



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## بررسی تاثیر ارتعاش قالب هنگام انجماد بر ساختار و مقاومت به خوردگی آلیاژ ریختگی Zn-4Si

فائزه اکبری<sup>۱</sup>، رضا تقی‌آبادی<sup>۲\*</sup>، مرتضی ثقفی یزدی<sup>۳</sup>، ایمان انصاریان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۸-۳۳۹۰۱۱۴۳، قزوین، کد پستی: ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، Email: [taghiabadi@ikiu.ac.ir](mailto:taghiabadi@ikiu.ac.ir)

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۹۱

در تحقیق حاضر، تاثیر ارتعاش قالب هنگام انجماد بر ریزساختار و رفتار خوردگی آلیاژ ریختگی Zn-4Si بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات ریزساختاری، اعمال ارتعاشات مکانیکی، موجب کاهش ابعاد و بهبود توزیع ذرات سیلیسیم اولیه (SiP) در زمینه آلیاژ می‌شود. همچنین بر اساس نتایج پردازش تصویری، در مقایسه با آلیاژ ریختگی، اندازه متوسط ذرات SiP پس از ارتعاش تحت سه بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب حدود ۳۴، ۵۵ و ۷۵ درصد کاهش و تعداد این ذرات در واحد سطح به ترتیب ۶، ۱۶ و ۳۶ برابر می‌شود. علاوه بر این، ارتعاش قالب تحت سه بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب موجب کاهش ۵۰، ۶۸ و ۷۵ درصدی اندازه دانه آلیاژ و توسعه ناحیه هم محور می‌شود. نتایج حاصل از دو آزمایش خوردگی تافل و امیدانس در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی حاکی از افزایش جریان خوردگی و انتقال ولتاژ خوردگی به مقادیر منفی‌تر در نمونه‌های ارتعاش یافته است. جریان خوردگی در نمونه بدون ارتعاش  $10^{-5} \times 10^{-3} \times 10^{-1}$  آمپر و در نمونه ۶۰ هرتز  $10^{-5} \times 10^{-3} \times 10^{-2}$  آمپر است. همچنین مقاومت انتقال بار در نمونه ۶۰ هرتز حدود ۷۶ اهم است که در مقایسه با نمونه بدون ارتعاش (۱۳۶/۵ اهم) حدود ۴۵ درصد کمتر است. افزایش چگالی مرزهای دانه و توزیع ظریف ذرات SiP (به عنوان مراکز کاتدی) در زمینه آلیاژ از جمله مهمترین عوامل افت مقاومت به خوردگی هستند زیرا موجب افزایش تعداد و کاهش فاصله بین پیل‌های گالوانیک در زمینه شده و مکان‌های مناسبی برای حفره‌زنی و حمله توسط محلول خورنده ایجاد می‌نماید.

### واژه‌های کلیدی:

آلیاژ Zn-4Si،  
ارتعاش مکانیکی،  
ریزساختار،  
خوردگی.

### ارجاع به این مقاله:

فائزه اکبری، رضا تقی‌آبادی، مرتضی ثقفی یزدی، ایمان انصاریان، بررسی تاثیر ارتعاش قالب هنگام انجماد بر ساختار و مقاومت به خوردگی آلیاژ ریختگی Zn-4Si، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۲، صفحات ۱۵۷-۱۶۷.  
شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.390435.1175

### ۱- مقدمه

پایه روی اختصاص دارد که برای ساخت قطعات خودرو، سیستم‌های الکترونیکی/الکتریکی، شیرآلات آب و لوازم بهداشتی، کالاهای خانگی و... استفاده می‌شود [۱].  
روی، با توجه به نقطه ذوب کم، سیالیت عالی، مقاومت به خوردگی مناسب و خواص یاتاقانی بسیار خوب، گزینه مناسبی برای تولید قطعات ریختگی است. با این وجود، این فلز به دلیل ارائه خواص مکانیکی ضعیف قادر به برآورده نمودن بسیاری از الزامات مکانیکی مورد نیاز قطعات مورد استفاده در کاربردهای

فلز روی به لحاظ کاربرد پس از آهن، آلومینیم و مس چهارمین فلز پرمصرف جهان است و بر اساس آمار موجود، عرضه جهانی این فلز در سال ۲۰۱۸ حدود ۱۳/۴ میلیون تن بوده است. علاوه بر مصرف به صورت شمش اولیه<sup>۱</sup>، سالانه مقادیر قابل توجهی از این فلز نیز مورد بازیافت قرار می‌گیرد به گونه‌ای که میزان تولید و مصرف روی ثانویه<sup>۲</sup> حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد مصرف جهانی آن است. از این مقدار مصرف، حدود ۱۵ درصد به تولید آلیاژهای

<sup>2</sup> Secondary ingot

<sup>1</sup> Primary ingot

صنعتی نیست [۲]. بنابراین ضروری است با بهره‌گیری از روش‌های مناسب، نسبت به ارتقای خواص مکانیکی آن اقدام نمود. از جمله مهمترین راهکارهای موجود برای بهبود خواص مکانیکی روی خالص می‌توان به آلیاژسازی/آلیاژ سازی و فرآوری مکانیکی مثلاً توسط فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید اشاره نمود.

در روش آلیاژسازی، به عنوان یک فرایند نسبتاً ساده و کم هزینه، سعی می‌شود با افزودن یک یا چند عنصر آلیاژی در مقادیر مناسب، خواص مکانیکی روی خالص ارتقا یابد. با توجه به آنکه اجرای این روش نیازمند تجهیزات خاصی نیست و اثر آن کل آلیاژ را در بر می‌گیرد، تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص آن انجام شده است که از جمله می‌توان به بررسی تاثیر لیتیم، منیزیم، کلسیم، ژرمانیم، مس، استرانسیم و نقره به صورت منفرد یا ترکیبی اشاره نمود [۳ و ۲]. با این وجود بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تاکنون تاثیر عنصر سیلیسیم بر خواص روی خالص مورد بررسی قرار نگرفته است.

سیلیسیم عنصری با چگالی کم (حدود ۲/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب)، سختی قابل توجه (بیش از ۱۰۰ نوپ<sup>۳</sup>) و نقطه ذوب نسبتاً زیاد (۱۴۱۴ درجه سانتیگراد) است. در صورت افزودن این عنصر به روی خالص می‌توان ضمن کاهش چگالی، سختی و استحکام (به ویژه استحکام دما بالای) آن را افزایش داد [۴]. با این حال، حلالیت حالت جامد سیلیسیم در روی خالص بسیار محدود است و این عنصر هنگام انجماد فاز مذاب، غالباً به صورت ذرات درشت سیلیسیم اولیه با مورفولوژی خشن و نامطلوب یا ذرات سیلیسیم یوتکتیک با مورفولوژی صفحه‌ای شکل در ریزساختار دیده می‌شود و موجب افت قابل ملاحظه خواص کششی و استحکام خستگی خواهد شد [۵]. علاوه بر این، ذرات درشت سیلیسیم اولیه اغلب به صورت آگلومره شده در ساختار رسوب می‌کنند و احتمال شکل‌گیری تخلخل‌های انقباضی در نواحی تجمع ذرات بسیار زیاد است [۵ و ۴]. بنابراین برای کسب خواص مطلوب از آلیاژهای روی-سیلیسیم، باید اندازه، شکل و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم تشکیل شده در ساختار (به ویژه ذرات سیلیسیم اولیه) را به طریق مناسب کنترل نمود.

اصلاح شکل، ابعاد و نحوه توزیع ذرات را می‌توان قبل از آغاز انجماد (مثلاً از طریق بهسازی شیمیایی و بهره‌گیری از ارتعاشات مکانیکی/فراصوتی)، بعد از خاتمه انجماد (مثلاً از طریق تغییر شکل پلاستیک شدید) و یا در هنگام انجماد (مثلاً ریخته‌گری نیمه جامد) انجام داد. استفاده از ارتعاشات مکانیکی (نوسان قالب) نخستین بار در سال ۱۸۶۸ برای تولید آستنیت

ریزدانه در فولادها مورد استفاده قرار گرفت اما پس از کسب نتایج موفقیت‌آمیز، این روش برای اصلاح ساختار آلیاژهای مختلف به ویژه آلیاژهایی که حاوی ذرات درشت اولیه در ساختار خود هستند توسعه یافت [۶]. تاثیر مثبت ارتعاش مکانیکی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ هایپرپروتکتیک A390 آلومینیم (حاوی ذرات سیلیسیم اولیه) توسط دماوندی و همکاران [۷] اثبات شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات ایشان، افزایش دمای بارریزی و ارتعاش قالب موجب کاهش قابل توجه ابعاد ذرات سیلیسیم اولیه و بهبود توزیع این ذرات در زمینه و بهبود خواص مکانیکی می‌شود. صفاری و همکاران [۸] نیز تاثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد روی سطح شیب‌دار را بر ساختار آلیاژهای Al-15Mg<sub>2</sub>Si و Al-25Mg<sub>2</sub>Si حاوی ذرات اولیه Mg<sub>2</sub>Si بررسی نمودند و نشان دادند که ارتعاشات مکانیکی حین انجماد موجب بهسازی موثر ریزساختار این آلیاژها می‌شود. تاثیر بسامد ارتعاشات مکانیکی بر ریزساختار و سختی آلیاژ نیمه جامد A380 نیز حاکی از آن است که به علت کاهش اندازه دانه‌ها بیشترین سختی در دمای ۶۲۵ درجه سانتیگراد، بسامد ارتعاش ۶۰ هرتز و زمان ارتعاش ۱۵ ثانیه حاصل می‌شود [۹].

مشابه آلیاژهای هایپرپروتکتیک Al-Si به دلیل شکل‌گیری ذرات سخت سیلیسیم اولیه (به صورت درجا<sup>۴</sup>) در ریزساختار آلیاژ هایپرپروتکتیک Zn-4Si، این آلیاژ را می‌توان به عنوان یک کامپوزیت درجا متشکل از ذرات سخت سیلیسیم در زمینه آلفای غنی از روی در نظر گرفت که مورفولوژی، ابعاد، کسر حجمی و نحوه توزیع ذرات فاز دوم تقویت کننده اثرات قابل توجهی بر رفتار خوردگی آن دارند [۱۱ و ۱۰]. از جمله مهمترین علل بروز خوردگی در مواد کامپوزیتی می‌توان به ایجاد زوج‌های گالوانیک بین زمینه و ذرات تقویت کننده و تاثیر منفی خوردگی ذرات یا زمینه اطراف ذرات بر پیوستگی لایه محافظ شکل گرفته روی سطح اشاره نمود [۱۱]. با توجه به تاثیر قابل توجه ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر مشخصات هندسی شامل ابعاد، مورفولوژی و نحوه توزیع ذرات فاز دوم به ویژه ذرات درشت و خشن اولیه که حین انجماد آلیاژهای هایپرپروتکتیک از فاز مذاب متبلور می‌شوند، در تحقیق حاضر، که در واقع گزارش بخشی از یک تحقیق جامع در زمینه بررسی خواص آلیاژهای جدید Zn-Si است، سعی شده است تاثیر این ارتعاشات بر ریزساختار و رفتار خوردگی آلیاژ درجای Zn-4Si مورد بررسی قرار گیرد.

<sup>3</sup> Knoop  
<sup>4</sup> In-situ

## ۲- مواد و روش تحقیق

که در آن  $f_{Eq}$  و  $f_{Col}$  به ترتیب کسر حجمی دانه‌های با مورفولوژی ستونی و هم محور و  $d_{Eq}$  و  $d_{Col}$  به ترتیب اندازه دانه‌های ستونی ((طول دانه ستونی + قطر دانه ستونی)  $\times 0/5$ ) و هم محور است [۱۲].

رفتار خوردگی آلیاژ Zn-4Si با استفاده از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیو دینامیکی بررسی شد. بدین منظور، یک سطح مقطع دایره‌ای شکل از هر نمونه با استفاده از یک سیستم سه الکترودی در معرض محیط خورنده‌ی نمکی NaCl ۳/۵ درصد وزنی قرار گرفت. هر نمونه (الکتروود کاری) قبل از انجام آزمایش خوردگی به مدت ۳۰ دقیقه جهت تثبیت پتانسیل سطحی الکترود در محلول خورنده غوطه‌ور شد. همچنین از الکترود پلاتین به عنوان الکترود مقابل و الکترود کالومل به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. با استفاده از یک دستگاه پتانسیو استات - گالوانواستات (Ivium-Vertex-Neatherland) اسکن‌های پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک برای هر نمونه با سرعت اسکن ۲ میلی‌ولت بر ثانیه نسبت به پتانسیل مدار باز انجام شد. محدوده پنجره پتانسیل در آزمایش خوردگی تافل جهت تعیین پتانسیل و جریان خوردگی در محدوده ۲- تا ۲+ ولت برای هر نمونه انتخاب شد. همچنین آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز با دامنه ۵ میلی‌ولت جهت محاسبه مقاومت انتقال بار صورت پذیرفت. یک مدار معادل نیز در نرم افزار ZView برای تجزیه و تحلیل داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی تنظیم شد.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی بر مشخصات ریزساختاری

## آلیاژ Zn-4Si

تصویر میکروسکپ الکترونی و میکروسکپ نوری نشان‌دهنده ریزساختار آلیاژ ریختگی Zn-4Si به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است. با توجه به نمودار فازی دوتایی روی-سیلیسیم (شکل ۳) در صورت بررسی روند انجماد آلیاژ حاوی ۴ درصد وزنی (۸/۸ درصد اتمی) سیلیسیم با کاهش دما، می‌توان مشاهده نمود که انجماد آلیاژ با جوانه‌زنی ذرات سیلیسیم اولیه در دمای حدود ۸۷۰ درجه سانتیگراد آغاز می‌شود. در ادامه و با کاهش دما، غلظت مذاب به علت مصرف اتم‌های سیلیسیم کاهش یافته و پس از رسیدن به حدود ۰/۴۵ درصد وزنی، انجماد با واکنش یوتکتیک  $Zn + Si_E \rightarrow L$  در دمای حدود ۴۲۰ درجه سانتیگراد خاتمه می‌یابد. بنابراین دو جزء اصلی ریزساختار آلیاژ Zn-4Si عبارتند از ذرات سیلیسیم اولیه با ترکیب شیمیایی ارائه شده در شکل ۲-ج در زمینه یوتکتیک آلیاژ (شکل ۲-ب).

ترکیب شیمیایی آلیاژ Zn-4Si مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. آلیاژ به صورت درجا در یک بوته کاربید سیلیسیمی توسط یک کوره ذوب مقاومتی سه فاز (AZAR-VM60L-) با توان خروجی ۱۴ کیلو وات ساخته شد. بدین منظور، ابتدا شمش‌های روی خالص (۹۹/۹۹ درصد وزنی) تحت فلاکس پوششی بر پایه کلرید روی ذوب شدند. پس از رسیدن به دمای مناسب، مقادیر مورد نظر از سیلیسیم خالص (۹۹/۹۹ درصد وزنی) خرد شده تدریجاً به مذاب افزوده شد و به منظور تسریع در فرایند انحلال، مذاب به آرامی توسط یک میله فولادی پوشش داده شده توسط پوشان کرومیتی هم زده شد. بعد از تکمیل عملیات ذوب و سرباره‌گیری، عملیات ریخته‌گری بخشی از مذاب در دمای حدود ۸۷۰ درجه سانتیگراد درون یک قالب فولادی استوانه‌ای شکل (شکل ۱-الف) انجام شد.

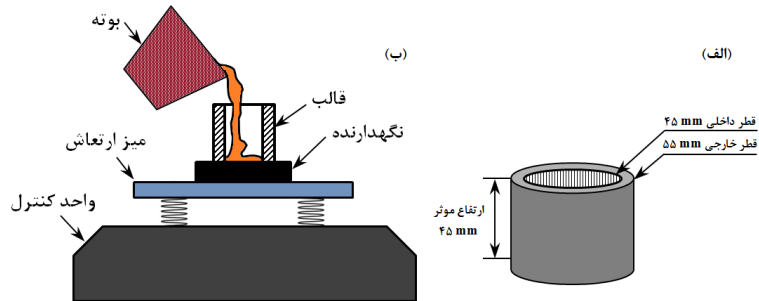
برای بررسی تاثیر ارتعاش قالب روی ریزساختار و رفتار خوردگی، نمونه‌هایی تحت سه بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز منجمد شدند. بدین منظور، مقداری از مذاب در دمای ۸۷۰ درجه سانتیگراد درون یک قالب فولادی استوانه‌ای با هندسه و ابعاد نشان داده شده در شکل ۱-الف نصب شده روی دستگاه ارتعاش‌دهنده مکانیکی (شکل ۱-ب) ریخته شد به گونه‌ای که انجماد مذاب هم‌زمان با ارتعاش مکانیکی در بسامدهای مورد نظر صورت پذیرفت. دمای قالب هنگام بارریزی ۲۵ درجه سانتیگراد بود.

به منظور بررسی تاثیر ارتعاش قالب روی ریزساختار و درشت ساختار، پس از آماده‌سازی سطح شامل سنباده‌زنی و صیقل کاری با خمیر الماس ۰/۵ میکرومتر، عملیات حکاکی نمونه‌ها توسط محلول نایتال ۴ درصد حجمی (حاوی ۴ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۹۶ میلی‌لیتر اتانول) برای بررسی‌های ریزساختاری و درشت‌ساختاری انجام شد. برای بررسی ساختار میکروسکپی و ماکروسکپی از یک میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز عنصری (EDS) و یک میکروسکپ نوری استفاده شد. پردازش تصویری ریزساختار آلیاژ مورد تحقیق از طریق بررسی سه تصویر مختلف میکروسکپ نوری در بزرگنمایی ۵۰۰ برای هر حالت و با استفاده از نرم افزار UTHSCSA image tool ورژن ۱/۲۸ انجام شد. همچنین اندازه موثر دانه‌ها ( $d_{eff}$ ) توسط معادله (۱) تعیین شد:

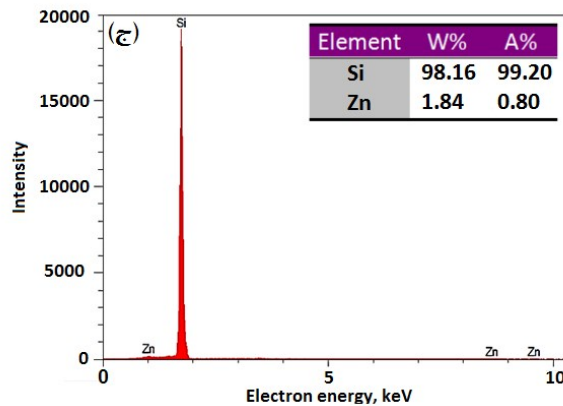
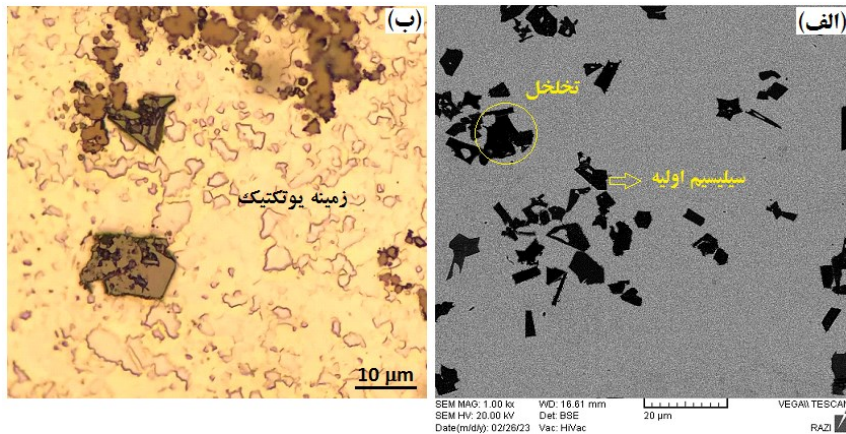
$$d_{eff} = f_{Col} \times d_{Col} + f_{Eq} \times d_{Eq} \quad (1)$$

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در تحقیق حاضر (درصد وزنی)

ماده	Zn	Pb	Cd	Cu	Fe	Al	Sn	Si	سایر ناخالصی ها
روی خالص	۹۹/۹۹	۰/۰۰۵ max	۰/۰۰۳ max	۰/۰۰۵ max	۰/۰۰۳ max	۰/۰۰۲ max	۰/۰۰۱ max	--	--
آلیاژ Zn-4Si	۹۶/۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۳/۸۳	۰/۰۱



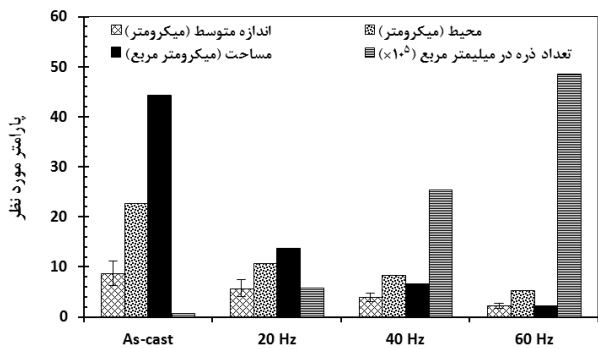
شکل ۱- تصویر نمادین (الف) قالب فولادی و (ب) دستگاه ارتعاش‌دهنده مکانیکی.



شکل ۲- (الف) و (ب) به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نوری ریزساختار آلیاژ Zn-4Si و (ج) آنالیز EDS ذرات سیلیسیم اولیه.

قابل توجه ابعاد ذرات و بهبود شرایط توزیع آن‌ها در زمینه می‌شود. تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده تاثیر ارتعاش مکانیکی قالب در سه بسامد مورد آزمایش (۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز) روی ریزساختار آلیاژ Zn-4Si به ترتیب در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج و نمودار توزیع فراوانی اندازه میانگین ذرات SiP در شکل ۵ ارائه شده است. کسر سطحی ذرات سیلیسیم اولیه از حدود ۸/۴ درصد

در شرایط انجماد معمولی (بدون ارتعاش مکانیکی)، به علت بالا بودن دما و نفوذ آسان عناصر، ذرات سیلیسیم اولیه به صورت ذرات درشت چندوجهی دارای گوشه‌های تیز و به صورت غیر یکنواخت (آگلومره شده) در زمینه آلیاژ توزیع می‌شوند (شکل ۲-الف). با این حال، ارتعاش مکانیکی قالب هنگام انجماد آلیاژ علاوه بر افزایش نسبی کسر سطحی ذرات SiP موجب کاهش

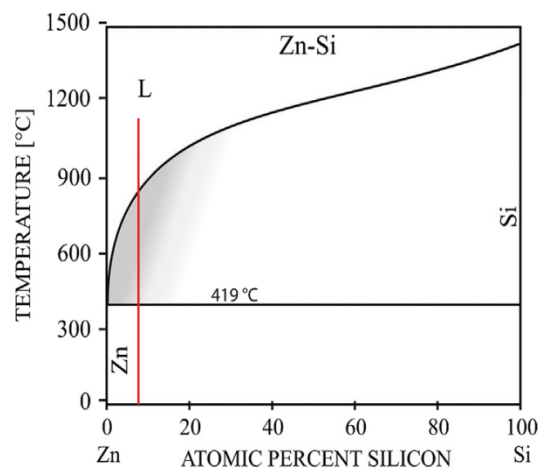


شکل ۶- نمودار نتایج آنالیز تصویری نشان‌دهنده تاثیر بسامد ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر مشخصات هندسی ذرات سیلیسیم اولیه.

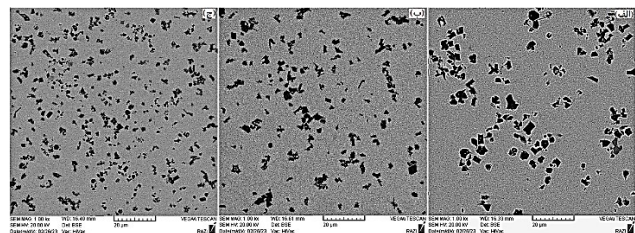
تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر ارتعاشات مکانیکی بر بهسازی ساختار آلیاژهای مهندسی انجام شده و مکانیزم‌های مختلفی برای توجیه اثرات ارتعاش ارائه شده است. از جمله مهمترین مکانیزم‌های مطرح شده می‌توان به تغییر حالت جریان‌های درون مذاب از آرام به آشفته، شکسته شدن فازهای در حال رشد/دندریت‌ها در اثر تنش‌های خمشی وارده از جانب مذاب، تغییر شرایط انتقال جرم و حرارت درون مذاب [۷] و شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های کائوتاسیونی<sup>۵</sup> درون مذاب اشاره نمود. با این حال، به نظر می‌رسد که اثربخشی برخی از مکانیزم‌های فوق در تحقیق حاضر، بسیار کم و وقوع‌شان نامحتمل است. به عنوان مثال، اگر چه وقوع کائوتاسیون ضمن شکستن و خردایش فازها در اثر برخورد مستقیم حباب‌ها با ذرات و/یا فشار ناشی از فروپاشی حباب‌ها، با ایجاد مراکز موضعی دارای تحت تبرید<sup>۶</sup> فشاری قابل توجه درون مذاب [۱۴-۱۶] موجب کاهش ابعاد اجزای ساختاری می‌شود اما با توجه به کم بودن بسامد ارتعاشات در تحقیق حاضر، شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های کائوتاسیونی در آلیاژ مذاب عملاً غیر ممکن است. همچنین به دلیل سختی زیاد و صلب بودن ذرات سیلیسیم، خردایش این ذرات در اثر ارتعاشات وارده بسیار نامحتمل است [۱۶].

بنابراین کاهش ابعاد ذرات SiP در آلیاژ Zn-4Si را می‌توان ناشی از بهبود شرایط انتقال جرم و حرارت درون مذاب (قالب) و متعاقباً افزایش سرعت سرد شدن مذاب دانست که موجب می‌شود مقادیر قابل توجه از ذرات سیلیسیم روی سطح مذاب و دیواره‌های قالب جوانه زده و در اثر نیروهای جابجایی ناشی از ارتعاش به درون مذاب هدایت شوند [۱۶]. علاوه بر این به نظر می‌رسد که تغییر حالت جریان از جریان آرام به جریان مخلوط (حالتی بین جریان آرام و جریان آشفته) و اعمال تنش‌های خمشی/برشی ناشی از جریان‌های شکل گرفته درون مذاب نیز کمک موثری به توزیع یکنواخت‌تر ذرات در زمینه می‌کند. همچنین بر اساس

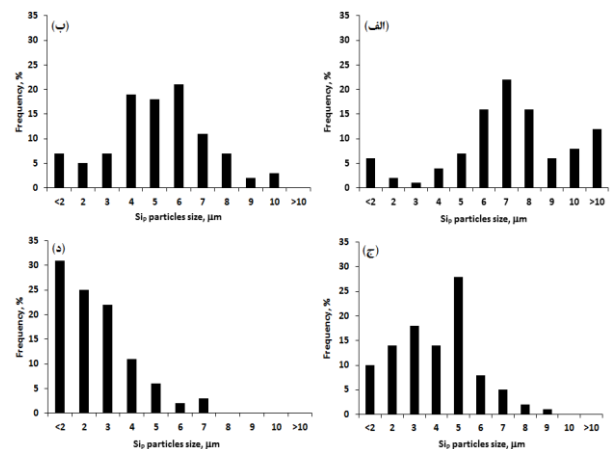
در نمونه بدون ارتعاش تا حدود ۱۱ درصد در نمونه‌های ارتعاش یافته افزایش می‌یابد. بررسی‌های پردازش تصویری (شکل ۶) بیانگر کاهش ۳۴، ۵۵ و ۷۵ درصدی اندازه متوسط ذرات SiP به ترتیب در سه نمونه منجمد شده تحت بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز است. علاوه بر این، در مقایسه با آلیاژ ریختگی (پایه)، تعداد ذرات در واحد سطح آلیاژهای منجمد شده تحت ارتعاش مکانیکی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب ۶، ۱۶ و ۳۶ برابر شده است.



شکل ۳- نمودار فازی دوتایی Zn-Si [۱۳].



شکل ۴- تصاویر SEM نشان‌دهنده تاثیر بسامد ارتعاش مکانیکی حین انجماد بر ریزساختار آلیاژ Zn-4Si، (الف) ۲۰ هرتز، (ب) ۴۰ هرتز و (ج) ۶۰ هرتز.



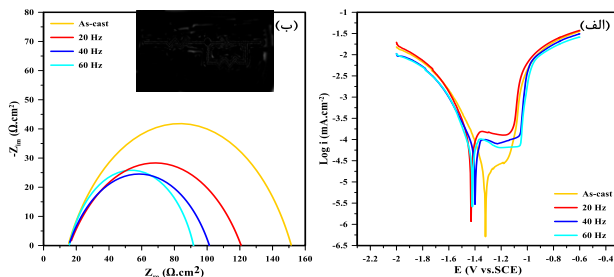
شکل ۵- نمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات سیلیسیم اولیه در آلیاژ ریختگی (الف) و آلیاژهای فرآوری ارتعاشی شده در فرکانس‌های مختلف (ب) ۲۰ Hz، (ج) ۴۰ Hz و (د) ۶۰ Hz

<sup>6</sup> Undercooling

<sup>5</sup> Cavitation bubbles

اختلاف قابل توجهی در پتانسیل خوردگی دیده نمی‌شود. برای به دست آوردن چگالی جریان خوردگی از شاخه‌های کاتدی (b<sub>c</sub>) و آندی (b<sub>a</sub>) شیب‌هایی ترسیم شد و محل برخورد آنها به عنوان جریان و پتانسیل خوردگی معرفی شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

پایین بودن چگالی جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) بیانگر نرخ خوردگی کم و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی است [۲۴]. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۷-الف، اعمال ارتعاشات مکانیکی به قالب در حین انجماد آلیاژ، موجب افزایش چگالی جریان خوردگی و انتقال پتانسیل خوردگی به مقادیر منفی‌تر شده است. این امر نشان‌دهنده افزایش میزان خوردگی (کاهش مقاومت به خوردگی) در تمام نمونه‌های تحت ارتعاش نسبت به نمونه ریختگی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه ریختگی (بدون ارتعاش) کمترین جریان خوردگی ( $1.0 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ) را نشان می‌دهد در حالی که جریان خوردگی نمونه‌های ارتعاش یافته با بسامد ۲۰، ۴۰، ۶۰ هرتز به ترتیب  $1.0 \times 10^{-4}$ ،  $3.93 \times 10^{-5}$  و  $2.33 \times 10^{-5}$  آمپر است. افت مشاهده شده در مقاومت به خوردگی نمونه‌های تحت تاثیر ارتعاش را می‌توان با کاهش اندازه دانه و توزیع ظریف ذرات سیلیسیم در زمینه آلیاژ توجیه نمود.



شکل ۷- نمودارهای خوردگی الکتروشیمیایی، (الف) منحنی‌های پلاریزاسیون تافل، (ب) نمودارهای نایکوئیست و مدار معادل مورد استفاده برای آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی.

جدول ۲- پارامترهای الکتروشیمیایی آلیاژهای Zn-4Si در محلول NaCl ۳/۵ درصد حاصل از آزمایش تافل

نحوه انجماد				پارامتر
همراه با ارتعاش (بسامد)			بدون ارتعاش	
۶۰ هرتز	۴۰ هرتز	۲۰ هرتز		$E_{corr}$ (V)
-۱/۴۱	-۱/۳۹	-۱/۴۳	-۱/۳۳	
-۵	-۵	-۵	-۵	
$-2.33 \times 10^{-5}$	$-3.93 \times 10^{-5}$	$-4.02 \times 10^{-5}$	$-1.0 \times 10^{-5}$	$i_{corr}$ (A)
۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۳۷	$b_a$ (V/dec)
۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	$b_c$ (V/dec)
۰/۱۳۱	۰/۱۲۸	۰/۰۷۶	۰/۰۴۴	نرخ خوردگی (mm/y)

تحقیقات ژانگ [۱۷]، شکل‌گیری و ورود اکسیدهای سطحی به صورت ذرات نانومتری به مذاب و ایفای نقش این ذرات به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی غیر همگن از عوامل کاهش ابعاد ذرات سیلیسیم است.

همانگونه که قبلاً عنوان شد، انجماد آلیاژ Zn-4Si با جوانه‌زنی ذرات سیلیسیم اولیه در ناحیه دو فازی "مذاب + سیلیسیم اولیه" آغاز می‌شود. با این حال، تحقیقات نشان داده است که هنگام رشد این ذرات به دلیل مصرف اتم‌های سیلیسیم مذاب، لایه‌ای فقیر از سیلیسیم در فصل مشترک ذرات با مذاب شکل گرفته و بسته به غلظت عنصر محلول و سرعت انجماد، تشکیل فاز آلفا به صورت گلبول‌های منفرد یا دندریت‌های آلفا موسوم به سلول‌های دندریتی ترغیب می‌شود [۷]. تشکیل دندریت‌ها/گلبول‌های فاز آلفا در ساختار آلیاژهای هایپرپوتکتیک توسط محققان مختلف گزارش شده است که از جمله می‌توان به آلیاژهای هایپرپوتکتیک Al-Si [۱۸ و ۱۹] و آلیاژ هایپرپوتکتیک Al-Fe-Zr [۲۰] اشاره نمود.

اعمال ارتعاشات مکانیکی به مذاب هنگام انجماد موجب کاهش ابعاد دانه‌ها/سلول‌های دندریتی<sup>۷</sup> در آلیاژ مورد بررسی می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده اندازه موثر دانه‌ها پس از فرآوری تحت سه بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز در مقایسه با حالت بدون ارتعاش (۱۶۶۰ میکرومتر)، به ترتیب حدود ۵۰، ۶۸ و ۷۶ درصد کاهش یافته است. بر اساس نتایج تحقیقات کریتا و همکاران [۲۱] و کودریاوشوا و همکاران [۲۲] در صورت اعمال ارتعاشات مکانیکی به مذاب به‌واسطه افزایش تماس بین مذاب و قالب و در نتیجه افزایش انتقال حرارت (با مکانیزم جابجایی) و همچنین تشدید تلاطم سطحی، سرعت انجماد افزایش یافته، انجماد غیر تعادلی ترغیب شده و احتمال شکل‌گیری فاز آلفا به صورت منفرد یا دندریتی در زمینه آلیاژ هایپرپوتکتیک افزایش می‌یابد. اندازه سلول‌های منفرد فاز آلفا قویاً متأثر از سرعت انجماد است و با افزایش بسامد ارتعاش قالب احتمالاً به دلیل تاثیر توامان افزایش سرعت انجماد و افزایش نیروهای برشی ناشی از ارتعاش [۲۲ و ۲۳]، کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- بررسی تاثیر ارتعاش قالب بر رفتار خوردگی آلیاژ Zn-4Si

برای ارزیابی مقاومت به خوردگی آلیاژ Zn-4Si، از روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی در الکترولیت NaCl ۳/۵ درصد استفاده شد. منحنی‌های آزمایش تافل در شکل ۷-الف نشان داده شده است. به دلیل ترکیب یکسان آلیاژهای مورد بررسی، شکل کلی منحنی تافل برای تمامی نمونه‌ها تقریباً شبیه به هم و

<sup>7</sup> Dendrite cells

در زمینه آندی یک آلیاژ با توجه به مکانیزم "کاتد کوچک-آند بزرگ"<sup>۸</sup> می‌تواند موجب بهبود مقاومت به خوردگی شود. در حقیقت با ریزدانه‌سازی ذرات سیلیسیم در زمینه روی نسبت سطحی کاتد (ذرات سیلیسیم) به آند (زمینه روی) افزایش می‌یابد و همین عامل منجر به افزایش چگالی جریان در آند و افزایش سرعت خوردگی می‌شود. البته گزارش‌هایی متضاد با این تحقیق نیز در خصوص آلیاژهای با قابلیت تشکیل لایه محافظ مانند آلیاژهای پایه آلومینیم یا تیتانیوم ارائه شده است. نتایج حاصل از تحقیقات ژیانگ<sup>۹</sup> و همکاران روی تاثیر فرایند پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان<sup>۱۰</sup> (ECAP) بر مقاومت به خوردگی آلیاژ Al-23Si نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس فرایند تا ۱۶ به دلیل کاهش قابل ملاحظه ابعاد ذرات فاز ثانوی (و همچنین تخلخل‌ها) و توزیع همگن‌تر ذرات در زمینه آلومینیم آلفا، مقاومت به خوردگی آلیاژ در محیط NaCl ۰/۶ درصد به دلیل کاهش ابعاد دانه‌ها به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد که دلیل آن تسریع در تشکیل لایه محافظ در اثر سرعت بالای خوردگی در ابتدای فرایند خوردگی است [۳۱]. نتایج تحقیقات پی<sup>۱۱</sup> و همکاران روی تاثیر فرایند نورد تجمعی<sup>۱۲</sup> (ARB) بر رفتار خوردگی آلیاژ AZ63 منیزیم نیز حاکی از روندی مشابه است. بر اساس نتایج تحقیقات ایشان، پس از ۵ پاس ARB به دلیل کاهش ابعاد و بعضاً انحلال رسوبات Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> به عنوان پیل‌های میکروگالوانیک، ارتقای قابل توجهی در مقاومت به خوردگی آلیاژ نسبت به آلیاژ پایه مشاهده می‌شود [۳۲].

برخی دیگر از محققان معتقد هستند که کاهش ابعاد ذرات کاتدی در زمینه آندی یک آلیاژ، موجب افزایش نرخ خوردگی آلیاژ می‌شود. تحقیقات کورچف<sup>۱۳</sup> و همکاران روی تاثیر فرایند ECAP بر رفتار خوردگی آلومینیم خالص تجاری حاکی از آن است که با افزایش تعداد پاس فرایند و نتیجتاً افزایش تعداد پیل‌های گالوانیک شکل گرفته بین ذرات غنی از آهن  $\alpha$ -AlFeSi و زمینه آلومینیم، سطح تماس بین ذرات فاز ثانوی شکسته شده و زمینه افزایش می‌یابد. این امر موجب تشدید انحلال زمینه اطراف ذرات و در نتیجه افت مقاومت به خوردگی می‌شود [۳۳]. این مطلب در توافق با نتایج تحقیقات وی<sup>۱۴</sup> و همکاران است که نشان دادند شکسته شدن ذرات فاز ثانوی در آلیاژ Al-Mn فرآوری شده به روش ARB تاثیر منفی روی مقاومت به خوردگی دارد [۳۴]. همچنین تحقیقات نائینی و همکاران [۳۵] حاکی از آن است که افزایش تعداد پاس ARB موجب کاهش ابعاد و نتیجتاً افزایش سطح در معرض ذرات بین فلزی غنی از منیزیم

جدول ۳- پارامترهای الکتروشیمیایی آلیاژهای Zn-4Si در محلول NaCl ۲/۵

درصد حاصل از آزمایش امپدانس				پارامتر
نحوه انجماد				
همراه با ارتعاش (بسامد)		بدون		ارتعاش
۶۰ هرتز	۴۰ هرتز	۲۰ هرتز	۱۵/۰	
۱۵/۷	۱۵/۴	۱۵/۸	۱۵/۰	R <sub>s</sub> (Ω)
۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۱۰	CPE (μF)
۰/۷۶	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۷۰	C <sub>p</sub> (μF)
۷۶/۰	۸۶/۰	۱۰۵/۰	۱۳۶/۵	R <sub>ct</sub> (Ω)

اندازه دانه یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر عملکرد خوردگی نمونه‌های فلزی بوده و تاثیر آن روی رفتار خوردگی، پیچیده و متاثر از چندین مکانیزم مختلف است. با کاهش اندازه دانه، چگالی مرزها به عنوان مناطق پرانرژی (دارای بی نظمی اتمی قابل توجه) افزایش می‌یابد. این مناطق پرانرژی به دلیل فعالیت شیمیایی بیشتر نسبت به نواحی درون دانه، استعداد بیشتری به واکنش با محیط‌های خورنده دارند. همچنین مرز دانه‌ها مسیرهای مناسبی را برای نفوذ یون‌ها و عوامل خورنده به درون ماده/زیر سطح (مثلاً در محلولی که حاوی یون‌های Cl<sup>-</sup> است) فراهم آورده و به آغاز حملات خوردگی کمک می‌نمایند. بنابراین کاهش اندازه دانه، می‌تواند موجب افت مقاومت به خوردگی شود [۲۵و۲۶].

یکی دیگر از اثرات ارتعاشات مکانیکی بر ریزساختار آلیاژ Zn-4Si کاهش ابعاد و بهبود شرایط توزیع ذرات سیلیسیم در زمینه است (شکل ۴). با توجه به جدول سری الکتروشیمیایی، در آلیاژ مورد بررسی، ذرات سیلیسیم پتانسل الکتروشیمیایی در حالت احیایی معادل ۱۷۰ mV/ECS- دارد [۲۷] و نسبت به زمینه روی خالص (۱۰۳۳ mV/ECS-) مثبت تر بوده [۲۸] که نشان دهنده نجیب-تر بودن ذرات سیلیسیم نسبت به زمینه حاوی روی است لذا انتظار می‌رود که در یک محیط خورنده این ذرات به عنوان مراکز کاتدی در زمینه آلیاژ عمل نمایند و زمینه روی که به عنوان آند عمل کرده و دچار خوردگی می‌شود [۲۹]. در واقع به علت ریز شدن ذرات سیلیسیم و به سبب پتانسیل خوردگی مثبت تر این ذرات قادر به پشتیبانی از چگالی جریان کاتدی بیشتر شده (احیای اکسیژن) و موجب تسریع انحلال آندی زمینه اطراف خود می‌شوند [۳۰].

تاثیر کاهش اندازه و بهبود شرایط توزیع ذرات (فاز ثانوی) کاتدی بر مقاومت به خوردگی آلیاژها توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این محققان معتقدند که کاهش ابعاد و توزیع همگن ذرات فاز ثانوی به عنوان مناطق کاتدی مجزا

<sup>12</sup> Accumulative roll bonding

<sup>13</sup> Kurchef

<sup>14</sup> Wei

<sup>8</sup> Small cathode and large anode

<sup>9</sup> Jiang

<sup>10</sup> Equal channel angular pressing

<sup>11</sup> Pei

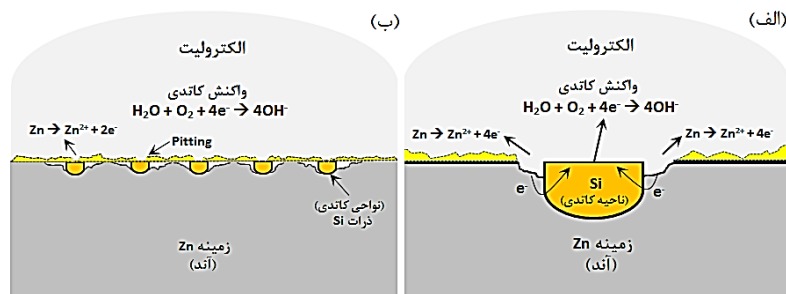
انتقال بار و CPE عنصر فاز ثابت و Cp ظرفیت است. با توجه به پارامترهای جدول و مطابق با منحنی‌های تافل، با اعمال ارتعاش مکانیکی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز در حین انجماد آلیاژ Zn-4Si در آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی مقاومت انتقال بار از ۱۳۶/۵ اهم در نمونه بدون ارتعاش کاهش یافته و به ترتیب ۱۰۵، ۸۶ و ۷۶ اهم می‌باشد که نشان دهنده کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با افزایش بسامد در حین انجماد است.

شکل ۹ تصاویر SEM تهیه شده از سطح خوردگی نمونه‌های مورد مطالعه را بعد از انجام آزمایش پلاریزاسیون نشان می‌دهد. در توافق با نتایج آزمایش‌های خوردگی (شکل ۷ و جداول ۲ و ۳)، مقایسه ریزساختار سطح آلیاژ Zn-4Si بدون ارتعاش مکانیکی (شکل ۹-الف) با ریزساختار سطح آلیاژهای Zn-4Si تحت انجماد با اعمال ارتعاش مکانیکی در بسامد ۲۰ (شکل ۹-ب) و ۶۰ هرتز (شکل ۹-ج) نشان می‌دهد که خوردگی در نمونه‌های تحت ارتعاش شدیدتر از نمونه بدون ارتعاش بوده است. همانگونه که قبلاً نیز عنوان گردید، کاهش اندازه دانه‌ها و توزیع ظریف ذرات سیلیسیم (به‌عنوان مناطق کاتدی) در زمینه آلیاژهای منجمد شده تحت ارتعاش، موجب افزایش قابل توجه تعداد پیل‌های گالوانیک در زمینه می‌شود. افزایش چگالی سلولهای دندریایی فاز آلفا در نمونه‌های ۲۰ و ۶۰ هرتز، که مکان‌های مناسبی برای حفره‌زنی و حمله توسط محلول خورنده ایجاد کرده‌اند، موجب شده است که لایه غیر فعال ایجاد شده به سرعت و شدت مورد خوردگی قرار گرفته، از بین رفته و خوردگی تشدید شود. با افزایش پتانسیل و افزایش خوردگی، روی سطح این دو نمونه، حفره‌هایی تشکیل شده و محصولات خوردگی در اطراف آن‌ها با شدت بیشتری رشد کنند. روی سطح خوردگی نمونه ارتعاش یافته تحت بسامد ۶۰ هرتز حفراتی با قطر بزرگتر پدید آمده است که در توافق با نتایج آزمایش خوردگی، بیانگر خوردگی بیشتر در این نمونه است.

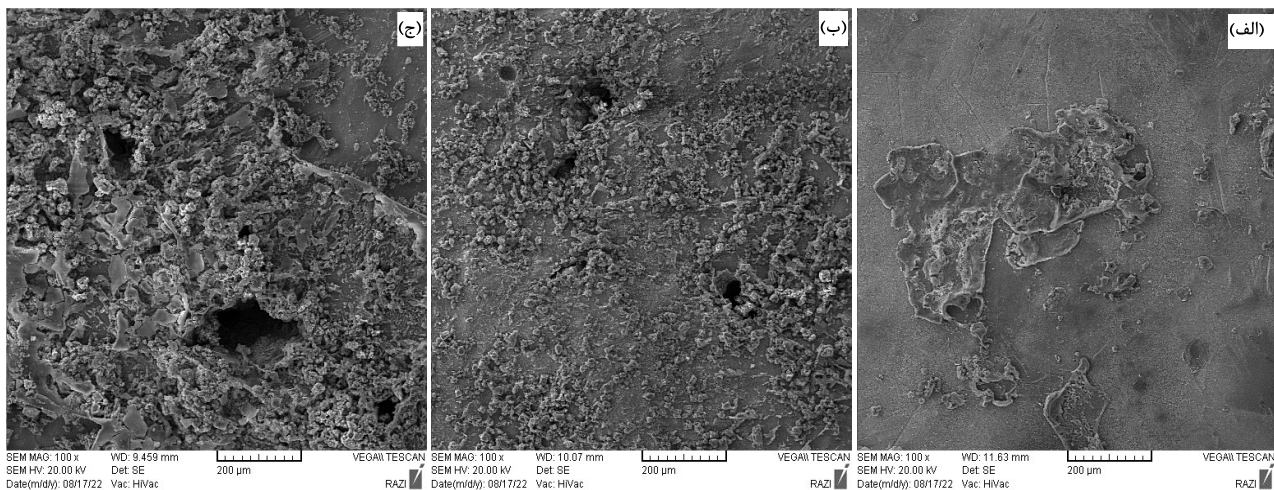
و آهن در زمینه آلیاژهای AA5052 آلومینیم می‌شود. تحت این شرایط مکان‌های مرجح برای وقوع خوردگی حفره‌ای در زمینه افزایش یافته و خوردگی تشدید می‌شود.

با توجه به شکل ۷-الف، در نمونه‌های تحت ارتعاش، یک ناحیه غیر فعال کوچک در شاخه آندی منحنی‌های پلاریزاسیون مشاهده می‌شود که با افزایش پتانسیل در محدوده ۱- ولت و افزایش چگالی جریان این لایه غیر فعال از بین رفته و خوردگی مجدداً افزایش یافته است. بنابراین به نظر می‌رسد که در توافق با نتایج دسته دوم از محققان، کاهش ابعاد و توزیع ذرات سیلیسیم در زمینه آلیاژهای ارتعاش یافته حین انجماد، نه تنها منجر به بروز خوردگی یکنواخت و تشکیل لایه محافظ سطحی نشده، بلکه به واسطه افزایش قابل توجه تعداد و فاصله بین پیل‌های گالوانیک در زمینه، مکان‌های مناسبی برای حفره‌زنی و حمله توسط محلول خورنده ایجاد می‌نماید. تصویر نمادین چگونگی تاثیر ذرات سیلیسیم بر رفتار خوردگی آلیاژ Zn-4Si قبل و پس از اعمال ارتعاشات مکانیکی به ترتیب در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب ارائه شده است.

برای تجزیه و تحلیل بیشتر عملکرد خوردگی آلیاژهای Zn-4Si، از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز استفاده شد. بر اساس نمودارهای شکل ۷-ب و جدول ۳، حلقه‌های نیمه دایره‌ای خازنی از نظر شکل برای همه نمونه‌ها مشابه هستند، اگر چه قطرهای متفاوت است. افزایش قطر منحنی نایکوئست بیانگر مقاومت بالا در برابر انتقال بار ( $R_{ct}$ ) است. به طور کلی، قطر بیشتر نیم دایره در این نمودار به معنای مقاومت بهتر در برابر خوردگی است [۳۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آلیاژ Zn-4Si بدون اعمال ارتعاش دارای بالاترین مقاومت انتقال بار (۱۳۶ اهم) و بالاترین مقاومت در برابر خوردگی است. در مدار معادل نشان داده شده در شکل ۷-ب (همان‌طور که در نرم افزار ZView انتخاب شده است) و جدول ۳، مقاومت محلول  $R_s$  و  $R_{ct}$  مقاومت



شکل ۸: تصویر نمادین چگونگی تاثیر ذرات سیلیسیم بر رفتار خوردگی آلیاژ Zn-4Si قبل و پس از اعمال ارتعاشات مکانیکی.



شکل ۹- تصاویر سطح نمونه‌ها پس از خوردگی (الف) نمونه بدون ارتعاش، (ب) 20 Hz، (ج) 60 Hz.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- اعمال ارتعاش مکانیکی هنگام انجماد آلیاژ Zn-4Si موجب کاهش قابل توجه ابعاد ذرات درشت چندوجهی SiP و بهبود شرایط توزیع آن‌ها در زمینه می‌شود. بر اساس نتایج پردازش تصویری اعمال ارتعاش با بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب موجب کاهش ۳۴، ۵۵ و ۷۵ درصدی اندازه متوسط ذرات SiP و افزایش ۷، ۳۲ و ۶۰ درصد ذرات در واحد سطح (میکرومتر مربع) می‌شود. فرآوری مذاب آلیاژ تحت سه بسامد ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز همچنین موجب کاهش به ترتیب حدود ۵۰، ۶۸ و ۷۶ درصدی اندازه موثر دانه‌ها در مقایسه با حالت بدون ارتعاش می‌شود.
- ۲- اعمال ارتعاشات مکانیکی موجب افزایش چگالی جریان خوردگی و انتقال پتانسیل خوردگی به مقادیر منفی‌تر می‌شود. جریان خوردگی در نمونه بدون ارتعاش و نمونه‌های ارتعاش یافته تحت بسامد ۲۰، ۴۰، ۶۰ هرتز به ترتیب برابر با  $۱۰^{-۵} \times ۱/۳۶$ ،  $۱۰^{-۵} \times ۴/۰۲$ ،  $۱۰^{-۵} \times ۳/۹۳$  و  $۱۰^{-۵} \times ۲/۳۳$  آمپر است.
- ۳- کاهش ابعاد سلول‌های دندردیتی و توزیع ظریف ذرات سیلیسیم (به عنوان مراکز کاندی) در زمینه آلیاژ دو عامل اصلی تغییر رفتار خوردگی آن پس از اعمال ارتعاش مکانیکی هستند زیرا موجب افزایش قابل توجه تعداد پیل‌های گالوانیک در زمینه شده و مکان‌های مناسبی برای حفره‌زنی و حمله توسط محلول خورنده ایجاد می‌نماید. تحت این شرایط روی سطح یک لایه غیر فعال ایجاد شده و به سرعت مورد خوردگی قرار می‌گیرد.

#### مراجع

- [2] Kabir H., Muni K., Wen C., Li Y., Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives, *Bioactive Materials*, 2021, 6(3) 836–879.
- [3] Zhuo X., Wu Y., Ju J., et al., Recent progress of novel biodegradable zinc alloys: from the perspective of strengthening and toughening, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17, 244–269.
- [4] Rajabi F., Taghiabadi R., Shaeri. M.H., Tribology of Si-rich TiG-deposited coatings on Zn-40Al-2Cu alloy, *Surface Engineering*, 2020, 36(7) 735–744.
- [5] Yousefi D., Taghiabadi R., Shaeri M.H., et al., Microstructural evolution and mechanical properties of multi-directionally forged SiP/ZA22 composite, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(4)
- [6] Chirita G., Stefanescu I., Soares D., et al., Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al-18wt%Si alloy, *Materials & Design*, 2009, 30(5) 1575–1580.
- [7] دماوندی س.، نوروزی م.، ربیعی.، اثر دمای بارریزی، ارتعاش مکانیکی و گرمایش مجدد بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی Al-A390، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۱(۲)، ۳۹-۵۳.
- [۸] صفاری ش.، اخلاقی ف.، بررسی تاثیر اعمال ارتعاش مکانیکی روی سطح شیبدار بر ریزساختار کامپوزیت در جای Al-Mg<sub>2</sub>Si، دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۱۳۹۲.
- [۹] دلشکسته ن.، کلاهدوز ا.، بررسی آماری ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم نیمه جامد A380 تولید شده به روش ارتعاش مکانیکی در محیط گاز آرگون، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲(۴)، ۲۸۶-۲۷۵.
- [10] Garg P., Jamwal A., Kumar D., et al., Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5) 4924–4939.
- [11] El-Aziz K. A., Saber D. Sallam H. E.-D.M., Wear and corrosion behavior of Al-Si matrix composite reinforced with alumina, *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2015, 1(1) <https://doi.org/10.1007/s40735-014-0005-5>
- [12] Taghiabadi R., Fayegh A., Pakbin A., Nazari M., Ghoncheh M. H., Quality index and hot tearing susceptibility of Al-7Si-0.35Mg-xCu alloys, *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2018, 28(7) 1275-1286.
- [1] Pola A., Tocci M., Goodwin F.E., Review of microstructures and properties of zinc alloys, *Metals*, 2020, 10(2) 253.

- [25] Ralston. K. D., Birbilis N., Effect of grain size on corrosion: A Review Corrosion, 2010, 66(7) 075005-075013.
- [26] Ralston K.D., Fabijanic D., Birbilis N., Effect of grain size on corrosion of high purity aluminium, *Electrochimica Acta*, 2011, 56(4) 1729–1736.
- [27] Jun Tao., Surface composition and corrosion behavior of an Al-Cu alloy, *Chemical Physics*, 2016, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- [28] Ahmido A., Hajjaji S.E., Ouaki B., et al., Corrosion behavior of Sn-9Zn-xBi lead-free solder alloy in NaCl 3% solution, *Materials Science an Indian Journal*, 2015, 13(2) 69-76.
- [29] Zeng F., Wei Z., Li J., et al., Corrosion mechanism associated with Mg<sub>2</sub>Si and Si particles in Al-Mg-Si alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(12) 2559–2567.
- [30] Zhu Y., Frankel G.S., (Bland) Miller L.G., Garves J., Pope J., (Warner) Locke J., Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Al-Cu-Li Alloys, *Journal of The Electrochemical Society*, 2023, 170(2) 021502.
- [31] Jiang J., Ma A., Song D., et al., Corrosion behavior of hypereutectic Al-23%Si alloy (AC9A) processed by severe plastic deformation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(2) 195–200.
- [32] Pei Y., Gui Y., Huang T., et al., Microstructure and corrosion behaviors of AZ63 magnesium alloy fabricated by accumulative roll bonding process, *Materials Research Express*, 2020, 7(6) 066525.
- [33] Korchef A., Kahoul A., Corrosion Behavior of Commercial Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing, *International Journal of Corrosion*, 2013, 1–11.
- [34] Wei W., Wei K.X., Du Q.B., Corrosion and tensile behaviors of ultra-fine grained Al-Mn alloy produced by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering*, 2007, A, 454–455, 536–541.
- [35] Naeini M.F., Shariat M.H., Eizadjou M., On the chloride-induced pitting of ultrafine grains 5052 aluminum alloy produced by accumulative roll bonding process, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(14) 4696–4700.
- [36] Li H., Liu S., Sun F., et al., Preliminary investigation on underwater wet welding of Inconel 625 alloy: microstructure, mechanical properties and corrosion resistance, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20, 2394–2407.
- [13] Olesinski R. W., Abbaschian. G.J., The Si-Zn (Silicon-Zinc) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1985, 6(6) 545–548.
- [14] Guan R.-G., Tie. D., A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(5) 409–432.
- [۱۵] یداله تبار ح.، ثقفیان ح.، شبستری س.، بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A380، نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، ویژه نامه مهندسی متالورژی و مواد، ۱۳۸۷، ۱۹(۵)، ۶۵–۷۴.
- [16] Yoshitake Y., Yamamoto K., Sasaguri N., Era H., Refinement of primary Si grains of Al-21%Si alloy using vibration mold, *Materials Transactions*, 2020, 61(2) 355–360.
- [17] Zhang Z., Li H. -T. Stone I. C., Fan Z., Refinement of primary Si in hypereutectic Al-Si alloys by intensive melt shearing, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2012, 27, 1-6.
- [18] Ünal N., Çamurlu H. E., Koçak., S., Düztepe G., Effect of external ultrasonic treatment on hypereutectic cast aluminium-silicon alloy, *International Journal of Cast Metals*, 2012, 25(4) 246–250.
- [19] Jiandon P., Talangkun S., Microstructural modification mardness and surface roughness of hypereutectic Al-Si alloys by a combination of bismuth and phosphorus, *Crystals*, 2022, 12(8) 1026
- [20] Chankitmunkong S., Eskin D. G., Limmaneevichitr C., Structure refinement, mechanical properties and feasibility of deformation of hypereutectic Al-Fe-Zr and Al-Ni-Zr alloys subjected to ultrasonic melt processing, *Materials Science and Engineering A*, 2020, 788, 139567.
- [21] Chirita G., Stefanescu I., Soares D., Silva F. S., Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al-18wt%Si alloy, *Materials & Design*, 2019, 30(5) 1575–1580.
- [22] Kudryashova. O., Khmeleva M., Danilov P., Dammer V., Vorozhtsov A., Eskin D., Optimizing the conditions of metal solidification with vibration, *Metals*, 2019, 9(3) 366.
- [23] Plotkowski A. J., Refinement of the cast microstructure of hypereutectic aluminum-silicon alloys with an applied electric potential, 2012, *Masters Theses*, 15.
- [24] Baboian R. Corrosion tests and standards: Application and interpretation, ASM International, USA, 2005.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

*Research Paper:*

### Investigation of Effect of Mold Mechanical Vibration During Solidification on the Structure and Corrosion Resistance of Zn-4Si Alloy

Faezeh Akbari<sup>1</sup>, Reza Taghiabadi<sup>2\*</sup>, Morteza Saghafi Yazdi<sup>2</sup>, Iman Ansarian<sup>3</sup>

1. M.Sc. student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN

2. Associate Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN

3. Ph.D student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN

\* Corresponding author, taghiabadi@ikiu.ac.ir

#### Paper history:

Received: 19 March 2023

Accepted: 09 May 2023

#### Keywords:

Zn-4Si alloy,  
Mechanical vibration,  
Solidification,  
Microstructure,  
Corrosion.

#### Abstract:

In the current study the effect of mold mechanical vibration during the solidification was studied on microstructure and corrosion behavior of Zn-4Si alloy. According to the microstructural observation results, mechanical vibration substantially improved the SiP particle distribution and refined them. The image analysis results showed that mechanical vibration at 20, 40, and 60 Hz reduced the average size of SiP particles by 34, 55, and 75%, and increased their number density by 6, 16, and 36 times, respectively. Mechanical vibration at the 20, 40, and 60 Hz also decreased the average grain size by 50, 68, and 76%, respectively and increased the equiaxed zone in castings. The results of Tafel and impedance corrosion tests at 3.5% NaCl solution implied on increasing the corrosion current and shifting the corrosion potential to the more negative values in mechanically vibrated samples. The corrosion current of as-cast and 60 Hz samples were determined as  $-1.36 \times 10^{-5}$  and  $-2.33 \times 10^{-5}$  A, respectively. Mechanical vibration also reduces the corrosion resistance of samples where the resistance of 60 Hz sample (about 76 ohm) is lower than that of as-cast sample by about 45%. The increased density of grain boundaries and fine distribution of primary Si particles (as cathodic points) in the alloy matrix are characterized as the most important factors decreasing the corrosion resistance of the alloy. This is because they increased the number and interspacing of the galvanic cells within the matrix and exhibited appropriate locations for pitting.

#### Please cite this article using:

Faezeh Akbari, Reza Taghiabadi, Morteza Saghafi Yazdi, Iman Ansarian, Investigation of Effect of Mold Mechanical Vibration During Solidification on the Structure and Corrosion Resistance of Zn-4Si Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2022, 6(2) 157-167.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.390435.1175

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)