

# بررسی اثر غلظت ذرات ساینده بر رفتار

## رفتگی - خوردگی آلیاژ

### آلومینیم ۵۰۵۲ در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl

معبود منشی رودسری<sup>۱</sup>، حمیدرضا قاسمی منفرد راد<sup>۲\*</sup>، نسرين سادات آذریان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی مواد

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

\* نویسنده مسئول: hghasemi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۴

#### چکیده

در این تحقیق اثر غلظت ذرات ساینده بر رفتار رفتگی - خوردگی آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲ در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl حاوی ذرات ساینده سیلیس با اندازه ذره در محدوده ۵۰۰-۲۵۰ μm مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌ها توسط دستگاه جت برخوردی و در سرعت ۶/۵ m/s، زاویه برخورد ۳۰ درجه و در سه غلظت ذرات ساینده ۳۰، ۶۰ و ۹۰ گرم بر لیتر انجام شد و اثر هم‌افزایی بین رفتگی و خوردگی طبق استاندارد ASTM G119-09 محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ذرات ساینده نرخ رفتگی خالص و رفتگی - خوردگی افزایش می‌یابد، اما در غلظت‌های بالا شیب افزایش نرخ رفتگی و رفتگی - خوردگی کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به افزایش کارسختی سطح در اثر افزایش تعداد ذرات برخوردی و در نتیجه مقاومت بیشتر سطح در برابر برخورد ذرات نسبت داد. نتایج همچنین نشان دهنده هم‌افزایی منفی در تمامی غلظت‌ها است. دلیل این موضوع می‌تواند تشکیل لایه محافظ در نمونه‌های رفتگی - خوردگی باشد که می‌تواند عاملی برای کمتر بودن میزان کاهش جرم در نمونه‌های رفتگی - خوردگی نسبت به نمونه‌های رفتگی باشد.

**کلمات کلیدی:** رفتگی - خوردگی، آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲، غلظت ذرات ساینده، کارسختی سطح، هم‌افزایی منفی.

# Effect of Sand Concentration on the Erosion-Corrosion Behavior of AA5052 Aluminum Alloy in 3.5 wt.% NaCl solution

Mabood Monshi Roudsari<sup>1</sup>, Hamidreza Ghasemi\*<sup>2</sup>, Nasrin Sadat Azarian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Materials Engineering

<sup>2</sup> Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

<sup>3</sup> M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

\*Corresponding Author: hghasemi@ut.ac.ir

Submission: October 13, 2012      Acceptance: February 02, 2013

## *Abstract*

The effect of particle concentration on erosion-corrosion behavior of AA5052 aluminum alloy has been investigated in 3.5 wt. % NaCl solution containing 250-500  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> erosive particles. The tests were conducted using a jet impingement rig at a jet velocity of 6.5 m/s, an impingement angle of 30° and three sand concentrations of 30, 60 and 90 g/l. Synergistic effect between erosion and corrosion was calculated in accordance with ASTM G119-09. Results showed that the pure erosion and erosion-corrosion rates increased as the sand concentration increased to 60 g/l. However, the rate of increase in both the erosion and the erosion-corrosion rates were decreased at concentration above 60 g/l that could be due to higher work hardening of the surface at higher sand concentration. Results also showed that at the sand concentrations tested synergy was negative. This could be due to formation of protective layer on erosion-corrosion samples that resulted in lower rates during erosion-corrosion tests.

**Keywords:** Erosion-corrosion, AA 5052 aluminum alloy, Erosive particle concentration, Work hardening, Negative synergism

## ۱- مقدمه

یکی از مشکلات مهم که در صنایع مختلف می‌تواند باعث تخریب مواد مهندسی شود پدیده رفتگی - خوردگی<sup>۱</sup> است. این پدیده که به دلیل اثر همزمان رفتگی مکانیکی و خوردگی الکتروشیمیایی اثر تشدیدکنندگی<sup>۲</sup> دارد می‌تواند باعث تخریب تجهیزات در مدت زمانی کوتاه‌تر از آنچه که توسط محاسبات و با در نظر گرفتن اثر خوردگی یا رفتگی خالص پیش‌بینی می‌شود، گردد؛ در واقع رفتگی - خوردگی عبارت است از تغییر در نرخ رفتگی به دلیل حضور عامل خورنده یا بالعکس. این تغییر در نرخ برداشت مواد نسبت به رفتگی یا خوردگی خالص به عنوان اثر هم‌افزایی شناخته می‌شود که باعث غیرقابل پیش‌بینی شدن پدیده رفتگی - خوردگی می‌شود. اثر هم‌افزایی به صورت اثر خوردگی بر نرخ رفتگی یا اثر رفتگی بر نرخ خوردگی تعریف می‌شود [۱ و ۲].

به طور کلی مقدار کاهش جرم در این نوع تخریب از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$T = C + W + S \quad (1)$$

در رابطه ۱، T نرخ کاهش جرم در اثر رفتگی - خوردگی، W نرخ رفتگی خالص (نرخ کاهش جرم هنگامی که اثرات خوردگی وجود نداشته باشد)، C به عنوان نرخ کاهش جرم در اثر خوردگی، هنگامی که رفتگی وجود نداشته باشد و S نیز به عنوان اثر هم‌افزایی تعریف می‌شود. واحد تمامی پارامترهای بیان شده به صورت کاهش وزن نمونه بر واحد سطح رفته شده در واحد زمان (mg/cm<sup>2</sup>.h) می‌باشد. T از آزمایش کاهش جرم برای نمونه‌ای که تحت رفتگی - خوردگی قرار گرفته است به دست می‌آید. W از آزمایش کاهش جرم، هنگامی که نمونه در حالت حفاظت کاتدی باشد یا محلول، محلول خورنده نباشد به دست می‌آید. برای به دست آوردن مقدار C از محلولی که حاوی ذرات ساینده نباشد استفاده می‌شود و با استفاده از آزمایش کاهش جرم یا پلاریزاسیون نافل می‌توان نرخ خوردگی را به دست آورد [۳ و ۴].

رفتگی - خوردگی یکی از عوامل مهم در تخریب مواد در بسیاری از صنایع از جمله صنایع نفت و گاز، صنایع دریایی، توربین‌های آبی و کلیه تجهیزاتی که در تماس با دوغاب‌های خورنده متحرک هستند، محسوب می‌شود [۲]. برای بررسی تخریب ناشی از رفتگی - خوردگی باید پارامترهایی را که بر رفتگی و خوردگی اثر می‌گذارند در نظر گرفت. این پارامترها را می‌توان به سه دسته پارامترهای مربوط به ماده، پارامترهای مربوط به ذرات ساینده و پارامترهای محیطی تقسیم کرد. از جمله پارامترهای مربوط به ماده می‌توان به سختی، استحکام، چقرمگی، عناصر آلیاژی و فازهای موجود در آن اشاره کرد. همچنین سختی، شکل، اندازه و چگالی ذرات از جمله پارامترهای مربوط به ذره ساینده است که بر نرخ رفتگی - خوردگی اثر می‌گذارد. از عوامل مربوط به پارامترهای محیطی نیز می‌توان به دما، خوردگی محیط، pH، ویسکوزیته، سرعت و غلظت ذرات ساینده اشاره کرد [۵ و ۶].

غلظت ذرات ساینده از جمله عواملی است که اثر مهمی بر نرخ رفتگی - خوردگی مواد دارد. افزایش غلظت ذرات در محلول معمولاً باعث افزایش نرخ رفتگی می‌شود [۷ و ۸]. رابطه مقدار ماده جدا شده از سطح بر حسب سختی ماده تحت رفتگی و غلظت ذرات ساینده به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$K\rho mU^2/2H \quad (2)$$

در رابطه ۲، H سختی (HV)، ρ دانسیته ماده تحت رفتگی - خوردگی (g/cm<sup>3</sup>)، U سرعت حرکت ذرات ساینده (m/s)، m جرم ذرات ساینده (mg) و K یک فاکتور بدون بعد می‌باشند. رابطه ۲ نشان می‌دهد که مقدار ماده جدا شده از سطح متناسب با مقدار ماده‌ای است که به سطح برخورد می‌کند [۹]. در تحقیقی که توسط کریمی و همکاران [۱۰] انجام شده است اثر غلظت ذرات ساینده بر رفتار رفتگی - خوردگی پوشش الکتروپولیس نیکل - فسفر بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ذرات ساینده نرخ رفتگی و نرخ خوردگی به صورت خطی افزایش می‌یابد. دلیلی که برای این افزایش نرخ بیان شده

<sup>۱</sup> Erosion-Corrosion<sup>۲</sup> Synergistic Effect

رفتگی - خوردگی قرار گیرد، تا سنباده شماره ۱۲۰۰ پرداخت شد. نمونه‌ها در حمام استون با استفاده از دستگاه اولتراسونیک چربی‌زدایی شدند و سپس جرم اولیه نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم به دست آمد. برای به دست آوردن سرعت خوردگی ساکن، نمونه آلومینیمی در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl غوطه‌ور شد. پس از برقراری تعادل الکتروشیمیایی آزمون پلاریزاسیون تافل در محدوده پتانسیل  $\pm 600$  میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز ( $OCP^2$ ) و با سرعت روبش سه میلی‌ولت بر ثانیه انجام شد و پس از به دست آوردن منحنی پلاریزاسیون، با استفاده از استاندارد ASTM G102-89 [۱۴] سرعت خوردگی بر حسب  $mg/cm^2.h$  به دست آمد.

برای انجام آزمون‌های رفتگی خالص و رفتگی - خوردگی از دستگاه جت برخوردی که توانایی پمپ کردن محلول را با سرعت‌ها و غلظت‌های مختلف ذرات ساینده دارد استفاده شد. شکل ۱ شماتیک دستگاه رفتگی - خوردگی را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمون‌های رفتگی خالص و رفتگی - خوردگی از محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl حاوی ذرات ساینده سیلیس با اندازه ذره در محدوده  $m = 500 - 250$  استفاده شد. آزمون‌ها در سرعت سیال  $6/5 m/s$ ، زاویه برخورد  $30^\circ$  درجه، غلظت ذرات ساینده ۳۰، ۶۰ و ۹۰ گرم بر لیتر و به مدت ۴۵ دقیقه انجام شدند. برای انجام آزمون‌های رفتگی خالص، جهت حذف اثرات خوردگی، مطابق استاندارد ASTM G119-09، از حفاظت کاتدی در حین آزمایش استفاده شد [۳]. پس از اتمام آزمایش، نمونه‌ها به روش ذکر شده تمیز و توزین شدند تا کاهش وزن آنها به دست آید. بعد از انجام آزمون‌های رفتگی - خوردگی، رفتگی خالص، خوردگی ساکن و به دست آوردن نرخ‌ها، مقدار هم‌افزایی (S) مطابق با استاندارد ASTM G119-09 [۳] و با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد. همچنین برای بررسی مکانیزم برداشت ماده و مقایسه نمونه‌های رفتگی خالص و

است افزایش تعداد برخورد با افزایش غلظت ذرات ساینده است. با افزایش غلظت ذرات ساینده تغییر شکل پلاستیک بیشتری روی سطح اتفاق می‌افتد. همچنین لبه‌های برشی بیشتری روی سطح ایجاد می‌شود، اما از طرف دیگر به دلیل افزایش تعداد ذرات برخوردی، نرخ برداشت این لبه‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه نرخ رفتگی و رفتگی - خوردگی افزایش می‌یابد.

آلیاژهای آلومینیم، به دلیل داشتن خواصی مانند نسبت استحکام به وزن بسیار خوب، چقرمگی مناسب، خواص شکل‌پذیری خوب و مقاومت عالی به خوردگی اتمسفری و خوردگی در محیط دریایی، کاربردهای زیادی در صنایع ساختمانی، یل‌های متحرک، تانک‌های ذخیره مواد، صنایع کشتی‌سازی، تجهیزات حفاری، مخازن نگهداری نفت و فراورده‌های آن، شناورها، سکوها، کنار دریا و صنعت خودرو دارند [۶، ۱۱ و ۱۲]. در این میان، آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲ با داشتن عناصر آلیاژی مانند منیزیم و کروم و با توجه به مقاومت عالی به خوردگی حفره‌ای در محیط‌های دریایی، کاربرد زیادی در این محیط‌ها پیدا کرده است [۶ و ۱۳]. یکی از این کاربردها انتقال سیال به منظور خنک کردن تجهیزاتی است که در نزدیکی یا داخل دریا کار می‌کنند که این مسئله باعث می‌شود این آلیاژ در معرض پدیده‌ی خوردگی - خوردگی باشد.

هدف از این پژوهش، بررسی اثر غلظت ذرات ساینده بر رفتار رفتگی - خوردگی آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲ در محیط ۳/۵ درصد وزنی NaCl و همچنین تعیین مقدار هم‌افزایی در شرایط مذکور می‌باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

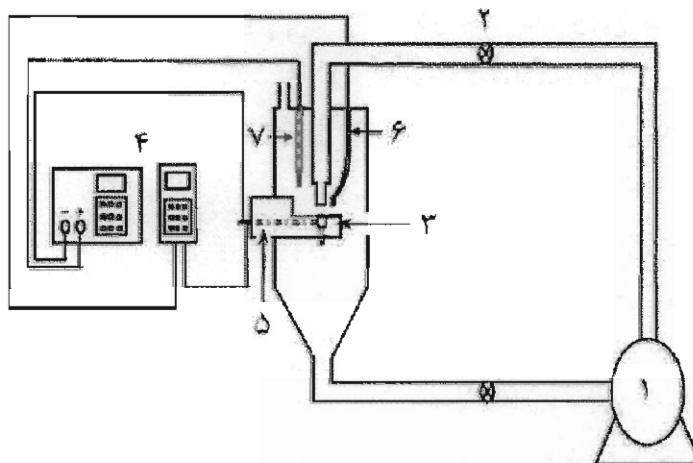
در این تحقیق از نمونه‌های مکعبی آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲ با طول ۵ میلی‌متر (سطح مقطع برابر با  $0/25$  سانتی‌متر مربع) استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ توسط روش آنالیز OES<sup>۱</sup> تعیین شد که در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از انجام آزمایش، سطحی از نمونه‌ها که باید تحت رفتگی و

<sup>2</sup> Open Circuit Potential

<sup>1</sup> Optical Emission Spectroscopy

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۲ استفاده شده در این تحقیق

| عنصر      | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ti    | Cr    | Ni    | Pb   | Al      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|---------|
| درصد وزنی | ۰/۱۳ | ۰/۵۱ | ۰/۰۲ | ۰/۱۶ | ۲/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | Balance |



شکل ۱: تصویر شماتیک دستگاه آزمایش رفتگی-خوردگی: ۱- بلمپ ۲- شیر تنظیم دبی ۳- نمونه ۴- سیستم اعمال پتانسیل جهت حفاظت کاتدی ۵- اتصال الکتریکی ۶- الکتروود مرجع Ag/AgCl به همراه پل نمکی ۷- الکتروود کمکی گرفت.

در شکل ۳ نمودار تغییرات نرخ رفتگی و رفتگی- خوردگی بر حسب غلظت در سرعت  $6/5 \text{ m/s}$  آورده شده است. همچنان که دیده می‌شود با افزایش غلظت نرخ رفتگی و رفتگی- خوردگی افزایش می‌یابد، اما در غلظت‌های بالاتر، این افزایش به صورت خطی نیست.

با افزایش غلظت از  $30$  به  $60 \text{ g/l}$  تعداد ذرات برخوردی به سطح دو برابر می‌شود که این مسئله می‌تواند باعث افزایش نرخ برداشت ماده از روی سطح شود، اما با افزایش غلظت از  $60$  به  $90 \text{ g/l}$  نرخ رفتگی و رفتگی- خوردگی با شیب کمتر افزایش می‌یابند که دلیل این مسئله می‌تواند افزایش کارسختی سطح در اثر افزایش تعداد ذرات برخوردی باشد. افزایش تعداد ذرات برخوردی باعث افزایش کارسختی سطح و در نتیجه افزایش مقاومت ماده در برابر برخورد ذرات بیشتر می‌شود.

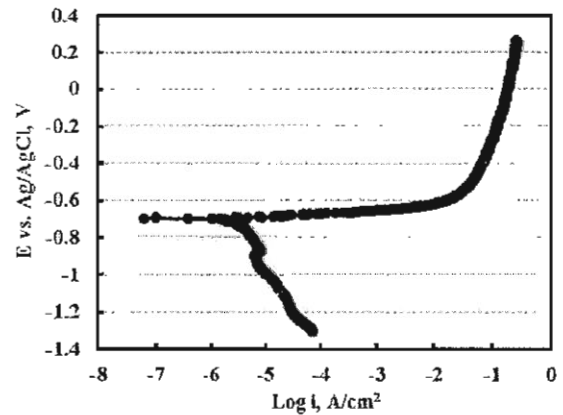
رفتگی- خوردگی سطح نمونه‌های آزمون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۲ نمودار پلاریزاسیون حاصل از خوردگی ساکن نمونه آلومینیمی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که در پتانسیل‌های مثبت، منحنی وارد منطقه پسیو می‌شود که می‌تواند نشان دهنده تشکیل لایه محافظ  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  روی سطح باشد [۱۵]. تشکیل این لایه دلیل اصلی مقاومت این آلیاژ در برابر محیط خورنده به‌ویژه آب دریا است. با توجه به نمودار پلاریزاسیون و استفاده از شیب خطوط تافل، دانسیته جریان خوردگی برابر با  $10^{-5.5} \text{ A/cm}^2$  به دست می‌آید. همچنین با استفاده از استاندارد ASTM G102-89 [۱۴]، کاهش جرم ناشی از خوردگی برابر با  $0/001$  میلی‌گرم و سرعت خوردگی برابر با  $10^{-2} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$  به دست می‌آید.

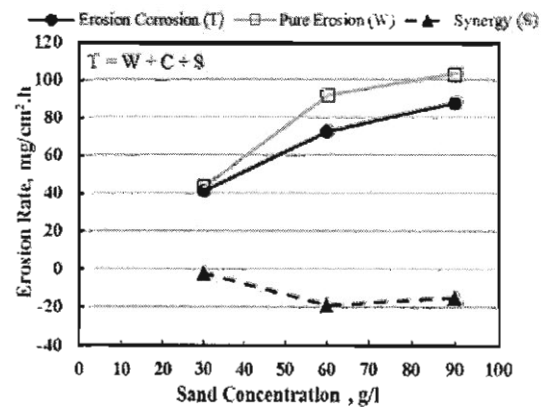
با SEM نیز قابل مشاهده نبوده است. در تحقیقی که توسط باریک<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] بر رفتار رفتگی - خوردگی آلیاژ نیکل-آلومینیم - برنز انجام شد ضخامت لایه کارسخت شده در حالت رفتگی در حدود ۱۰۰ nm به دست آمد. در هر حال آلیاژهای آلومینیم و آلیاژ AA5052 کارسخت پذیر بوده و نشان داده شده است که آلومینیم در آزمایش‌های رفتگی کارسخت شده و این مسئله می‌تواند باعث کاهش نرخ برداشت مواد شود [۱۷].

با توجه به نمودار شکل ۳، همچنین دیده می‌شود که نرخ رفتگی در تمامی غلظت‌ها بیشتر از نرخ رفتگی - خوردگی است که باعث ایجاد نرخ هم‌افزایی منفی می‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند تشکیل لایه محافظ روی سطح در حالت رفتگی - خوردگی باشد. تشکیل لایه محافظ روی سطح، که معمولاً لایه‌ای با سختی بالاست، حتی اگر به طور کامل سطح را نپوشاند می‌تواند باعث کمتر شدن نرخ رفتگی - خوردگی نسبت به نرخ رفتگی شود. این لایه محافظ معمولاً در مناطقی که زمان کافی برای تشکیل وجود داشته باشد ایجاد می‌شود. معمولاً زیر لبه‌های برشی که در اثر برخورد ذرات ساینده ایجاد می‌شوند، قبل از اینکه لبه‌ها در اثر برخوردهای بعدی جدا شوند، مکان مناسبی برای تشکیل این لایه یا فیلم محافظ می‌باشد [۱۸]. هنگامی که این لایه تشکیل شد، اگر لبه‌های برشی در اثر برخوردهای بعدی جدا شوند ذرات بعدی به جای برخورد با فلز با لایه اکسیدی هیدراته که معمولاً ترکیب  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  است برخورد می‌کنند [۱۵]. این لایه نسبتاً بادوام می‌تواند مانع از کاهش جرم بیشتر در هنگام رفتگی - خوردگی شود. این مسئله باعث منفی شدن مقادیر هم‌افزایی در شکل ۳ می‌شود. از طرف دیگر دیده می‌شود که بعد از غلظت ۶۰ g/l مقدار هم‌افزایی ثابت می‌ماند. به نظر می‌رسد تغییر شکل سطح در غلظت‌های ۶۰ و ۹۰ گرم بر لیتر به یک حالت تعادل رسیده و نرخ رفتگی و رفتگی - خوردگی در شکل ۳ با یک شیب افزایش پیدا کرده‌اند و در نتیجه مقدار هم‌افزایی برای این دو غلظت تقریباً ثابت مانده است. در شکل ۴ تصاویر SEM سطوح رفتگی و رفتگی - خوردگی



شکل ۲: نمودار پلاریزاسیون نمونه آلومینیم ۵۰۵۲ تحت خوردگی ساکن.

همچنین دیده می‌شود که با دو یا سه برابر شدن غلظت، نرخ رفتگی - خوردگی دو یا سه برابر نمی‌شود که دلیل این مسئله می‌تواند تشکیل لایه محافظ روی سطح باشد. با افزایش تعداد ذرات برخوردی به سطح مقدار کارسختی سطح افزایش یافته و اولاً تمایل الکتروشیمیایی برای تشکیل لایه محافظ افزایش یافته و ثانیاً دوام و پایداری لایه روی سطح با استحکام بالاتر، بیشتر می‌شود که این مسئله می‌تواند باعث کم شدن شیب نمودار در غلظت‌های بالاتر شود.



شکل ۳: نمودار نرخ رفتگی - خوردگی (T)، رفتگی خالص (W) و هم‌افزایی (S) بر حسب غلظت ذرات ساینده در سرعت سیال ۶/۵ m/s و زاویه برخورد ۳۰ درجه.

قابل ذکر است که سطح مقطع نمونه‌ها جهت میکروسختی مورد آزمایش قرار گرفت، اما تغییری در سختی لایه نزدیک به سطح مشاهده نگردید. این مسئله می‌تواند به دلیل لایه بسیار نازک کارسخت شده (شاید در حد چندین نانومتر) باشد که



شکل ۴: تصاویر مربوط به سطح نمونه تهیه شده با SEM (الف) قبل از آزمایش؛

تحت آزمایش رفتگی در سرعت ۶/۵ m/s، زاویه برخورد ۳۰° و غلظت (ب) ۳۰ g/l و (ج) ۹۰ g/l؛ تحت آزمایش رفتگی-خوردگی در سرعت ۶/۵ m/s، زاویه برخورد ۳۰° و در غلظت (د) ۳۰ g/l و (ه) ۹۰ g/l.

مورفولوژی نمونه اولیه تقریباً یکنواخت و عاری از هر گونه حفره و عیوب اولیه است. ضمناً خطوطی هم‌جهت روی سطح وجود دارند که در اثر فرایند سنباده زنی ایجاد شده‌اند. در شکل ۴ همچنین دیده می‌شود که به دلیل زاویه برخورد

در غلظت‌های ۳۰ و ۹۰ گرم بر لیتر آورده شده است. همچنین جهت مقایسه تصویر SEM نمونه اولیه (قبل از انجام آزمون رفتگی- خوردگی) نیز در شکل ۴-الف آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشخص است،

مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد که این مسئله می‌تواند باعث کم شدن مشخصه‌های سطحی در غلظت  $90 \text{ g/l}$  نسبت به غلظت  $30 \text{ g/l}$  شود.

#### ۴- نتیجه گیری

✓ با افزایش غلظت در سرعت ثابت، نرخ رفتگی و رفتگی- خوردگی افزایش می‌یابد، اما به دلیل کارسختی این افزایش با غلظت به صورت خطی نیست.

✓ در تمامی غلظت‌ها مقدار نرخ رفتگی- خوردگی کمتر از نرخ رفتگی خالص است. این نشان دهنده اثر هم‌افزایی منفی به دلیل ایجاد لایه محافظ و تأثیرات کارسختی زمینه می‌باشد.

✓ در زاویه برخورد  $30^\circ$  درجه روی سطح مشخصه‌هایی مانند شیارهای به وجود آمده در اثر لغزش ذرات، لبه‌های برشی برآمده و فرورفتگی ناشی از برخورد ذرات ایجاد می‌شوند.

ذرات کم و در حدود  $30^\circ$  درجه، مشخصه‌های سطحی مانند شیارهای به وجود آمده در اثر لغزش ذرات بر روی سطح و لبه‌های برآمده روی نمونه ایجاد می‌شوند. مشخصه‌های سطحی مشاهده شده با نتایج تحقیقات دیگر همخوانی دارد [۱۹ و ۲۰].

با توجه به شکل ۴ دیده می‌شود که با افزایش غلظت مشخصات سطحی در غلظت  $90 \text{ g/l}$  کمتر می‌شود. به دلیل ثابت بودن سرعت برخورد، انرژی ذرات ثابت است که این مسئله باعث می‌شود میزان فرورفتگی در نمونه‌های رفتگی و رفتگی- خوردگی تقریباً یکسان باشد. همچنین با توجه به ثابت بودن زاویه برخورد، شیارهای به وجود آمده در اثر لغزش ذرات و لبه‌های برآمده تقریباً یک‌شکل ایجاد شده‌اند. با افزایش غلظت تنها تغییری که ایجاد می‌شود افزایش تعداد برخورد است که این مسئله می‌تواند روی مقدار کارسختی سطح اثر بگذارد. با افزایش میزان کارسختی در سطح،

#### مراجع

1. E. Bardal, Corrosion and Protection, Springer, U.S.A., 2005.
2. M. G. Fontana, Corrosion Engineering, McGraw Hill, U.S.A., 1987.
3. ASTM Standard G 119-09, Standard guide for determining synergism between wear and corrosion, ASTM International, U.S.A., 2009.
4. H. M. Ghasemi, M. Karimi, A. Pasha, M. Abedini, "Erosion-corrosion behavior of 316-stainless steel in seawater simulated environment at various impingement angles", Regional Tribology Conference, Bayview Hotel, Langkawi Island, Malaysia, November 2011, pp. 22-24.
5. Y. Li, G. T. Burstein, I. M. Hutchings, "Influence of environmental composition and electrochemical potential on the slurry erosion-corrosion of aluminum", Wear, 1995, Vol. 181-183, pp. 70-90.
۶. معبود منشی رودسری، حمیدرضا قاسمی منفرد راد، نسرین سادات آذریان، بررسی اثر سرعت حرکت سیال بر رفتار رفتگی- خوردگی آلیاژ  $5052$  آلومینیم در محلول  $3/5$  درصد وزنی NaCl، سیزدهمین کنگره ملی خوردگی، دانشگاه تبریز، ۲۶ و ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۱.
7. M. S. Patil, E. R. Deore, R. S. Jahagirdar, S. V. Patil, "Study of the parameters affecting erosion wear of ductile material in solid-liquid mixture", Proceedings of the World Congress on Engineering, London, U.K., July, 2011.
8. S. Turenne, M. Fiset, J. Masounave, "The effect of sand concentration on the erosion of materials by a slurry jet", Wear, 1989, Vol. 133, pp. 95-106.
9. I. M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, U.K., 1992.
۱۰. مرتضی کریمی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.



11. J. G. Kaufman, Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, ASM International, U.S.A., 2000.
12. J. G. Kaufman, E. L. Rooy, Aluminum Alloy Castings, ASM International, U.S.A., 2004.
13. E. Ghali, Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys, Wiley, U.S.A., 2010.
14. ASTM Standard G 102-89, Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements, ASTM International, U.S.A., 2004.
15. D. Talbot, J. Talbot, Corrosion Science and Technology, CRC Press, U.S.A., 1998.
16. R. C. Barik, J. A. Wharton, R. J. K. Wood, K. R. Stokes, "Electro-mechanical interactions during erosion-corrosion", *Wear*, 2009, Vol. 267, pp. 1900-1908.
17. G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, Engineering Tribology, Elsevier, U.S.A., 2005.
18. R. J. K. Wood, J. A. Wharton, A. J. Speyer, K. S. Tan, "Investigation of erosion-corrosion processes using electrochemical noise measurements", *Tribology International*, 2002, Vol. 35, pp. 631-641.
19. S. S. Rajahram, T. J. Harvey, R. J. K. Wood, "Full factorial investigation on the erosion-corrosion resistance of UNS S31603", *Tribology International*, 2010, Vol. 43, pp. 2072-2083.
20. G. A. Zhang, L. Y. Xu, Y. F. Cheng, "Investigation of erosion-corrosion of 3003 aluminum Alloy in ethylene glycol-water solution by impingement jet system", *Corrosion Science*, 2009, Vol. 51, pp. 283-290.