

## اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب (UFSW) بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳

حامد ثابت<sup>۱\*</sup>، محمد صادقی<sup>۲</sup>، مهدی محمدی خواه<sup>۳</sup>، نوید میرزاحمد<sup>۳</sup> و مهرزاد خلیلی<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش، اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نظیر سرعت حرکت خطی، سرعت دوران پین و دمای آب بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳ مورد بررسی قرار گرفته و با شرایط معمول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در محیط هوا مقایسه شده است. بدین منظور، جوشکاری در زیر آب در دو دمای ۳۰ و ۲ درجه سانتی‌گراد و همچنین در هوای ساکن (شرایط معمول) با گام‌های جوشکاری متفاوت  $\left[ \frac{\text{سرعت حرکت خطی}}{\text{سرعت دوران پین}} = \frac{V}{W} \right]$  ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۱ میلی‌متر بر دور به گونه‌ی سر به سر روی ورق‌های آلومینیومی ۴۳۴۳ انجام گردید. نتایج بازرسی چشمی سطوح اتصال نمونه‌های گوناگون مشخص نمود که قطعات جوشکاری شده در زیر آب و هوا از نظر شکل ظاهری مشابه بوده و بدون عیب و ترک می‌باشند. نتایج بررسی‌های متالوگرافی نوری و SEM نشان داد که با کاهش دمای آب و افزایش شدت خنک‌کنندگی محیط جوشکاری در یک گام جوشکاری ثابت، اندازه‌ی رسوبات  $\text{Si}_2\text{Fe}$  و فاز  $\beta$  کوچک‌تر و اندازه‌ی دانه‌ها کاهش می‌یابد. بالاترین کاهش در اندازه‌ی دانه‌ها، رسوبات  $\text{Si}_2\text{Fe}$  و فاز  $\beta$  مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده با گام جوشکاری ۰/۱ میلی‌متر بر دور بود. نتایج آزمون‌های سختی و کشش نیز مشخص نمودند که با افزایش شدت خنک‌کنندگی محیط جوشکاری در یک گام جوشکاری ثابت، سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم افزایش یافته و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابد و در مجموع بالاترین ویژگی‌های کششی (استحکام کششی و استحکام تسلیم) و سختی مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده با گام ۰/۱ میلی‌متر بر دور در محیط زیر آب ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب، آلومینیوم ۴۳۴۳، فراسنج‌های جوشکاری، ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی.

- ۱- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.
  - ۲- کارشناس ارشد مهندسی مواد، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.
  - ۳- کارشناس مهندسی مواد، گروه پژوهشی مهندسی جوش.
  - ۴- کارشناس آزمایشگاه و کارگاه‌ها، گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.
- \* - ایمیل نویسنده مسئول: h-sabet@kiau.ac.ir

## پیشگفتار

عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، با استفاده از یک پین فرو رونده در درز اتصال قطعات و با چرخش و حرکت رو به جلو در حالت جامد انجام می‌گردد [۱]. سازوکار اتصال گرم شدن موضع مربوطه در اثر اصطکاک پین با فلزات پایه، نرم شدن فلزات پایه و تغییر فرم پلاستیکی و فرو رفتن لبه‌های محل اتصال در یکدیگر می‌باشد. بدین ترتیب بدون انجام عملیات ذوب، اتصال دو درز صورت می‌گیرد [۱ و ۲].

از آنجایی که اصول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات با تغییر شکل پلاستیکی در دمای بالا همراه می‌باشد، لذا امکان تبلور دوباره دینامیکی در ناحیه‌ی جوش وجود دارد [۳]. چندین سازوکار برای فرآیند تبلور دوباره دینامیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات پیشنهاد شده است که عبارتند از [۴ و ۵]:

- ۱- تبلور دوباره دینامیکی منقطع<sup>۱</sup> که با جوانه‌زنی و رشد دانه‌های جدید همراه می‌باشد و در موادی با انرژی نقص در چیده شدن پایین رخ می‌دهد.
- ۲- تبلور دوباره دینامیکی پیوسته<sup>۲</sup> در موادی با انرژی نقص در چیده شدن بالا صورت می‌گیرد و مستلزم منظم شدن مرزهایی با زاویه کم بوده که سرانجام سبب پدیدار شدن دانه‌های جدید می‌شود.
- ۳- تبلور دوباره دینامیکی هندسی<sup>۳</sup> ناشی از برخورد مرز دانه‌های دنداندار بوده و هنگامی که دانه‌ها به وسیله‌ی تغییر شکل پلاستیکی گرم کشیده شده باشند، اتفاق می‌افتد.

تبلور دوباره دینامیکی ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم، به دلیل دارا بودن انرژی نقص در چیده شدن بالا از نوع تبلور دوباره دینامیکی پیوسته می‌باشد [۶ و ۷]. بررسی اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر دانه‌های تبلور دوباره دینامیکی به وسیله‌ی پژوهشگران گوناگونی بررسی شده است. مطالعات Lee و همکارانش [۸] بر اثر فراسنج‌های

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته، نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ابزار و در نتیجه افزایش حرارت ورودی جوشکاری، اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته‌ی دینامیکی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، بررسی‌های Elahgovan و همکارانش [۹] مشخص کرد که هندسه پین با تاثیرگذاری بر حرارت ورودی جوشکاری سبب تغییر در اندازه‌ی دانه‌های ناحیه‌ی جوش می‌گردد، به گونه‌ای که ریزترین اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته‌ی دینامیکی در اثر استفاده از پین مخروطی شکل با نوک تیز برای جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ آماده شد. بررسی‌های انجام شده توسط Cavalier و همکارانش [۱۰] مشخص می‌نماید که نسبت بالای گام جوشکاری سبب کاهش اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته خواهد شد. بررسی‌هایی که روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [۱۱] انجام شده نشانگر این است که با افزایش نسبت گام جوشکاری ( $\frac{V}{\omega}$ ) اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته‌ی دینامیکی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، بررسی شدت خنک‌کنندگی محیط جوشکاری و دمای اولیه‌ی قطعه‌کار بر اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته توسط پژوهشگران گوناگون بررسی شده است. Aydin و همکارانش [۱۲] اثر دمای قطعه‌کار روی اندازه‌ی دانه‌ها را در فرآیند جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی و گزارش نمودند که با کاهش دمای اولیه‌ی قطعه‌کار از ۳۰ درجه به ۳۰- درجه‌ی سانتی‌گراد، اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، خنک کردن مداوم قسمت زیرین درز اتصال به وسیله‌ی آب، روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مشخص کرد که با افزایش سرعت خروج حرارت، اندازه‌ی دانه‌های تبلور دوباره یافته‌ی دینامیکی در ناحیه‌ی جوش کاهش می‌یابد [۱۳].

Sarukada و همکارانش [۱۴]، در پژوهشی جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را در شرایط زیر آب بررسی کردند. نتایج بررسی آنها مشخص نمود که عمر خستگی آلیاژ جوشکاری شده در زیر آب به دلیل ریزتر شدن دانه‌های ناحیه‌ی جوش از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوا بالاتر است. از سوی دیگر، پژوهش‌های انجام شده توسط Hofmann و همکارانش [۱۵] روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب و روی آلیاژ آلومینیوم

- 1 - Discontinuous Dynamic Re-crystallization
- 2 - Continuous Dynamic Re-crystallization
- 3 - Geometric Dynamic Re-crystallization
- 4-Thermo Mechanical Affected Zone
- 5-Heat Affected Zone

ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۱ تهیه شدند. ورق‌ها پس از چربی‌زدایی با استن به گونه‌ی سرب‌سر گونیا به وسیله‌ی قید و بند کنار یکدیگر قرار گرفتند. برای انجام عملیات جوشکاری از یک دستگاه فرز NC مارک FP4MK و پین ابزار از جنس فولاد گرم‌کار (H13) عملیات حرارتی شده، براساس ابعاد شکل ۱ استفاده شد.

به‌منظور بررسی اثر شدت خنک‌کنندگی محیط، جوشکاری در هوای ساکن (روش معمول جوشکاری) و زیر آب شامل آب ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی اثر توام سرعت حرکت خطی و سرعت دوران پین از فرانسج گام جوشکاری  $\left[ \frac{\text{سرعت حرکت خطی}}{\text{سرعت دوران پین}} = \frac{V}{W} \right]$  استفاده شد. بدین منظور،

سه گام ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۱ میلی‌متر بر دور انتخاب و عملیات جوشکاری هر گام در محیط هوا و زیر آب انجام شد و در مجموع ۹ نمونه در محیط‌های گوناگون جوشکاری گردیدند. گفتنی است در حالت جوشکاری زیر آب، محفظه‌ای شیشه‌ای و بسته به‌منظور شبیه‌سازی محیط آب طراحی و ساخته شد، به گونه‌ای که آب به‌وسیله‌ی یک عدد پمپ درون محفظه جابجا و دمای آب به‌صورت مداوم به‌وسیله‌ی یک عدد ترموکوپل جیوه‌ای کنترل می‌گردید. افزون بر این جهت جلوگیری از خروج حرارت از محل جوشکاری، از یک غلاف محافظ از جنس فولاد کربنی با پوشش سرامیکی در اطراف ابزار استفاده شد. وظیفه‌ی غلاف فولادی، کنترل و جلوگیری از خروج حرارت از سطح ابزار و درز اتصال و همچنین، پراکنده کردن آب در محل تماس ابزار با فلز پایه بود و عمل خنک‌کنندگی فلز پایه به‌وسیله‌ی آب از راه سطح جانبی و سطح زیرین ورق‌های اتصال انجام می‌شد. شکل ۲، تصویر و شماتیک محفظه‌ی شیشه‌ای بسته را نشان می‌دهد.

پس از انجام عملیات جوشکاری، محل اتصال نمونه‌ها تحت بازرسی چشمی قرار گرفتند و شکل ظاهری و وضعیت عیوب احتمالی آنها مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمونه‌هایی از محل جوش‌ها تهیه و آزمون‌های متالوگرافی نوری و الکترونی (SEM)، سختی‌سنجی و کشش روی نمونه‌ها انجام شد. به‌منظور بررسی متالوگرافی، نمونه‌هایی به‌گونه‌ی عرضی تهیه شده و پس از آماده‌سازی اولیه شامل سنباده‌زنی و پولیش با خمیر

۶۰۶۱ با اندازه‌ی دانه‌های ۲۰ میکرون نشانگر کاهش اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه‌ی جوش نسبت به حالت جوشکاری در محیط معمول (هوا) می‌باشد. اما در پژوهش‌های بالا هیچ نوع اتصال مناسبی صورت نگرفت و آزمایش‌های مکانیکی به‌منظور ارزیابی کارایی جوشکاری زیر آب را دارا نمی‌باشد. آنها دلیل اتصال نامناسب را ناشی از انتخاب ناصحیح فرانسج‌های جوشکاری آلیاژ در شرایط جوشکاری در زیر آب عنوان نموده‌اند.

Liu و همکارانش [۱۶] ویژگی‌های کششی ناحیه‌ی جوش آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ را در شرایط جوشکاری زیر آب بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها مشخص نمود که استحکام کششی ناحیه‌ی جوش از ۳۲۴ مگاپاسکال در شرایط جوشکاری در هوا به ۳۴۱ مگاپاسکال در شرایط جوشکاری در زیر آب افزایش یافته است. بررسی‌های سطوح مقاطع شکست مشخص می‌کند که شکست در نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب از فصل مشترک بین فلز جوش و TMAZ<sup>۴</sup> رخ داده ولی در نمونه‌ی جوشکاری شده در هوا، شکست از فصل مشترک بین HAZ<sup>۵</sup> و TMAZ رخ داده است. از آنجایی که تاکنون تاثیر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا این پژوهش، برنامه‌ریزی و اجرا گردیده است و هدف آن بررسی اثر سرعت حرکت خطی، سرعت دوران پین و دمای آب بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳ جوشکاری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. دلیل انتخاب آلیاژ ۴۳۴۳ برای این پژوهش، ناشی از این موضوع می‌باشد که تمامی پژوهش‌ها در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب روی آلومینیوم خالص و آلیاژهای آلومینیوم قابل عملیات حرارتی انجام شده است، لذا به‌منظور انجام این پژوهش، آلیاژ ۴۳۴۳ غیر قابل عملیات حرارتی انتخاب گردید تا رفتار این خانواده از آلیاژهای آلومینیوم مورد مطالعه قرار گیرد.

### روش پژوهش

به‌منظور انجام پژوهش، قطعاتی به ابعاد  $150 \times 65 \times 6 \text{ mm}^3$  از جنس آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳ با

مکانیکی نمونه‌های گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در یک گام جوشکاری ثابت، عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوا کمتر می‌باشد. همچنین، در یک گام جوشکاری ثابت، عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد کم‌تر از نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۲ مشخص می‌گردد که کمترین عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ در یک گام جوشکاری ثابت مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد با گام ۰/۱ میلی‌متر بر دور می‌باشد. به گونه‌ای که در این نمونه، عرض ناحیه‌ی HAZ، ۵/۲ میلی‌متر و عرض ناحیه‌ی TMAZ ۳/۳ میلی‌متر می‌باشد. دلیل این موضوع ناشی از سرعت خروج حرارت از ناحیه‌ی جوش می‌باشد. از آنجایی که با افزایش سرعت خروج حرارت، زمان کافی برای توزیع حرارت در ناحیه‌های HAZ و TMAZ کاهش می‌یابد، لذا حرارت در زمان کمتری از این ناحیه‌ها خارج می‌گردد [۱۴ و ۱۷] که نتیجه‌ی آن کاهش عرض این ناحیه‌ها با افزایش سرعت خروج حرارت می‌باشد [۱۶ و ۱۸]. از سوی دیگر، بررسی جدول ۲ مشخص می‌کند که در یک شرایط مشخص جوشکاری در هوا و یا زیر آب با کاهش گام جوشکاری عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع ناشی از افزایش حرارت ورودی جوشکاری با کاهش گام جوشکاری می‌باشد که سبب طولانی‌تر شدن زمان خروج حرارت از ناحیه‌های HAZ و TMAZ شده [۱۴ و ۱۳] و بدین ترتیب عرض این ناحیه‌ها افزایش یافته است.

### ریزساختار میکروسکوپی

شکل الف-۴، تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ ۴۳۴۳ (فلز پایه) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است اندازه‌ی دانه‌های فلز پایه، ۱۷۰ میکرومتر می‌باشد. تصویر SEM فلز پایه در شکل (ب-۴) ارایه شده است. در این شکل دو نوع رسوب خاکستری رنگ چند ضلعی با اندازه‌ی میانگین ۸ میکرومتر و رسوبات سفیدرنگ شبه میله‌ای و کروی با اندازه‌ی میانگین ۴ میکرومتر در ریزساختار

الماسه ۰/۱ میکرومتر به‌وسیله‌ی محلول یک درصد HF اچ شدند. بررسی متالوگرافی نوری طی ۲ مرحله‌ی میکروسکوپی و ماکروسکوپی انجام شد. متالوگرافی میکروسکوپی با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل LECO CM60 مجهز به سیستم آنالیز تصویری (Image Analysis) به‌منظور تعیین اندازه‌ی دانه‌ها و درصد حجمی فازهای موجود در ناحیه‌ی جوش نمونه‌ها انجام شد. همچنین، برای شناسایی فازها از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی SEM مدل VEGA/TESCAN مجهز به سیستم الکترون ثانویه (SE) و تحت ولتاژ شتاب دهنده‌ی ۲۰KV استفاده شد. متالوگرافی ماکروسکوپی با استفاده از یک دستگاه استریومیکروسکوپ مدل OLYMPUS Z61، در حالت پس از اچ ماکرو (با محلول اچ  $1\% \text{HF} + 4\% \text{HCl} + 95\% \text{H}_2\text{O}$ ) انجام شد و عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ برای هر نمونه پس از تصویربرداری تعیین گردید.

آزمون میکرو سختی سنجی از فلز جوش به‌کمک دستگاه سختی سنجی مدل Struers Duramin تحت بار ۵۰۰ گرم نیرو و حداقل روی ۳ نقطه‌ی گوناگون از هر نمونه انجام شد و میانگین نتایج آنها معیار سختی فلز جوش در نظر گرفته شد. آزمون کشش طولی براساس استاندارد AWS B4 به‌کمک دستگاه کشش Universal- Instron انجام شد. گفتنی است که جهت افزایش دقت نتایج آزمون کشش طولی، آزمون روی ۲ نمونه در هر یک از شرایط جوشکاری انجام شد که میانگین نتایج آنها معیار ویژگی‌های کششی در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

#### بازرسی چشمی و متالوگرافی ماکروسکوپی

شکل ۳، تصویر نمونه‌های جوشکاری شده را در هوا و زیر آب، ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد با گام جوشکاری ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشخص است، هر دو نمونه بدون ترک بوده و از نظر ظاهری تفاوتی بین نمونه‌های جوشکاری شده وجود ندارد. جدول ۲، نتایج آزمون‌های متالوگرافی و

مشاهده می‌گردد. آنالیز نقطه‌ای EDS از رسوبات یاد شده (شکل ج-۴) مشخص می‌نماید که رسوبات خاکستری رنگ، ترکیب بین فلزی آهن و سیلیسیم ( $\text{Si}_2\text{Fe}$ ) و رسوبات سفیدرنگ، فاز غنی از سیلیسیم (فاز  $\beta$ ) می‌باشند. همچنین، جدول ۲، نتایج آزمون متالوگرافی میکروسکوپی نمونه‌ها را در شرایط جوشکاری گوناگون نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در یک گام جوشکاری ثابت با افزایش شدت خنک‌کنندگی محیط، اندازه‌ی دانه‌ها و اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  در ناحیه‌ی جوش کاهش می‌یابد. شکل ۵، مقایسه‌ای بین اندازه‌ی دانه‌ها و شکل ۶، مقایسه‌ای بین اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  در گام جوشکاری ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور برای نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.

بررسی شکل ۵ و ۶ مشخص می‌نماید که در شرایط جوشکاری در هوا و زیر آب در گام جوشکاری ثابت ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور، اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  ناحیه‌ی جوش در شرایط جوشکاری شده در زیر آب، کمتر از هوای ساکن می‌باشد. همچنین، اندازه‌ی دانه‌ها و رسوبات ناحیه‌ی جوش به‌دست آمده از جوشکاری در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتیگراد کمتر از زیر آب ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد. از سوی دیگر، بررسی نتایج جدول ۲ مشخص می‌نماید که در تمامی گام‌های جوشکاری، کمترین اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب، ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. دلیل این موضوع ناشی از سرعت خروج حرارت از ناحیه‌ی جوش این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. از آنجایی که بالاترین شدت خنک‌کنندگی مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد، لذا به‌دلیل سرعت خروج حرارت، دانه‌ها زمان کافی برای رشد در هنگام تبلور دوباره‌ی دینامیکی را نداشته‌اند [۱۷ و ۱۸] و رشد ترکیبات بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  از راه به‌هم پیوستن میسر نبوده و همچنین، رسوب فاز  $\beta$  از زمینه مهیا نبوده است. در نتیجه مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت خروج حرارت، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی

در ناحیه‌ی جوش کاهش می‌یابند و کمترین اندازه‌ی فازها و ترکیبات بین فلزی مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، در حالت جوشکاری شده در هوای ساکن و جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد را به‌گونه‌ی مقایسه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، اندازه‌ی دانه‌ها (شکل‌های الف-۷ و ب-۷) و اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  (شکل‌های ج-۷ و د-۷) در نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط هوای ساکن و زیر آب ۲ درجه‌ی سانتیگراد در گام جوشکاری ۰/۰۶ میلی‌متر بر دور با یکدیگر متفاوت بوده و اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتیگراد (شکل‌های ب-۷ و د-۷) کمتر از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوای ساکن (شکل‌های الف-۷ و ج-۷) می‌باشد.

از سوی دیگر، بررسی جدول ۲ مشخص می‌نماید که با کاهش گام جوشکاری در یک شرایط مشخص (هوا یا زیر آب) اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  افزایش می‌یابد. شکل ۸، مقایسه‌ای بین اندازه‌ی دانه‌ها و شکل ۹، مقایسه‌ای بین اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیب بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  در شرایط جوشکاری شده با گام‌های گوناگون در محیط هوای ساکن و زیر آب را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل ۸ و ۹ مشخص است با کاهش گام جوشکاری در شرایط جوشکاری هوای ساکن یا زیر آب، اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $\text{Si}_2\text{Fe}$  افزایش می‌یابند. دلیل این موضوع ناشی از افزایش حرارت ورودی جوشکاری می‌باشد [۱۴]. با کاهش گام جوشکاری، حرارت ورودی افزایش و زمان کافی برای تبلور دوباره‌ی دینامیکی دانه‌ها [۲۱]، رسوب فاز  $\beta$  از زمینه به‌دلیل کاهش حلالیت سیلیسیم با دما و همچنین، رشد ترکیب  $\text{Si}_2\text{Fe}$  از راه به هم پیوستن مهیا خواهد شد، لذا در صورت افزایش گام

از بالاترین سختی و استحکام کششی و کمترین ازدیاد طول نسبی برخوردار می‌باشد.

بررسی جدول ۲ مشخص می‌نماید که در یک محیط مشخص، با کاهش گام جوشکاری، سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم، کاهش و درصد ازدیاد طول نسبی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع ناشی از حرارت ورودی بیشتر با کاهش گام جوشکاری می‌باشد [۱۷] که نتیجه‌ی آن رشد دانه‌ها، رشد رسوبات فاز  $\beta$  و رشد ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  می‌باشد. همچنین، بررسی جدول ۲ مشخص می‌نماید که بالاترین مقدار سختی و ویژگی‌های کششی مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده با گام جوشکاری ۰/۱ میلی‌متر بر دور در شرایط زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. به گونه‌ای که سختی ناحیه‌ی جوش در این نمونه ۱۳۱ ویکرز، استحکام کششی ۳۰۲ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۹۶ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول نسبی ۱۲/۶ درصد می‌باشد.

### نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر توأم سرعت حرکت خطی، سرعت دوران پین و دمای آب بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳ جوشکاری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام و با روش معمول جوشکاری (در هوای ساکن) مقایسه گردید که نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- از نظر شکل ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط هوای ساکن و زیر آب با یکدیگر تفاوتی نداشته و بدون هرگونه عیب و ترک می‌باشند.

۲- در یک گام جوشکاری ثابت، عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب کمتر از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوای ساکن می‌باشد.

۳- در شرایط جوشکاری مشخص (هوای ساکن یا زیر آب) با کاهش گام جوشکاری عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ افزایش می‌یابد.

۴- در یک گام جوشکاری ثابت، اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب، کمتر از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوای ساکن می‌باشند.

جوشکاری زمان کافی برای رشد دانه‌ها، فازها و رسوبات مهیا نمی‌گردد [۱۶ و ۱۳].

بررسی جدول ۲، مشخص می‌نماید که کمترین اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  در تمامی شرایط جوشکاری، مربوط به گام جوشکاری ۰/۱ میلی‌متر بر دور می‌باشد. به گونه‌ای که اندازه‌ی دانه‌های ناحیه‌ی جوش نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۳۸ میکرومتر، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$ ، ۱/۱ میکرومتر و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$ ، ۳/۸ میکرومتر می‌باشد.

### سختی و ویژگی‌های کششی

جدول ۲، نتایج آزمون سختی و ویژگی‌های کششی نمونه‌های گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است در یک گام جوشکاری ثابت با افزایش شدت خنک‌کنندگی محیط جوشکاری، سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم، افزایش و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابد. شکل ۱۰، مقایسه‌ی بین سختی، استحکام کششی و تسلیم نمونه‌های جوشکاری شده در گام جوشکاری ۰/۰۶ میلی‌متر بر دور را در شرایط هوای ساکن و زیر آب نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، سختی، استحکام کششی و تسلیم نمونه‌ی جوشکاری شده در شرایط هوای ساکن کم‌تر از نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب می‌باشد.

از سوی دیگر، بررسی جدول ۲ مشخص می‌نماید که در گام‌های جوشکاری ثابت، بالاترین مقدار سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم و کمترین درصد ازدیاد طول نسبی مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. دلیل بالاتر بودن ویژگی‌های مکانیکی این نمونه در تمامی گام‌های جوشکاری ارتباط بین اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی فازها و اندازه‌ی ترکیبات موجود در ریزساختار میکروسکوپی با ویژگی‌های کششی و سختی می‌باشد [۱۹ و ۱۷]. از آنجایی که اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  نمونه‌ی جوشکاری شده در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد در تمامی گام‌های جوشکاری از سایر نمونه‌ها کمتر است. لذا براساس رابطه‌ی هال پیچ [۱۹]

کششی و استحکام تسلیم کاهش و درصد ازدیاد طول نسبی افزایش می‌یابد.

۸- نمونه‌ی جوشکاری شده با گام ۰/۱ میلی‌متر بر دور در شرایط زیر آب ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد دارای کمترین عرض ناحیه‌های HAZ و TMAZ، کوچکترین اندازه‌ی دانه‌ها، کمترین اندازه‌ی رسوبات فازهای  $\beta$  و ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$ ، و همچنین، بالاترین مقدار سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم و کمترین درصد ازدیاد طول نسبی بوده است.

۵- در شرایط جوشکاری مشخص (هوای ساکن یا زیر آب) با کاهش گام جوشکاری اندازه‌ی دانه‌ها، اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و اندازه‌ی ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  افزایش می‌یابد.

۶- در یک گام جوشکاری ثابت، سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌های جوشکاری شده در زیر آب بیشتر و درصد ازدیاد طول نسبی آنها کمتر از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوای ساکن می‌باشند.

۷- در شرایط جوشکاری (هوای ساکن یا زیر آب) مشخص، با کاهش گام جوشکاری، سختی، استحکام

**References:**

- 1- R.S. Mishra, Z.Y. Ma. "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering R*, 50, pp 1-78, 2005.
- 2- Ren, S.R, Ma, Z.Y, Chen, L.Q. Effect of Welding Parameters on Tensile Properties and Fracture Behavior of Friction Stir Welded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia*, 56, pp69-72, 2007.
- 3- Y.M.Hwang, Z.W.Kang, Y.C. Chiou, H.H.Hsu, "Experimental study on Temperature Distributions within the Work piece During Friction Stir Welding of Aluminum alloys". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, pp778-787, 2008.
- 4- F. Alcantara, N.G, "Temperature Evaluation and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Weldments when joining AA 2024 and AA7075 with an AA6056 alloy". *Welding world*,50 (11/12),pp 107-116,2006.
- 5- Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa, N. Tsuji, "Friction stir Welding of Ultrafine Grained Al alloy 1100 Produced by Accumulative roll-Bonding", *Scripta Materialia*, 50, pp57-60, 2004.
- 6- P. Cavaliere, F. Panella, "Effect of Tool Position on the Fatigue Properties of Dissimilar 2024-7075 Sheets joined by friction stir welding". *Journal of Materials Processing Technology*, 206, pp249-255, 2008.
- 7- P. Cavaliere, R. Nobile, F. Panella, W. Squillace, A." Mechanical and Microstructural Behavior of 2024-7075 Aluminum alloy Sheets Joined by Friction Stir Welding". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, pp588-594, 2006.
- 8- W.B. Lee, Ym. Yeon, S.B. Jung, "The Mechanical Properties Related to the Dominant Microstructure in the Weld Zone of Al Alloy Joints by Friction Stir Welding". *Journal of Materials Science*, 35, pp4191-4193, 2003.
- 9- K. Elangovan, V.Balasubramanian, "Influences of Pin Profile and Rotational Speed of the Tool on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA2219 Aluminum alloy". *Materials Science and Engineering A*,459, pp7-18, 2007.
- 10- P. Cavaliere, A. Squillace, F. Panella, "Effect of Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of AA6082 Joints Produced by Friction Stir Welding". *Journal of Materials Processing and Technology*,200, pp364-372, 2008.
- 11- K.V. Jata, K.K. Sankaran, J. Ruschau, "Friction-Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum alloy 7050-T7451". *Metallurgy and Materials Transactions A*, 31:21, pp81-92, 2000.
- 12- H. Aydin, A. Bayram, A. Uguz, K.S. Akay, "Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of 2024 Aluminum Alloys in Different State". *Materials Design*, 86, pp326-331, 2008.
- 13- J.Q. Su, T.W. Nelson, R. Mishra, M. Mahoney," Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651Al". *Acta Materialia*, 51,pp713-729, 2003.
- 14- D.Sarukada, K.Katoh, H.Toskisie "Under Water Friction Welding of 6061 Aluminum alloy "Journal of Japan Institute of Light Metals, 52,1, pp 42-53, 2002.
- 15- D.C. Hofmann and K.S. Vecchio, "Submerged Friction Stir Processing (SFSP): An Improved Method for Creating Ultra-Fine-Grained Bulk Materials", *Materials Science and Engineering, A*, 402,pp 234- 241, 2005.
- 16- H.J.Liu, H.J. Zhang, Y.X.Huang, Y.U.Lei "Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219 Aluminum alloy" *Transactions Nonferrous Metals Society China*, 20, pp 1387-1391, 2010.
- 17- M. Cabibbo , H.J. McQueen, E. Evangelista, S. Spigarelli, M. Di Paola, A. Falchero, "Microstructure and Mechanical Properties Studies of AA6056 Friction Stir Welded". *Materials Science and Engineering A*, 460-461, pp86-94, 2007.
- 18- C.Genevios, D.Faberegue, A.Deschamps, W.J.Poole "on the Coupling between Precipitation and Plastic Deformation on Relation with Friction Stir Welding of AA2024 T3 Aluminum alloy" *Materials Science and Engineering A*,441, pp 39-48, 2006.
- 19- Y.J.Kwon, I.Shigematsu, N.Saito, "Mechanical Properties of Fine-Grained Aluminum Alloy Produced by Friction Stir Process", *Scripta Materialia*, 49,pp 785-780, 2003.



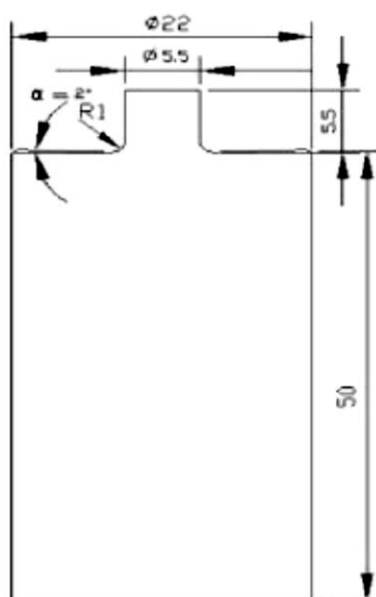
## پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلیاژ ۴۳۴۳

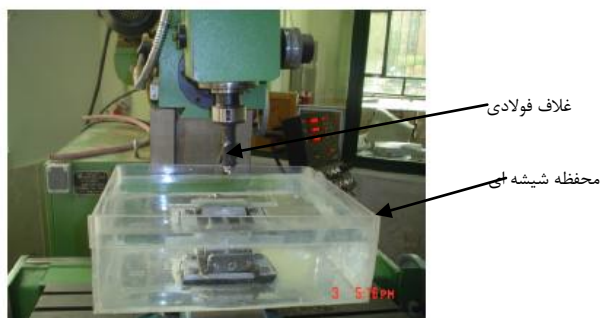
Al	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
باقیمانده	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۸۴	۷/۵۳

جدول ۲- نتایج آزمون متالوگرافی و مکانیکی نمونه‌های گوناگون

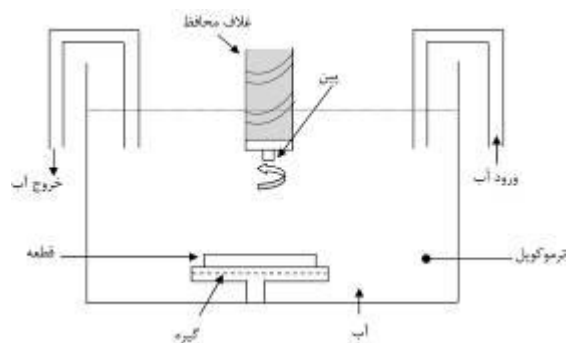
کد نمونه	شرایط جوشکاری	سرعت حرکت خطی V (mm/min)	سرعت دوران پین W (rpm)	گام جوشکاری V/W (mm/r)	متالوگرافی ماکروسکوپی		متالوگرافی میکروسکوپی				خواص مکانیکی		
					عرض منطقه TMAZ (mm)	عرض منطقه HAZ (mm)	متوسط اندازه دانه‌ها (μm)	متوسط اندازه رسوب فاز β (μm)	ترکیبات بین فیزی Si-Fe (μm)	استحکام کششی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	ازدیاد طول نسبی (درصد)	سختی (HV0.5)
۱	هوای ساکن	۱۱۰	۱۱۰۰	۰/۱	۴/۵	۶/۵	۶۰	۲/۶	۵/۶	۲۷۹	۱۷۷	۱۳/۷	۱۱۵
۲	زیر آب ۳۰ °C	۱۱۰	۱۱۰۰	۰/۱	۳/۷	۵/۶	۴۶	۱/۶	۴/۳	۲۹۳	۱۹۱	۱۲/۹	۱۲۶
۳	زیر آب ۲۰ °C	۱۱۰	۱۱۰۰	۰/۱	۳/۳	۵/۲	۳۸	۱/۱	۳/۸	۳۰۲	۱۹۶	۱۲/۶	۱۳۱
۴	هوای ساکن	۱۰۰	۱۲۵۰	۰/۰۸	۴/۷	۷/۲	۸۵	۳/۱	۶/۱	۲۶۴	۱۷۱	۱۴/۱	۱۱۱
۵	زیر آب ۳۰ °C	۱۰۰	۱۲۵۰	۰/۰۸	۳/۹	۵/۹	۷۰	۲/۳	۵/۳	۲۸۱	۱۸۴	۱۳/۳	۱۲۲
۶	زیر آب ۲۰ °C	۱۰۰	۱۲۵۰	۰/۰۸	۳/۷	۵/۶	۶۴	۱/۹	۴/۶	۲۹۶	۱۹۳	۱۲/۸	۱۲۹
۷	هوای ساکن	۹۰	۱۵۰۰	۰/۰۶	۵/۶	۸/۶	۱۲۰	۳/۵	۶/۶	۲۴۹	۱۵۷	۱۴/۹	۱۰۳
۸	زیر آب ۳۰ °C	۹۰	۱۵۰۰	۰/۰۶	۴/۶	۷/۴	۹۸	۳/۰	۵/۹	۲۷۵	۱۷۲	۱۳/۵	۱۱۸
۹	زیر آب ۲۰ °C	۹۰	۱۵۰۰	۰/۰۶	۴/۱	۶/۹	۹۰	۲/۸	۵/۸	۲۸۶	۱۹۲	۱۲/۷	۱۲۶
۱۰	فلز پایه	-	-	-	-	-	۱۷۰	۴	۸	۲۰۱	۱۲۲	۱۶/۲	۸۹



شکل ۱- ابعاد پین مورد استفاده در این پژوهش

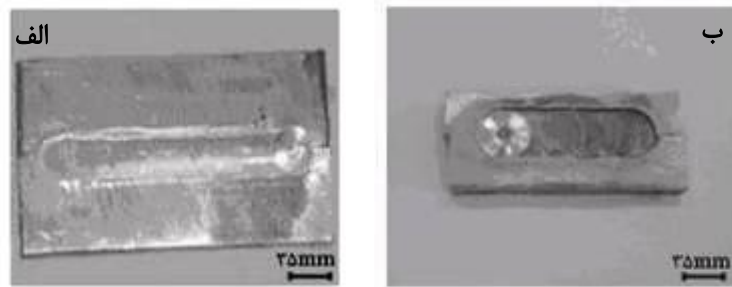


(الف)

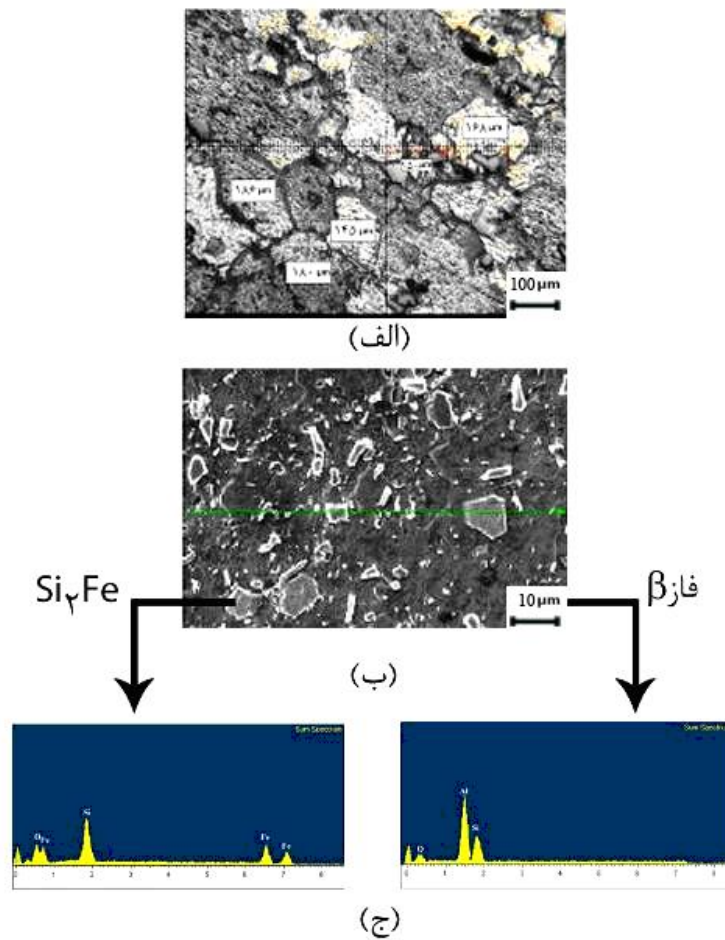


(ب)

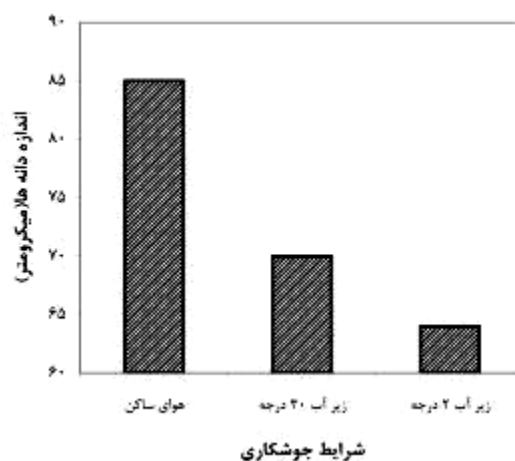
شکل ۲- محفظه شیشه‌ای بسته بمنظور شبیه سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب  
الف- تصویر واقعی، ب- نمای شماتیک



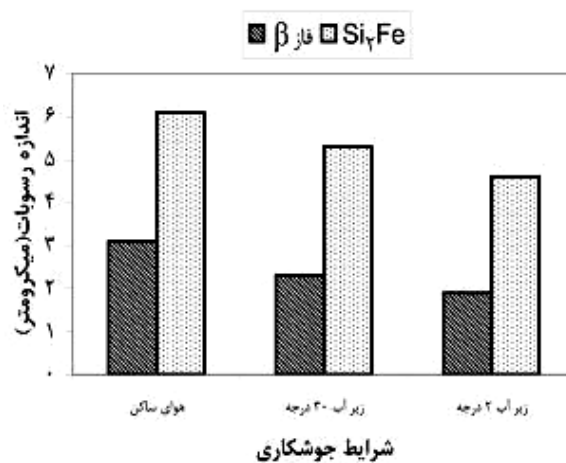
شکل ۳- سطح ظاهری جوش آلومینیوم ۴۳۴۳ با گام ۰/۰۸ میلی متر بر دور  
الف- در هوای ساکن، ب- در زیر آب ۲ درجه‌ی سانتیگراد



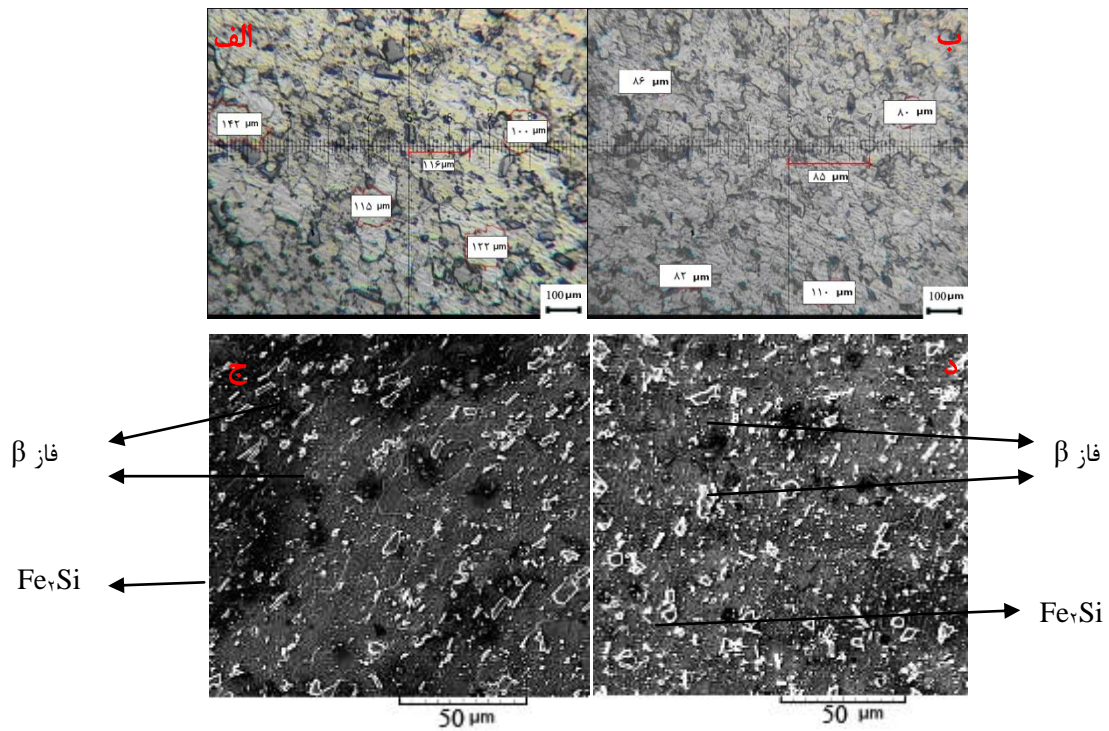
شکل ۴- تصویر میکروسکوپی از فلز پایه: الف- میکروسکوپی نوری همراه با محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه‌ها،  
ب- میکروسکوپ الکترونی (SEM) همراه با مشخص کردن رسوبات، ج- آنالیز EDS از رسوبات  
موجود در ساختار میکروسکوپی



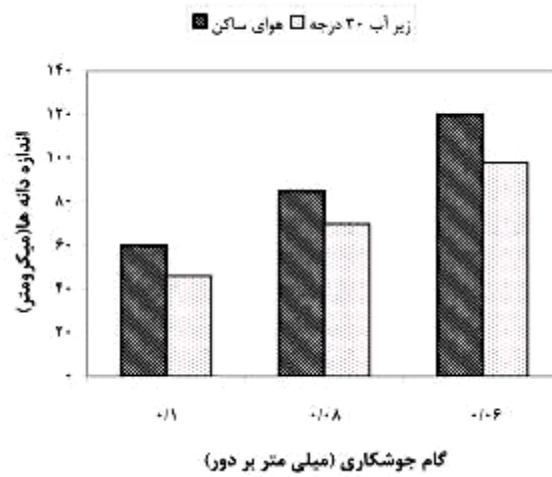
شکل ۵- مقایسه بین اندازه‌ی دانه‌های نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط محیطی گوناگون با گام ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور



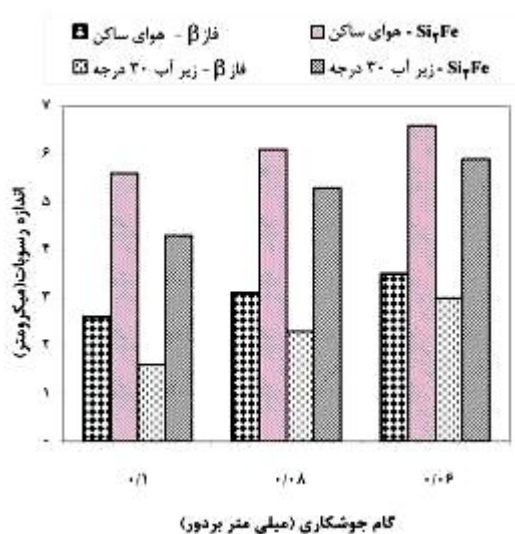
شکل ۶- مقایسه بین اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیبات بین فلزی  $Si_2Fe$  موجود در ساختار میکروسکوپی نمونه‌های و شکاری شده در شرایط محیطی گوناگون با گام ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور



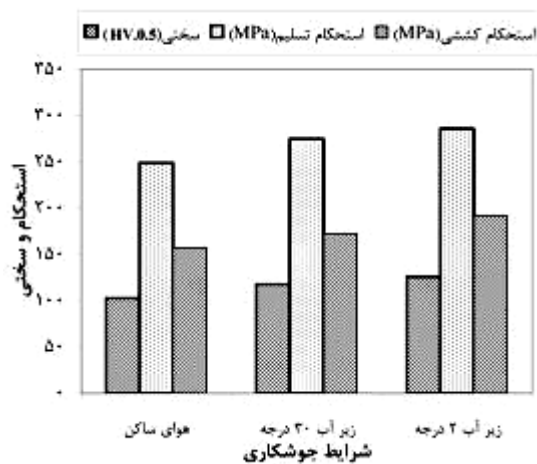
شکل ۷- تصویر متالوگرافی ناحیه‌ی جوش نمونه‌ی جوشکاری شده با گام ۰/۰۶ میلی‌متر بر دور  
 الف- تصویر متالوگرافی نوری در شرایط هوای ساکن، ب- تصویر متالوگرافی نوری در شرایط زیر آب  $2^\circ C$ ،  
 ج- تصویر SEM در شرایط هوای ساکن، د- تصویر SEM در شرایط زیر آب  $2^\circ C$



شکل ۸- مقایسه بین اندازه‌ی دانه‌های نمونه‌های جوشکاری شده در محیط هوای ساکن و زیر آب  $30^\circ C$  با گام‌های گوناگون.



شکل ۹- مقایسه بین اندازه‌ی رسوبات فاز  $\beta$  و ترکیب  $Si_3Fe$  نمونه‌های جوشکاری شده در محیط هوای ساکن و زیر آب  $30^{\circ}C$  با گام‌های گوناگون



شکل ۱۰- مقایسه بین سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط محیطی گوناگون با گام جوشکاری 0/0.6 میلی‌متر بر دور