده است.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، برای هر جنس، از سه عدد نمونه به قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر برای مطالعه ریزساختار و سختی، و از دوازده عدد نمونه آزمون کشش با مقطع گرد مطابق با استاندارد ASTM A370-12a استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ هر دو با سابقه T6، در جدول ۱ فهرست شده است.

برای مطالعه ریزساختار از میکروسکپ الکترونی روبشی با تفنگ میدان نشی (Field Emission gun Scanning Electron Microscopy= FESEM) با نام تجاری TESCAN MIRA3 و همچنین میکروسکپ الکترونی روبشی-عبوری

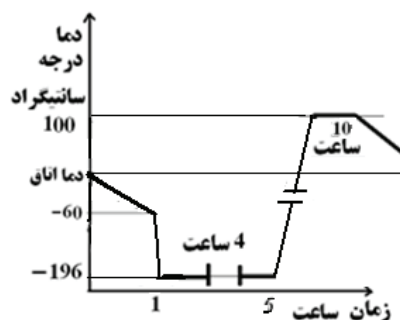
اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی  $AlCu_xMg_ySi_z$  هستند. در نمودار فازی آلومینیم-سرب، سرب و آلومینیم ترکیب یا محلولی با هم تشکیل نمی‌دهند لذا ذره D سرب خالص است منتهی آلومینیم موجود در EDS آن از زمینه ناشی می‌شود و متعلق به ذره نیست.

در نمونه شاهد ۷۰۷۵ (شکل ۵)، مشاهده می‌شود ذره تیره شامل ذره ۳ غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم، منیزیم و سیلیسیم است. درحالیکه ذرات کمی روشنتر شامل ذره ۱ حاوی مقداری از عناصر به نسبت سنگین مانند مس و روی است. به علاوه، ذرات خیلی روشنتر شامل ذره ۲ حاوی عناصر سنگین تری نسبت به ذره ۱ مانند آهن، منگنز و کروم است. ترکیب  $Al_2Cu$  شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالی‌که ذرات ۱ و ۳ ذرات غنی از مس، سیلیسیم و منیزیم بین ۶/۵ تا ۳۳/۲ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی  $AlCu_xMg_ySi_z$  هستند. همچنین در زمینه نمونه شاهد مقداری روی و منیزیم شناسایی شده است.

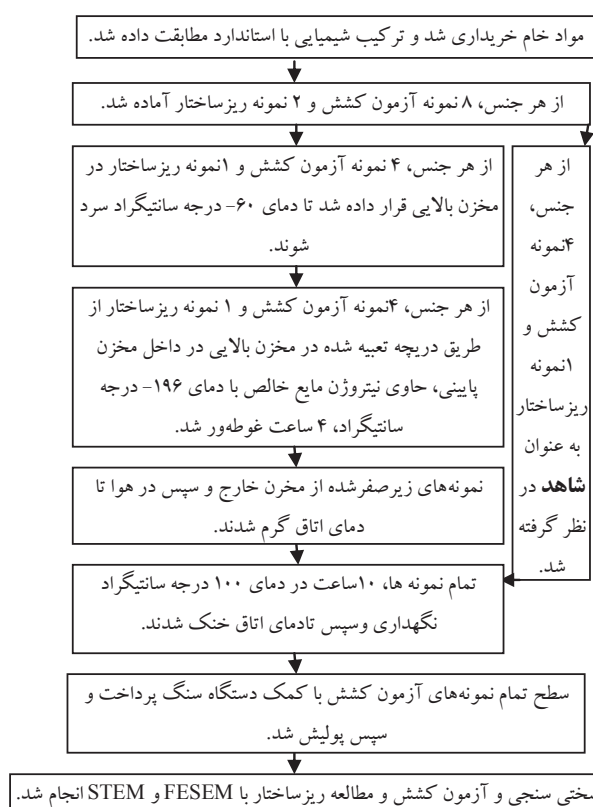
در نمونه زیر صفر عمیق شده ۲۰۲۴ (شکل ۶)، مشاهده می‌شود ذرات تیره شامل ذرات A,B,C,D غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم و منیزیم (به ویژه برای ذره A) است. ترکیب  $Al_2Cu$  شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالیکه ذرات A,B,C,D ذرات این ذرات مس بین ۵/۵ تا ۲۲ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی  $AlCu_xMg_ySi_z$  هستند. در ذرات B,C,D ذره آهن تا ۶ درصد اتمی وجود دارد درحالیکه ذره A تقریباً فاقد آهن و حاوی حدود ۵۸/۵ درصد اتمی آلومینیم و ۲۲ درصد اتمی مس و ۱۹ درصد اتمی منیزیم است به این ترتیب ترکیب شیمیایی ذره A به صورت  $Al_3CuMg$  است.

در نمونه زیر صفر عمیق شده ۷۰۷۵ (شکل ۷)، ذره تیره شامل ذره ۳ غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم، منیزیم و سیلیسیم است. درحالیکه ذرات کمی روشنتر شامل ذره ۱ حاوی مقداری از عناصر به نسبت سنگین مانند مس، آهن، کرم و منگنز مجموعاً ۱۶ درصد اتمی است. به علاوه، ذرات خیلی روشنتر شامل ذره ۲ حاوی مقادیر بیشتری از عناصر به نسبت سنگین مانند مس و روی نسبت به ذره ۱ مجموعاً ۱۷/۴ درصد اتمی است. ترکیب  $Al_2Cu$  شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالیکه ذرات ۱ و ۳ ذرات غنی از مس، سیلیسیم و منیزیم بین ۶/۸ تا ۳۶/۵ درصد اتمی هستند بنابراین این ذرات ترکیبات میانی  $AlCu_xMg_ySi_z$  هستند. همچنین در زمینه نمونه شاهد مقداری روی و منیزیم شناسایی شده است.

در شکل ۸، نقشه جانمایی عناصر نمونه شاهد ۷۰۷۵ به نمایش درآمده است که به طور کیفی نشان می‌دهد در زمینه ذرات موجود غنی از مس و منیزیم هستند در حالی که عنصر روی بیشتر در زمینه پخش شده‌اند.



شکل ۲. چرخه عملیات زیرصفر در دمای -۱۹۶- درجه سانتیگراد

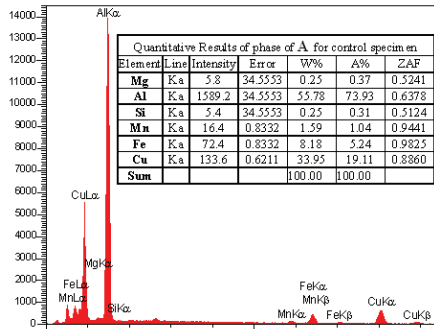
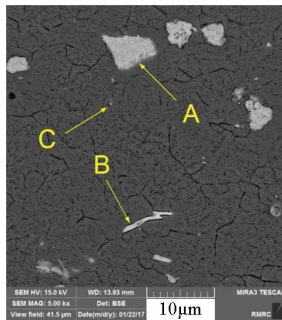


شکل ۳. نمودار گردش کار روش تحقیق

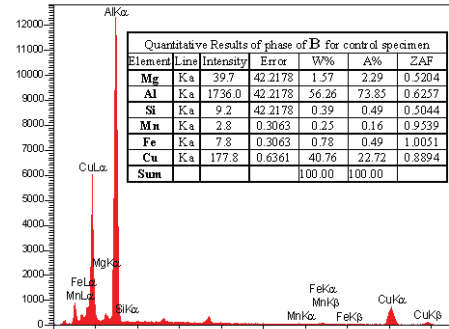
### ۳. نتایج و بحث

با کمک EDS ترکیب شیمیایی ذرات در نمونه‌های شاهد ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ و نمونه زیرصفر عمیق شده ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در شکل‌های ۴ تا ۷ به نمایش گذاشته شده است.

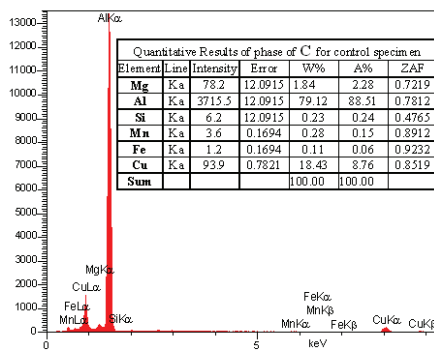
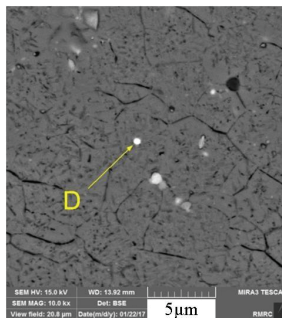
در نمونه شاهد ۲۰۲۴ (شکل ۴)، مشاهده می‌شود ذرات تیره شامل ذرات A,B,C غنی از عناصر به نسبت سبک مانند آلومینیم و سیلیسیم است درحالیکه ذرات روشن شامل ذره D غنی از عناصر به نسبت سنگین مانند سرب است. ترکیب  $Al_2Cu$  شامل ۳۳/۳ درصد اتمی مس و بقیه آلومینیم می‌شود درحالیکه ذرات A,B,C ذرات غنی از مس بین ۹ تا ۲۳ درصد



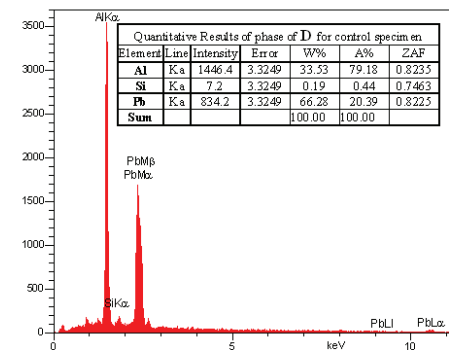
ذره A



ذره B

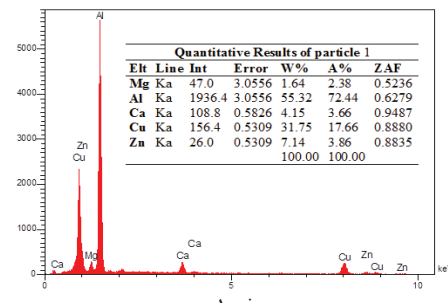
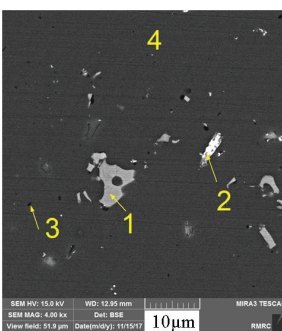


ذره C

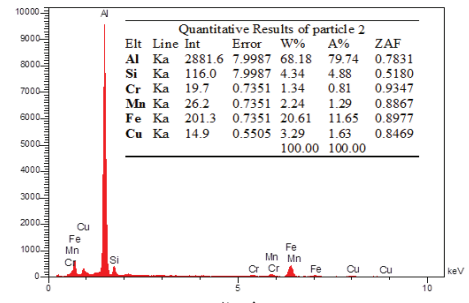


ذره D

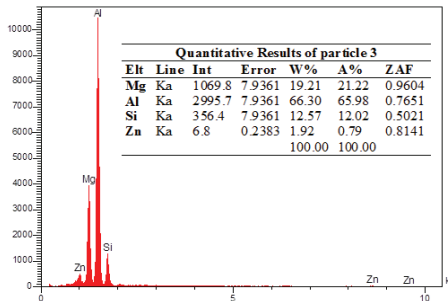
شکل ۴. EDS ذرات در نمونه شاهد ۲۰۲۴



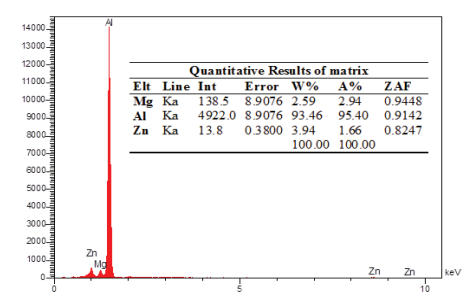
ذره ۱



ذره ۲

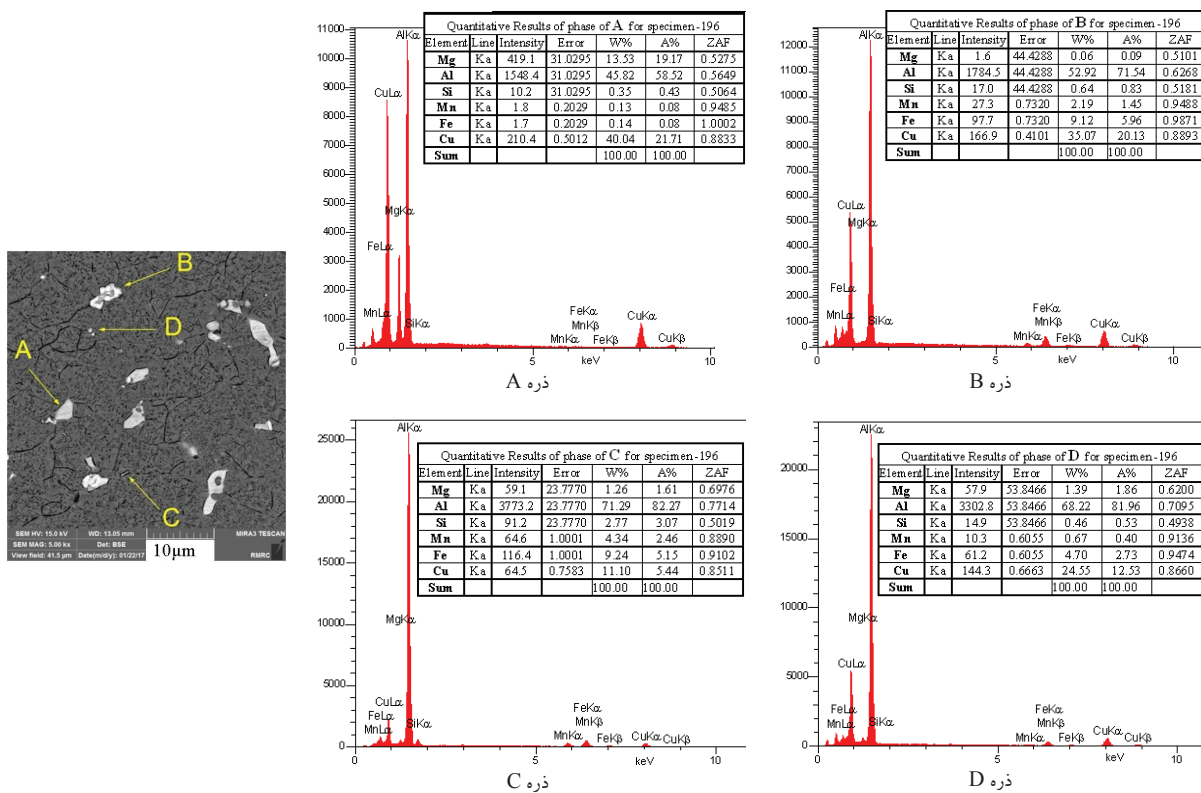


ذره ۳

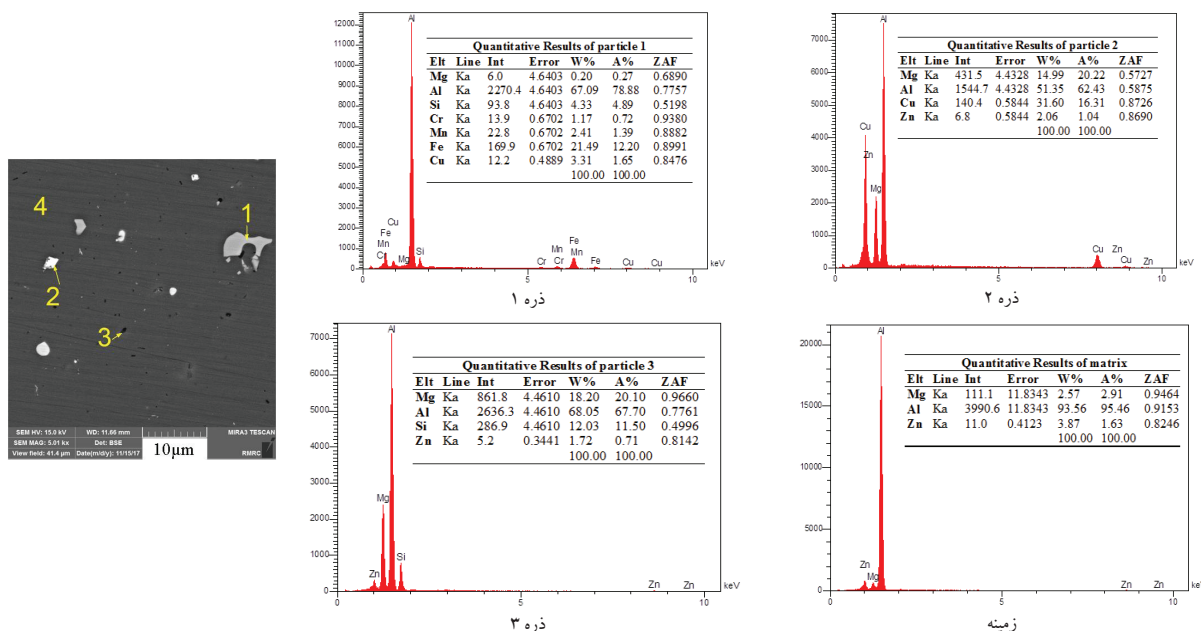


زمینه

شکل ۵. EDS ذرات در نمونه شاهد ۲۰۷۵



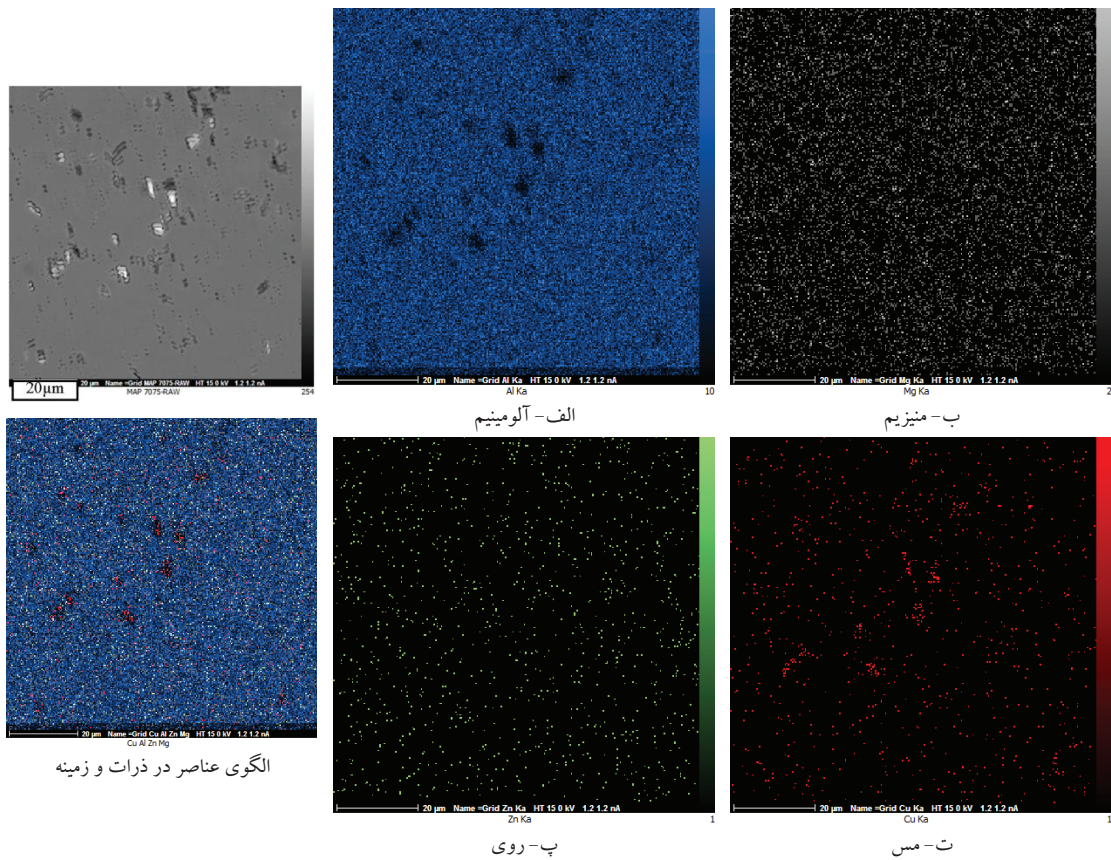
شکل ۶. EDS ذرات در نمونه زیر صفر عمیق شده ۲۰۲۴



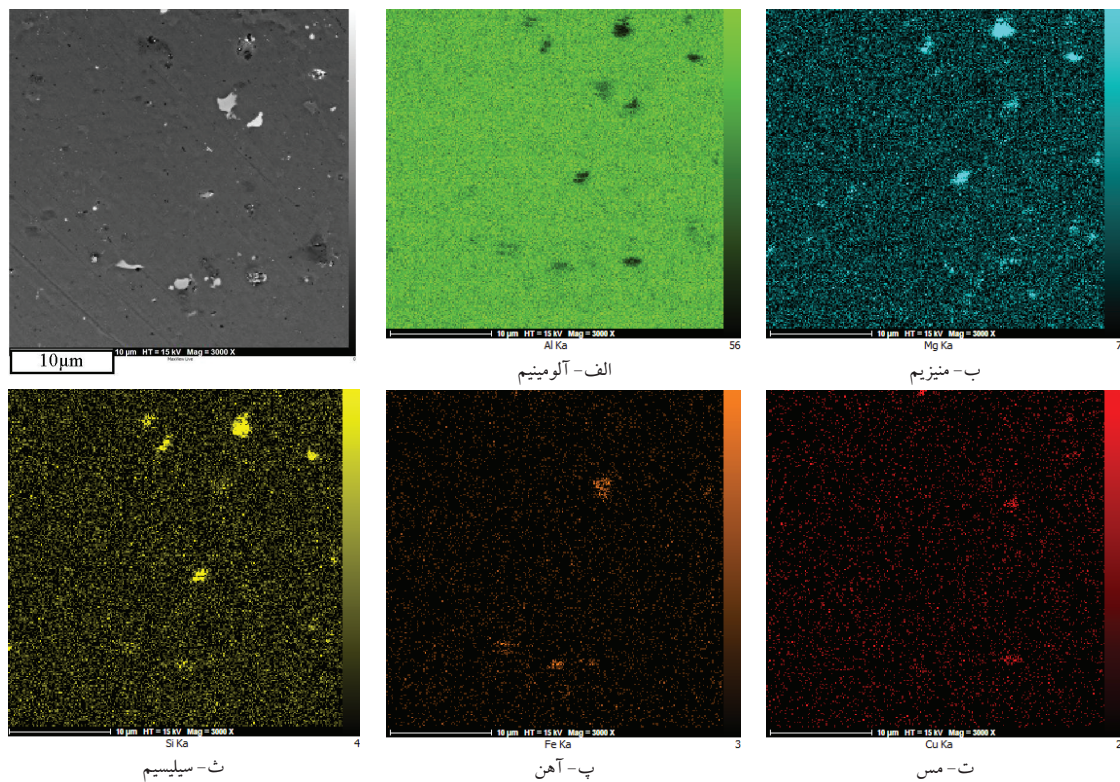
شکل ۷. EDS ذرات در نمونه زیرصفر عمیق شده ۷۰۷۵

هستند و به علاوه، در اطراف ذره آهن، ذرات غنی از مس و منیزیم وجود دارد. به این ترتیب، ذرات جدید غنی از مس و منیزیم در مجاورت ذرات آهن تشکیل شده‌اند.

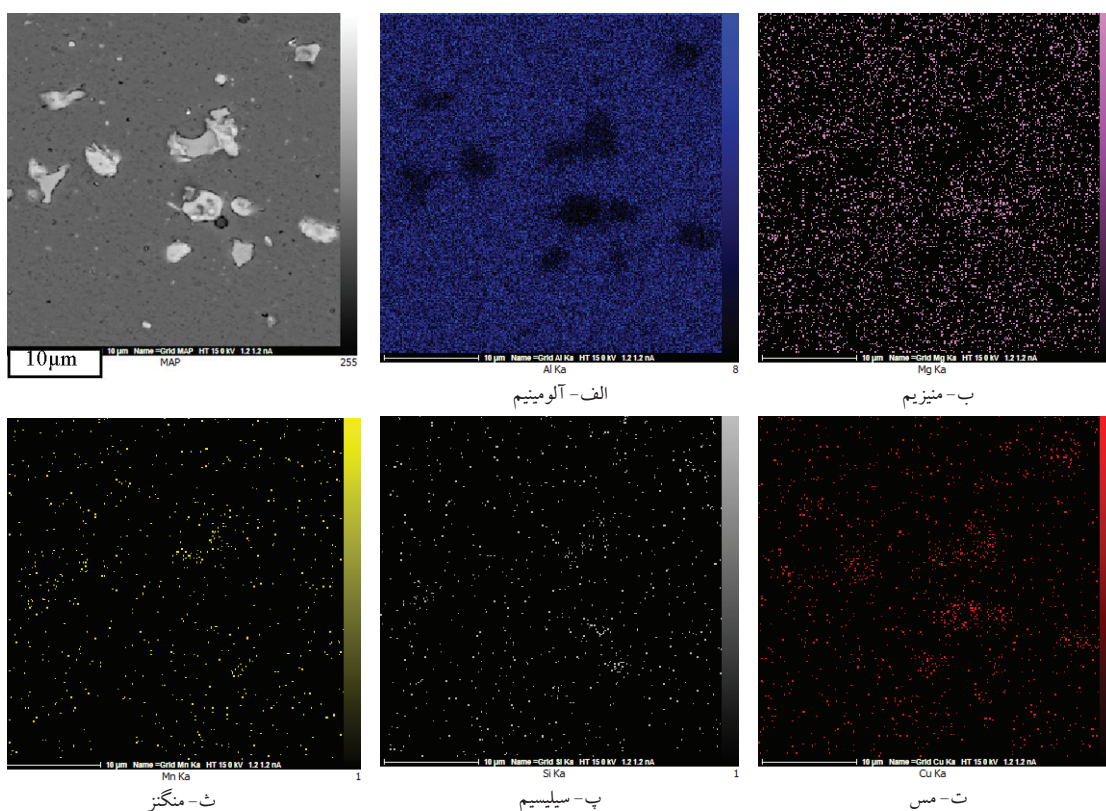
در شکل ۹، نقشه جانمایی عناصر نمونه زیرصفر شده ۷۰۷۵ به نمایش درآمده است که به طور کیفی نشان می‌دهد در زمینه ذرات موجود غنی از مس، سیلیسیم و منیزیم



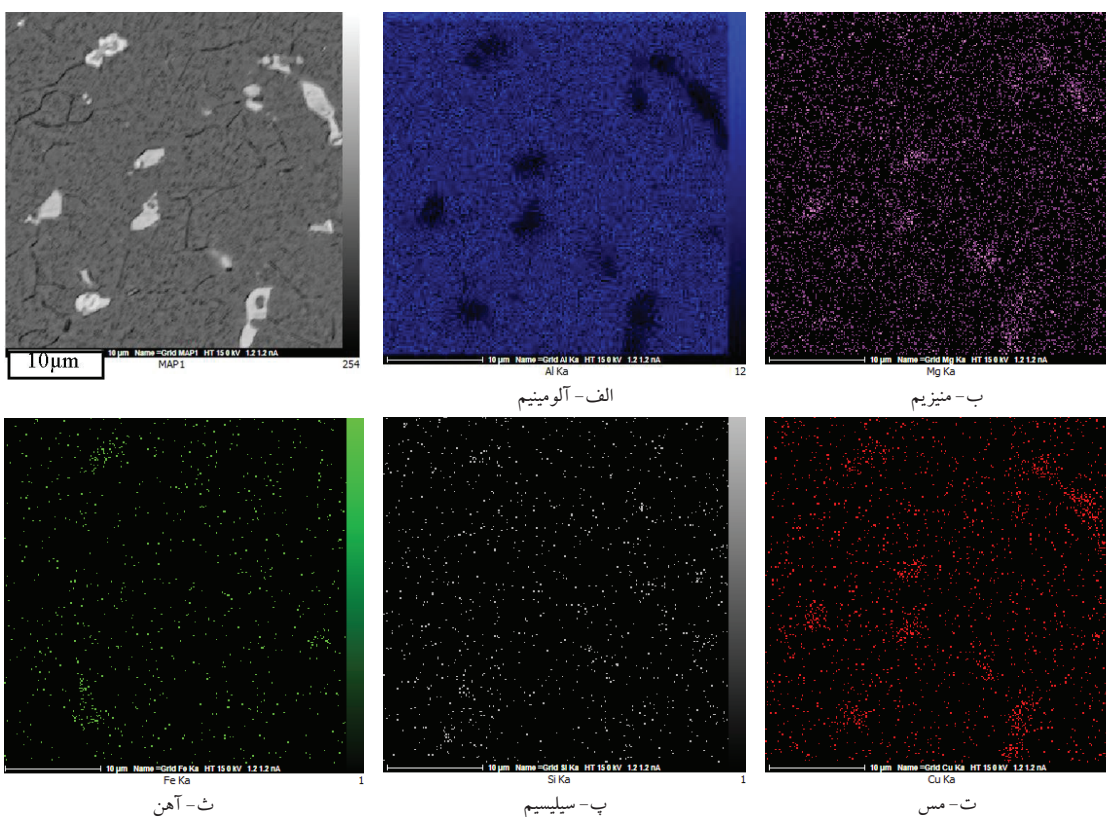
شکل ۸. نقشه جانمایی عناصر آلومینیم، مس، روی، منیزیم در نمونه شاهد آلومینیم ۷۰۷۵، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی



شکل ۹. نقشه جانمایی عناصر آلومینیم، مس، سیلیسیم، منیزیم و آهن در نمونه زیرصفر عمیق شده آلومینیم ۷۰۷۵، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی



شکل ۱۰. نقشه جانمایی عناصر آلومینیم، مس، روی، منیزیم و منگنز در نمونه شاهد آلومینیم ۲۰۲۴، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی

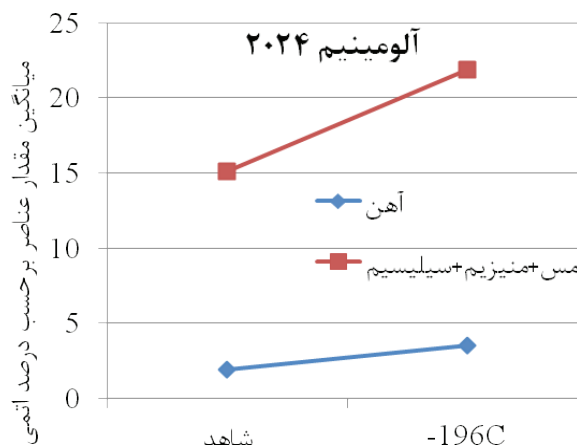


شکل ۱۱. نقشه جانمایی عناصر آلومینیم، مس، روی، منیزیم و منگنز در نمونه زیرصفر عمیق شده آلومینیم ۲۰۲۴، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی

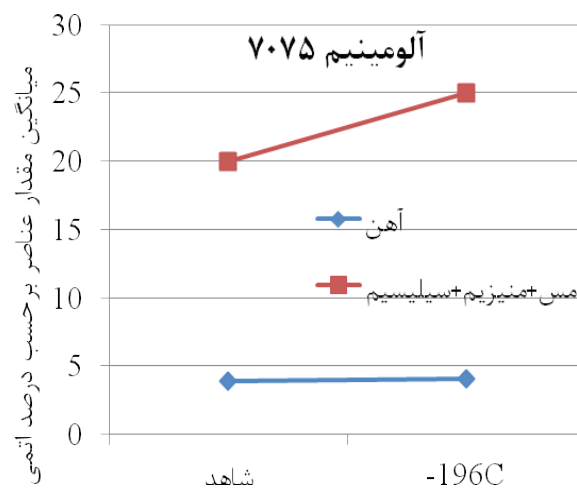


تغییر محسوسی نکرده است زیرا مطابق شکل ۱۴ و شکل ۱۵، ذراتی که با انجام عملیات زیرصفر تشکیل شده اند ترکیبات میانی  $AlCu_xMg_ySi_z$  با ساختار هگزاگونال با قاعده مرکزدار با اندازه بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) هستند که بیشتر استحکام تسلیم و کمتر استحکام کششی را افزایش میدهند و بر روی سختی تاثیر ناچیزی دارند.

مطابق جدول ۲، با انجام عملیات زیرصفر عمیق در دمای  $-196^{\circ}C$  درجه سانتیگراد، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه زیر صفر عمیق شده  $2024$  نسبت به نمونه شاهد  $2024$  به ترتیب  $32$  مگاپاسکال و  $26$  مگاپاسکال افزایش پیدا کرد زیرا تعداد ذرات در واحد سطح (چگالی تعداد ذرات) در نمونه شاهد نسبت به نمونه زیرصفر عمیق شده از  $5547$  به  $7858$  ذره در هر میلیمتر مربع افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۲. مقدار میانگین عناصر آلیاژی در ذرات بر حسب درصد اتمی برای نمونه‌های شاهد و زیرصفر عمیق شده  $2024$



شکل ۱۳. مقدار میانگین عناصر آلیاژی در ذرات بر حسب درصد اتمی برای نمونه‌های شاهد و زیرصفر عمیق شده  $7075$

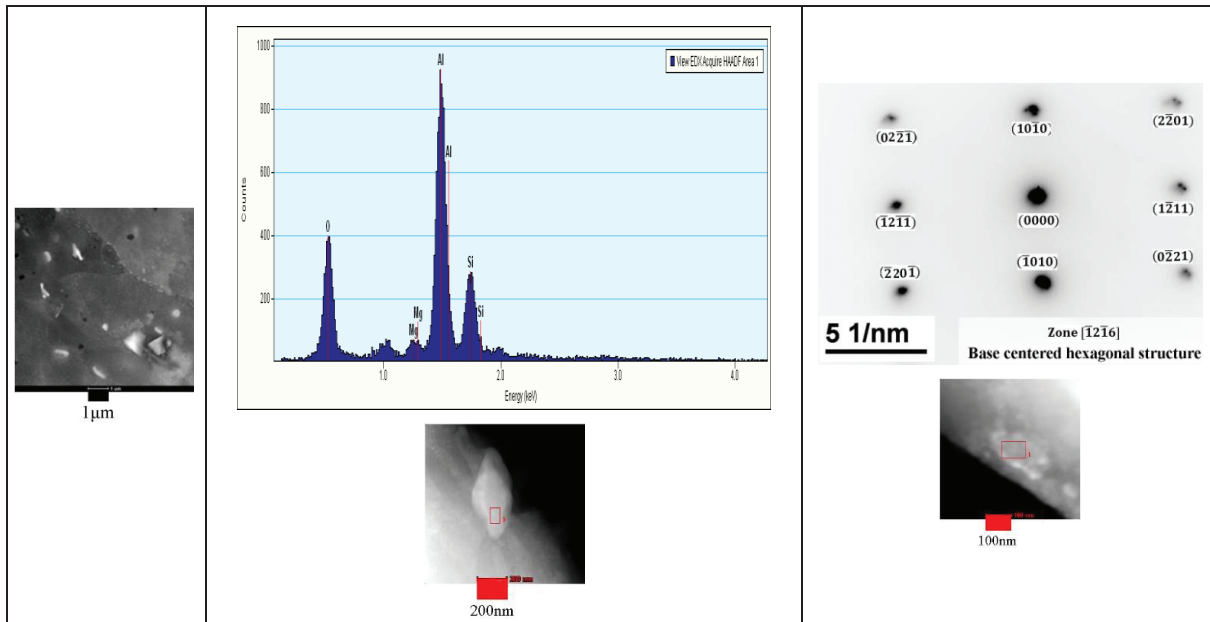
به طور مشابه، در شکل ۱۰، نقشه جانمایی عناصر نمونه شاهد  $2024$  به نمایش درآمده است که به طور کیفی نشان می‌دهد در زمینه ذرات موجود غنی از مس، منیزیم و گاهی سیلیسیم و منگنز هستند.

به طور مشابه، در شکل ۱۱، نقشه جانمایی عناصر نمونه زیرصفر شده  $2024$  به نمایش درآمده است که به طور کیفی نشان می‌دهد ذرات موجود غنی از مس، منیزیم و گاهی سیلیسیم هستند و به علاوه، در اطراف ذره آهن، ذرات غنی از مس و منیزیم وجود دارد. به این ترتیب، ذرات جدید غنی از مس و منیزیم در مجاورت ذرات آهن تشکیل شده اند.

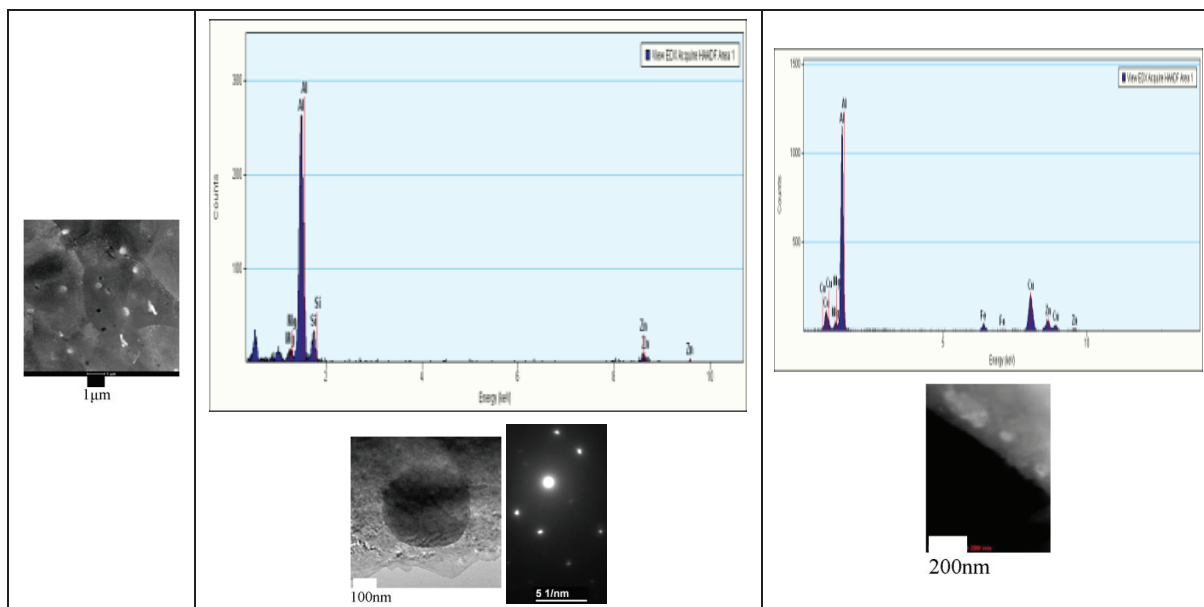
در شکل ۱۲ و شکل ۱۳، مقدار میانگین عناصر آلیاژی در ذرات بر حسب درصد اتمی به ترتیب برای نمونه‌های شاهد و زیرصفر عمیق شده  $2024$  و  $7075$  مقایسه شده است. در نمونه‌های شاهد و زیرصفر عمیق شده هر دو جنس ( $2024$  و  $7075$ ) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار عنصر آهن (به ترتیب برای  $2024$  از  $1/9$  به  $3/5$  درصد اتمی و برای  $7075$  از  $3/9$  به  $4/1$  درصد اتمی)، مجموع مقدار میانگین عناصر آلیاژی مس، منیزیم و سیلیسیم در ذرات (که تشکیل دهنده ذرات هستند) رو به افزایش (به ترتیب برای  $2024$  از  $15/1$  به  $21/9$  درصد اتمی و برای  $7075$  از  $20$  به  $25$  درصد اتمی) است. این بدان معنی است که با انجام عملیات زیرصفر شرایط تشکیل (رسوب) ذرات در دمای  $100^{\circ}C$  درجه سانتیگراد (دمای پیرسازی) تسهیل می‌شود.

اختلاف در ضریب انقباض حجمی آهن (حدود  $1$  درصد) با ضریب انقباض حجمی زمینه آلومینیم (حدود  $2$  درصد) سبب ایجاد تنش و در نتیجه سبب تشکیل نایجابی می‌شود. این نایجابیها در دمای پیرسازی ( $100^{\circ}C$  درجه سانتیگراد) رسوبگذاری ذرات را در اطراف ذره آهن، ترغیب می‌کنند. به عبارت دیگر، مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مجموع مقدار میانگین عناصر مس (با شعاع اتمی  $1/28$  آنگستروم)، منیزیم (با شعاع اتمی  $1/60$  آنگستروم) و سیلیسیم (با شعاع اتمی  $1/17$  آنگستروم) که تشکیل دهنده ذرات  $AlCu_xMg_ySi_z$  (با شعاع اتمی آلومینیم برابر با  $1/43$  آنگستروم) هستند در نمونه‌های زیرصفر عمیق شده نسبت به نمونه شاهد در هر دو جنس ( $2024$  و  $7075$ ) بیشتر است. به این ترتیب، عملیات زیرصفر عمیق موجب جذب بیشتر اتمهای مس و منیزیم و کمتر سیلیسیم برای تشکیل رسوب  $AlCu_xMg_ySi_z$  می‌شود و یا به عبارت دیگر، شرایط تشکیل رسوب  $AlCu_xMg_ySi_z$  را تسهیل می‌کند منتهی چون دمای برگشت پایین ( $100^{\circ}C$  درجه سانتیگراد) است لذا فاصله نفوذ کوتاه است بنابراین برای آلومینیم  $2024$  مطابق شکل ۱۴ و برای آلومینیم  $7075$  مطابق شکل ۱۵، ذرات تشکیل شده بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) هستند.

در این پژوهش، مطابق جدول ۲، در تمام نمونه‌ها، سختی



شکل ۱۴. تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی-عبوری از ذرات رسوب در نمونه زیرصفر شده آلومینیم ۲۰۲۴



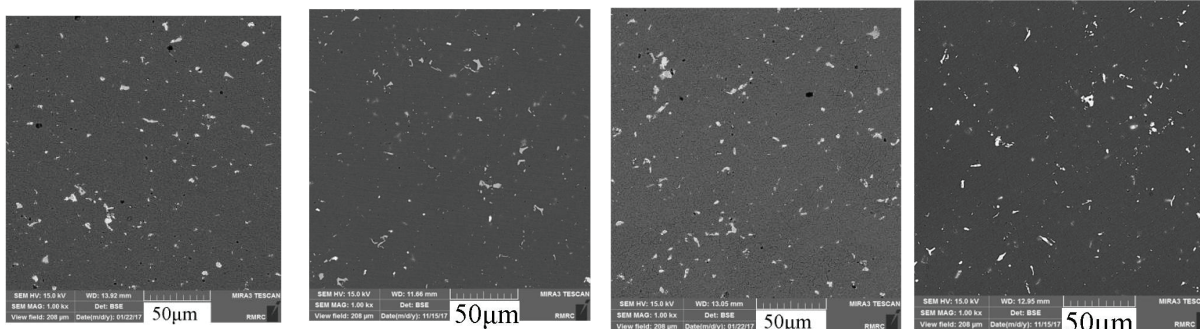
شکل ۱۵. تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی-عبوری از ذرات رسوب در نمونه زیرصفر شده آلومینیم ۲۰۷۵

نتایج فوق در تطابق با نتایج نایان و همکاران (۲, ۳) است. آنها دریافتند که دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد از دید طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را به ترتیب ۲ درصد، ۴۵ مگاپاسکال و ۷۹ مگاپاسکال نسبت به دمای محیط افزایش می‌دهد و همچنین، دمای ۲۵۳- درجه سانتیگراد از دید طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی آلیاژ آلومینیم ۲۱۹۵ را به ترتیب ۲ درصد،

به طور مشابه، با انجام عملیات زیرصفر عمیق در دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه زیر صفر عمیق شده ۲۰۷۵ نسبت به نمونه شاهد ۲۰۷۵ به ترتیب ۲۰ مگاپاسکال و ۲۱ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد زیرا تعداد ذرات در واحد سطح (چگالی تعداد ذرات) در نمونه شاهد نسبت به نمونه زیرصفر عمیق شده از ۶۸۱۶ به ۱۰۸۳۳ ذره در هر میلیمتر مربع افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲. میانگین نتایج، تعداد ذرات در واحد سطح، سختی سنجی، استحکام تسلیم و استحکام کششی تمام نمونه‌ها

نمونه	چگالی تعداد ذرات $\text{mm}^{-2}$	سختی	استحکام تسلیم مگاپاسکال	استحکام کششی مگاپاسکال
شاهد ۲۰۲۴	۵۵۴۷±۵%	۱۲۸±۳% ویکرز	۳۶۶±۳%	۴۳۷±۳%
زیرصفر عمیق شده ۲۰۲۴	۷۸۵۸±۵%	۱۲۷±۳% ویکرز	۳۹۸±۳%	۴۶۳±۳%
شاهد ۷۰۷۵	۶۸۱۶±۵%	۱۴۴±۳% برینل	۶۴۸±۳%	۶۹۰±۳%
زیرصفر عمیق شده ۷۰۷۵	۱۰۸۳۳±۵%	۱۴۴±۳% برینل	۶۶۸±۳%	۷۱۱±۳%



الف- شاهد ۲۰۲۴، میانگین چگالی تعداد ذرات ۵۵۴۷ بر میلی‌متر مربع

ب- شاهد ۷۰۷۵، میانگین چگالی تعداد ذرات ۶۸۱۶ بر میلی‌متر مربع

پ- زیرصفر عمیق شده ۲۰۲۴، میانگین چگالی تعداد ذرات ۷۸۵۸ بر میلی‌متر مربع

ت- زیرصفر عمیق شده ۷۰۷۵، میانگین چگالی تعداد ذرات ۱۰۸۳۳ بر میلی‌متر مربع

شکل ۱۶. مقایسه تعداد ذرات در واحد سطح در تمام نمونه‌ها

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر دمای زیرصفر عمیق (۱۹۶- درجه سانتیگراد) روی ریزساختار و خواص کششی آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ که در ساخت بدنه هواپیماهای مسافربری کاربرد فراوان دارد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با انجام عملیات زیرصفر در دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد:

- ۱- تعداد ذرات رسوب در واحد سطح، در هر دو جنس، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.
- ۲- برای تشکیل رسوب، مکان ترجیحی در مجاورت ذرات موجود در زمینه بویژه برای ذره آهن، می‌باشد.
- ۳- تشکیل رسوبهای جدید با اندازه بسیار ریز (کمتر از یک میکرومتر) موجب شده است که استحکام تسلیم و استحکام کششی آلومینیم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ زیرصفر عمیق شده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳۲ و ۲۰ مگاپاسکال و ۲۶ و ۲۱ مگاپاسکال افزایش پیدا کند اما سختی تقریباً بدون تغییر بماند.

۹۳ مگاپاسکال و ۱۳۹ مگاپاسکال نسبت به دمای محیط افزایش می‌دهد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری آنها نشان داد که تشکیل رسوبات صفحه‌ای شکل جدید  $\text{Al}_2\text{CuLi}$  با همان ساختار زمینه آلومینیم که روی خانواده صفحات {۱۱۱} رسوب کرده اند عامل این بهبودی هستند.

همچنین، یافته فوق در تطابق با یافته لی و همکاران (۴) است. آنها دریافتند که عملیات زیرصفر در دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد تا مدت ۴۸ ساعت، دانه‌بندی آلیاژ آلومینیم-روی-منیزیم-مس را ریز می‌کند و نانو ذرات تا اندازه ۴۰ نانومتر در ریزساختار تشکیل می‌دهد که نتیجه آن بهبود در استحکام است.

برای مقایسه، تصویر تعداد ذرات در واحد سطح نمونه‌های شاهد و زیر صفر عمیق شده ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.

## References

- [۱] مترجمین: طهماسبی، ا. اسدی خ، محمودی ر، (نویسنده: پالمیر). آلیاژهای سبک: آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم. تهران: ارکان دانش؛ ۱۳۹۳. ۳۲۴ صفحه.
- [2] Nayan N, Narayana Murty SVS, Jha AK, Pant B, Sharma SC, George KM, et al. Mechanical properties of aluminium-copper-lithium alloy AA2195 at cryogenic temperatures. *Materials & Design*. 2014;58:445-50.
- [3] Nayan N, Narayana Murty SVS, Mukhopadhyay AK, Prasad KS, Jha AK, Pant B, et al. Ambient and cryogenic tensile properties of AA2195T87 sheets with pre-aging cold work by a combination of cold rolling and stretching. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;585:475-9.
- [4] Li CM, Cheng NP, Chen ZQ, Guo N, Zeng SM. Deep-cryogenic-treatment-induced phase transformation in the Al-Zn-Mg-Cu alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2015;22(1):68-77.
- [5] Mahmudi R. Grain boundary strengthening in a fine grained aluminium alloy. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1995;32(5):781-6.
- [۶] شاعری مح، شاعری م، صالحی م، سیدین س، ابوطالبی م، بررسی اثر فرآیند ECAP بر بافت آلیاژ آلومینیوم ۲۰۷۵. *مهندسی متالورژی*. ۲۰۱۵. ۱۷(۵۶): ۴۹-۵۷.
- [7] Schneider R, Grant RJ, Sotirov N, Falkinger G, Grabner F, Reichl C, et al. Constitutive flow curve approximation of commercial aluminium alloys at low temperatures. *Materials & Design*. 2015;88:659-66.
- [8] Meng XK, Zhou JZ, Tan WS, Su C, Huang S. Reening mechanism of laser shock wave in Al-Cu alloy at liquid nitrogen temperature. *Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering*. 2016;24:245-51.
- [9] Li J, Cai X, Wang Y, Wu X. Multiscale Analysis of the Microstructure and Stress Evolution in Cold Work Die Steel during Deep Cryogenic Treatment. *Materials*. 2018;11(11):2122.