

## بررسی رفتار خوردگی صفحات غلتکی در دو محیط آب C60 و آب فرس در یک واحد گندله‌سازی

مسعود رفیعی\* و علی شفیعی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۷)

چکیده: امروزه در صنعت فولاد و در واحد گندله‌سازی در راستای طبقه‌بندی گندله‌های سنگ آهن از صفحات غلتکی استفاده می‌شود. صفحات غلتکی یا رول‌های اسکرین نوعی دستگاه غربالگری است که کاربرد آن‌ها تعیین اندازه، دانه‌بندی و همچنین جابجایی مواد می‌باشد. در این پژوهش رفتار خوردگی این رول‌ها در دو محیط آبی مختلف شامل آب فرس (آشامیدنی) و آب برگشتی (C60) مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا آزمون طیف‌سنجی جرقه‌ای جهت اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی و در ادامه آزمون‌های خوردگی الکتروشیمیایی بر روی قطعات فولادی A<sup>+</sup>، A و B در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. آزمون مدار باز به منظور اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز و بررسی رفتار کلی قطعات انجام شد. سپس آزمون امپدانس الکتروشیمیایی به جهت ارزیابی مقاومت به خوردگی و شرایط سطحی، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای تعیین سرعت خوردگی و آزمون حفره‌دار شدن برای ارزیابی شرایط خوردگی حفره‌ای انجام شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که قطعه A<sup>+</sup> به دلیل وجود مقدار بیشتری از عنصر مولیبدن در ساختار، در هر دو محیط بیشترین مقاومت به خوردگی و قطعه A بیشترین سرعت خوردگی را داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد خوردگی تمام قطعات در آب فرس کمتر از خوردگی در آب C60 است که عامل اصلی این تفاوت به کمتر بودن یون‌های مهاجمی همچون کلر در آب فرس نسبت به آب C60 مربوط می‌شود. علاوه بر خوردگی یکنواخت و خوردگی حفره‌ای، خوردگی گالوانیک بین فازهای موجود در ریزساختار نیز از علت‌های اصلی خوردگی آلیاژ ارزیابی شد. طبق تصاویر متالوگرافی قطعات و نتایج سختی‌سنجی ریز ساختار هر سه قطعه مارتنزیتی بود که در قطعات A و B فاز فریت دلتا در زمینه مارتنزیت مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: صفحات غلتکی، خواص خوردگی، گندله‌سازی، مورفولوژی.

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.rafee@ma.iut.ac.ir

## Investigating the Corrosion Behavior of Roller Plates in Two Environments of C60 Water and Fresh Water in a Pelletizing Unit

M. Rafiee\* and A. Shafyei

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### ABSTRACT

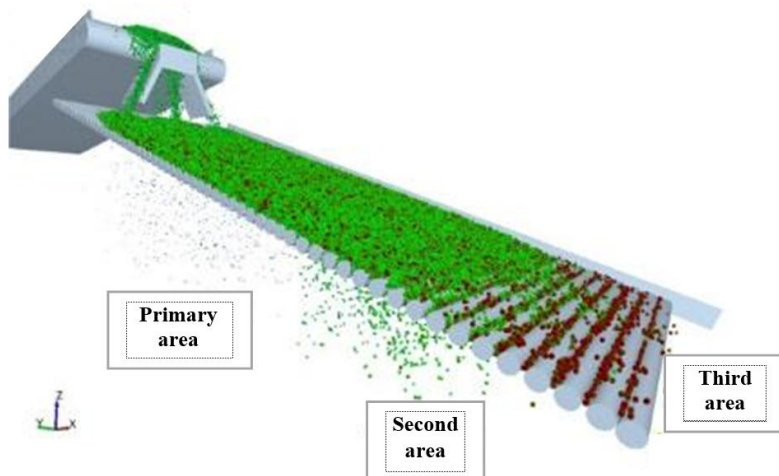
Nowadays, roller plates are used in the steel industry and pellet making unit in order to classify iron ore pellets. Roller plates or screen rolls are a type of screening device, which are used to determine size, granulation, and transfer of materials. In this research, the corrosion behavior of these rolls was evaluated in two different water environments including fresh water (drinking) and return water (C60). First, the spark spectrometry test was performed to measure the chemical composition, and then the electrochemical corrosion tests were performed on steel parts A<sup>+</sup>, A, B at a temperature of 25 °C. The open circuit potential test was performed to measure the open circuit potential and study the general behavior of the components. Then electrochemical impedance spectroscopy test was performed to evaluate corrosion resistance and surface conditions, potential dynamic polarization test to determine corrosion rate and, pitting test to evaluate pitting corrosion conditions. The results of these tests showed that the A<sup>+</sup> part had the highest corrosion resistance and the A part had the highest corrosion rate in both environments due to the presence of a larger amount of molybdenum element in the structure of A<sup>+</sup> part compared to A. Also, the results showed that the corrosion of all parts in fresh water was less than the corrosion in C60 water. The main reason for this difference was related to less aggressive ions such as chlorine in fresh water compared to C60 water. In addition to uniform corrosion and pitting corrosion, galvanic corrosion between phases in the microstructure was also determined as one of the main causes of alloy corrosion. According to the metallographic images of the parts and the hardness measurement results, the microstructure of all three parts was martensitic, which was observed in parts A, B, and delta ferrite phase in the martensitic field.

**Keywords:** Roller plates, Corrosion properties, Pelletizing, morphology.

### ۱- مقدمه

راستای طبقه‌بندی گندله‌های سنگ آهن تحت محیط آبی می‌باشد. صفحات غلتکی تک طبقه از یک عرشه دارای رول‌های چرخشی با کمی زاویه نسبت به افق (معمولاً ۱۰ تا ۱۹ درجه) تشکیل که به صورت موازی و در راستای هم مستقر شده‌اند (۳ و ۴). طرح‌واره مناطق طبقه‌بندی صفحه غلتکی در شکل (۱) ارائه شده است (۲). در ناحیه بالایی اولیه امکان حذف محصول ریز (گلوله‌های رنگ آبی) فراهم می‌شود. ناحیه میانه دوم و همچنین ناحیه آخر به ترتیب وظیفه حذف محصول متوسط به رنگ سبز و گلوله‌های درشت به رنگ قرمز را بر عهده دارند. حد فاصل هر ناحیه رول‌هایی با شکاف‌های ۲ میلی‌متری وجود دارد که عمدتاً برای انتقال گلوله‌ها روی صفحه غلتکی و جابجایی مواد به جلو تعبیه شده‌اند (۵ و ۶). رول‌های غلتکی به روش ریخته‌گری گریز از مرکز تولید می‌شوند که معمولاً جنس آن‌ها از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی

غربالگری<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین فرایندها جهت طبقه‌بندی اندازه برای مواد دانه‌ای یا ذره‌ای است که به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله مواد معدنی، متالورژی و آماده‌سازی زغال سنگ استفاده می‌شود. صفحات غلتکی<sup>۲</sup> نوعی دستگاه غربالگری با طراحی خاص است که از یک سری غلتک جداگانه تشکیل شده است (۱). در واقع از این‌گونه سرندها برای تعیین اندازه (دانه‌بندی) و همچنین جابجایی مواد استفاده می‌شود. ظرفیت بالا، سطح سر و صدای کم و همچنین محافظت از مواد در برابر آسیب از جمله مزایای صفحات غلتکی است که باعث شد به سرعت جایگزین صفحات ارتعاشی شود (۲). از این‌رو، صفحات غلتکی دارای طیف گسترده‌ای از کاربردهای بالقوه در زمینه فرآوری مواد معدنی است که نمونه‌ای از کاربردهای آن در صنعت فولادسازی و در



شکل ۱- طرح‌واره مناطق طبقه‌بندی صفحات غلتکی (۲).

است.

طبق بررسی‌های انجام شده، غلتک‌ها در ابتدا دارای کیفیت سطح مطلوبی هستند اما به مرور زمان و با چسبیدن مواد به سطح آن‌ها دچار خوردگی شده و کیفیت سطح خود را از دست می‌دهند (۹). از عوامل مهم که باعث تخریب سطح رول‌ها می‌شود، کیفیت آب مورد استفاده در واحد گندله‌سازی است. به‌طور کلی در صنایع معدنی به آبی که به‌صورت تمیز (آشامیدنی) وارد سیستم می‌شود آب فرش<sup>۳</sup> گویند که این آب به مرور و با گذشت زمان به دلیل مواجهه و برخورد با مواد ناخالصی‌ها و همچنین عوامل محیطی آلوده می‌شود. به‌منظور مدیریت هزینه‌ها و همچنین کاهش مصرف آب، آب‌های مصرفی توسط واحد پساب‌گندزدایی شده و تصفیه می‌شود. در ادامه آب تصفیه شده بازگشتی با افزودن مقداری آب فرش مجدداً وارد چرخه شده و برای واحد مربوطه نظیر گندله‌سازی قابل استفاده می‌شود. در مقایسه با آب فرش، آب برگشتی مورد استفاده در فرآیند گندله‌سازی حاوی مقادیر زیادی یون کلر، فسفات و کلسیم می‌باشد. ترکیبات کلری، کلسیم و pH آب که به مخلوط سنگ آهن اضافه می‌شود و ۸ درصد وزنی گندله خام را تشکیل می‌دهد، عامل محرک دیگری برای تأثیر بر روی کیفیت سطح رول‌ها می‌باشد و میزان خوردگی آن‌ها را تعیین می‌کند (۱۰ و ۱۱). این در حالی است که فولادهای زنگ‌نزن

جدول ۱- ترکیب شیمیایی استاندارد AISI 415 (۷)

عنصر	درصد وزنی
C	حداکثر ۰/۰۵
Si	حداکثر ۰/۷
Mn	حداکثر ۱/۵
Ni	۳/۵ - ۴/۵
P	حداکثر ۰/۰۴
S	حداکثر ۰/۰۱۵
Cr	۱۲ - ۱۴
Mo	۰/۷ - ۰/۳
N	حداکثر ۰/۰۲

معادل با استاندارد DIN1.4313 (AISI 415) می‌باشد (۷). این نوع فولادها به دلیل ترکیب عالی از مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی مطلوب در صنایع معدنی و شیمیایی استفاده می‌شوند. ریزساختار فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی شامل مارتنزیت، کاربید رسوب کرده، آستنیت باقی‌مانده و فریت دلتا می‌شود. مطالعات بر روی این فولادها نشان داده است که به‌خاطر عدم تعادل عناصر آلیاژی ترکیب بین پایدارکننده‌های آستنیت و فریت در فولاد و دماهای آستنیت‌شدن، ریزساختار فولاد می‌تواند شامل مقادیر مختلف آستنیت باقیمانده، فریت دلتا و کاربید شود (۸). ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آمده

جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد آزمایش

Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C	Fe	نمونه
۰/۸۰	۳/۶۵	۱۲/۰۷	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۰۴۷	پایه	A <sup>+</sup>
۰/۵۵	۳/۷۰	۱۳/۹۸	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۰۴۷	پایه	B
۰/۳۷	۳/۷۲	۱۴/۵۶	۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۰۷۳	پایه	A

بر حفره‌دار شدن این فولاد است. هر چند که این تأثیر مثبت در هر دو محلول یکسان نیست، بلکه در محلول کلراید بیشتر از برماید است.

در این پژوهش رفتار خوردگی رول‌های صفحات غلتکی در محیط آب فرّش نسبت به آب برگشتی C60 (۶۰ درصد آب تصفیه شده به همراه ۴۰ درصد آب فرّش) در واحد گندله‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به بررسی تأثیر عناصر آلیاژی نظیر Mo و Cr در مقاومت به خوردگی فولادهای DIN 1.4313 پرداخته شد. در واقع تفاوت دو محیط ذکر شده در کمتر بودن یون‌های مهاجمی همچون کلر در آب فرّش نسبت به آب C60 می‌باشد.

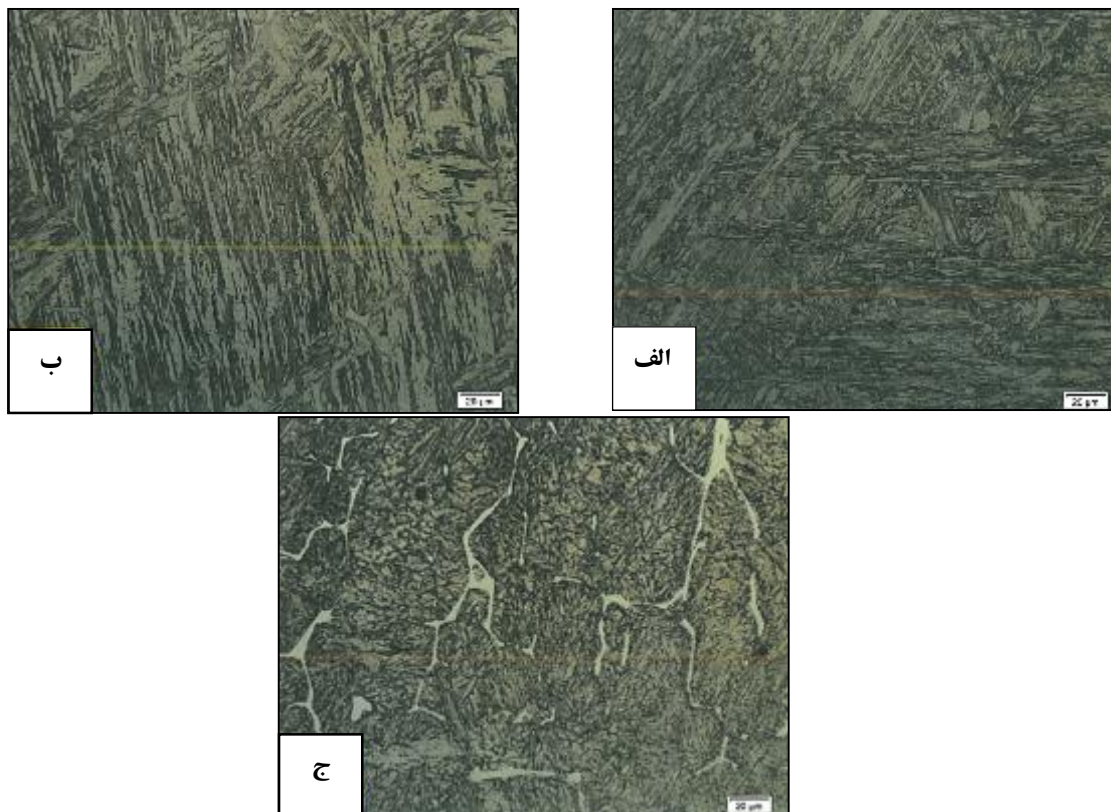
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از سه آلیاژ مختلف فولادی با ترکیب شیمیایی نزدیک به استاندارد فولاد زنگ نزن AISI415 استفاده شده است که ترکیب شیمیایی آنها در جدول (۲) ارائه شده است. نمونه‌های فولادی تحت نام‌گذاری A<sup>+</sup>، A و B به صورت کوپن‌هایی با ابعاد ۵×۱۰×۳۰ میلی‌متر مکعب از لوله‌های ریخته‌گری شده، انتخاب شد. لازم به ذکر است که این سه قطعه بدون آن‌که تحت عملیات حرارتی خاصی واقع شوند، در شرایط یکسان ریخته‌گری شده‌اند.

بررسی ریزساختاری نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری Epiphot 300 همراه با دوربین دیجیتال Nikon FDX-35 با استفاده از محلول اچانت نایتال دو درصد و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر انجام شد. همان‌گونه که قبلاً گفته شد آزمون‌های الکتروشیمیایی در دو محیط آب C60 و آب فرّش واحد

نسبت به حضور یون کلر بسیار حساس هستند و این یون عامل بروز خوردگی حفره‌ای در این گروه از فولادهای زنگ نزن می‌شود (۱۲). حفره‌دار شدن این فولادها در اثر شکست موضعی لایه رویین در نقاط ضعیف فیلم مانند آخال‌ها، مرزخانه‌ها و به‌طور کلی هر ناپیوستگی در این لایه و در حضور یون‌های مخرب اتفاق می‌افتد که پس از شکست موضعی لایه رویین، فرآیند خوردگی با انحلال یون‌های فلزی زیرلایه و ورود آن‌ها به درون حفره ادامه می‌یابد (۱۳). در پی انحلال یون‌های فلزی، محلول هیدرولیز شده و در نتیجه غلظت پروتون‌ها رفته رفته افزایش می‌یابد که منجر به اسیدی شدن محلول درون حفره می‌شود. در راستای خنثی شدن بار الکتریکی درون حفره، آنیون‌های مخرب نیز وارد حفره شده و شرایط مخرب آن تشدید می‌شود. بنابراین دو عامل روی خوردگی حفره‌ای مؤثر است؛ یکی جوانه‌زنی حفره و دیگری رشد و گسترش آن. آنیون‌های مخرب موجود در محلول هم در مرحله جوانه‌زنی و هم در مرحله رشد تأثیر به‌سزایی بر فرآیند حفره‌دار شدن دارند (۱۴). بررسی‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که آنیون‌های مخرب متعددی برای آلیاژهای گوناگون وجود دارند؛ اما اغلب، در فولادهای زنگ‌نزن، حفره‌دار شدن در حضور آنیون‌هایی چون کلراید، برماید و یداید روی می‌دهد؛ گرچه پژوهش‌های صورت گرفته درباره برماید و یداید نسبت به کلراید بسیار اندک است (۱۵).

بررسی‌های انجام شده توسط کانکو<sup>۴</sup> و آیزاکس (۱۶) بر روی تغییرات پتانسیل خوردگی حفره‌ای فولاد زنگ‌نزن فریتی حاوی مقادیر مختلف مولیبدن، در محلول‌های کلراید و برماید، بیانگر تأثیر مثبت مولیبدن در کاهش اثرات مخرب این دو یون



شکل ۲- ریزساختار نمونه‌های: الف)  $A^+$ ، ب) B و ج) A در بزرگ‌نمایی ۵۰۰.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه  $A^+$  دارای ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بوده (شکل ۲-الف) اما در نمونه‌های A و B حضور فریت دلتا ( $\delta$ ) در زمینه مارتنزیتی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۲-ب و ج).

فاز مارتنزیت به صورت مناطقی با رنگ تیره و فاز فریت به صورت رگه‌های روشن در داخل زمینه مارتنزیتی پخش شده‌اند. در واقع فریت دلتا اولین فازی است که در طول انجماد فولاد تشکیل می‌شود و باعث حساسیت به خوردگی در فولادها می‌شود. در طی سرد شدن مذاب فولاد، آستنیت هم در فاز مایع و هم در فریت دلتا شروع به تشکیل می‌کند. با سریع سرد شدن، آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود و ریزساختار نهایی یا کاملاً مارتنزیتی و یا با کسری از فریت دلتا اولیه است (۱۷).

گندله‌سازی در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شد. تمامی آزمون‌های الکتروشیمیایی با استفاده از سلول خوردگی سه الکترودی شامل الکترود مرجع  $Ag/AgCl$ ، الکترود شماره‌دهنده پلاتینی و نمونه‌های مورد آزمایش به عنوان الکترودهای کاری و به کمک دستگاه گالوانواستات IVIUMStat Xre مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نمونه‌های فولادی قبل از شروع آزمایش به طور کامل از آلودگی‌های سطحی پاک شدند. برای این کار ابتدا سطح نمونه‌ها سمباده زنی و پولیش شده و سپس به مدت ۳ دقیقه درون محلول اسید سولفوریک ۵ درصد قرار گرفتند و پس از آن آب‌کشی شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها با هوای گرم، مجدداً با الکل شسته و دوباره خشک شدند.

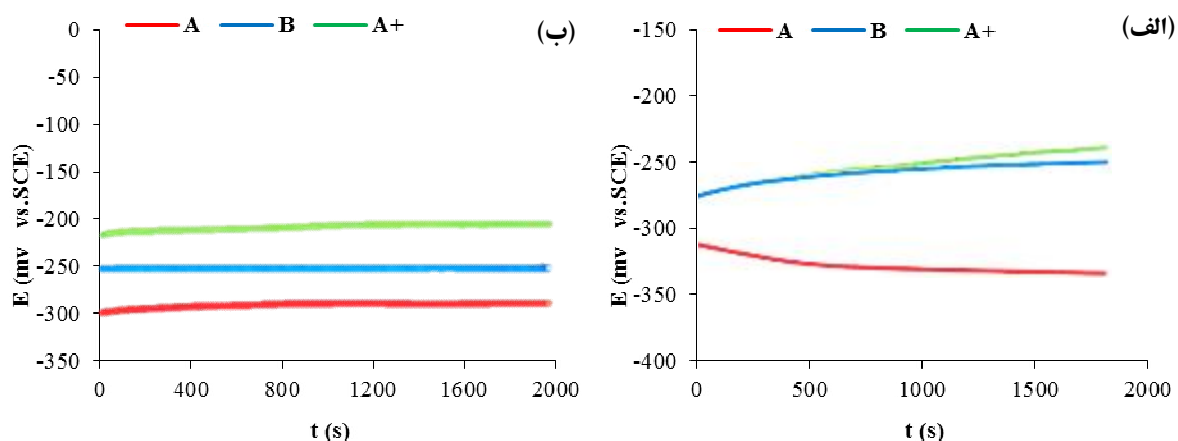
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریزساختاری

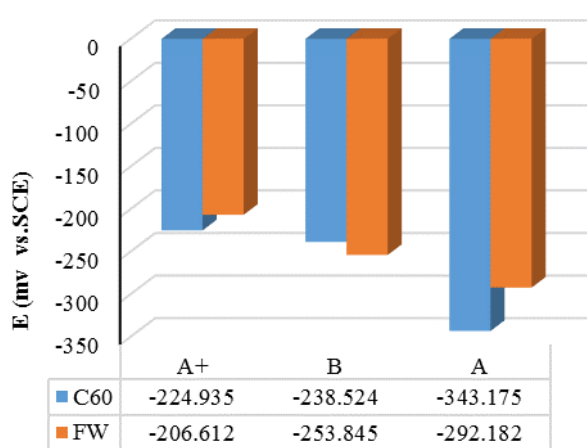
ریزساختار فولاد DIN1.4313 در شکل (۲) ارائه شده است.

#### ۳-۲- مشخصه‌یابی الکتروشیمیایی

آزمون‌های خوردگی مدار باز، امپدانس الکتروشیمیایی،



شکل ۳- آزمون مدار باز در محیط: الف) آب C60، ب) آب فرّش واحد گندله‌سازی.



شکل ۴- نمودار ستونی نتایج آزمون مدار باز قطعات در محیط

آب C60 و آب فرّش واحد گندله‌سازی.

به طوری که پتانسیل قطعات به جز نمونه B در آب فرّش نجیب-تر شده است.

### ۳-۲-۲- بررسی آزمون امپدانس الکتروشیمیایی<sup>۶</sup>

نمودارهای نایکوئیست حاصل از طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در شکل (۵) آورده شده است. قطر نیم دایره‌ها نشان‌دهنده مقاومت انتقال بار است. هرچه قطر حلقه بزرگ‌تر و ظرفیت خازنی آن کمتر باشد نمونه مقاوم‌تر است. نتایج آنالیز طیف‌نگاری امپدانس و همچنین داده‌های عددی استخراج شده از آزمون در محلول‌های محیط آب C60 و آب فرّش واحد

جدول ۳- پتانسیل مدار باز نمونه‌ها در دو محیط

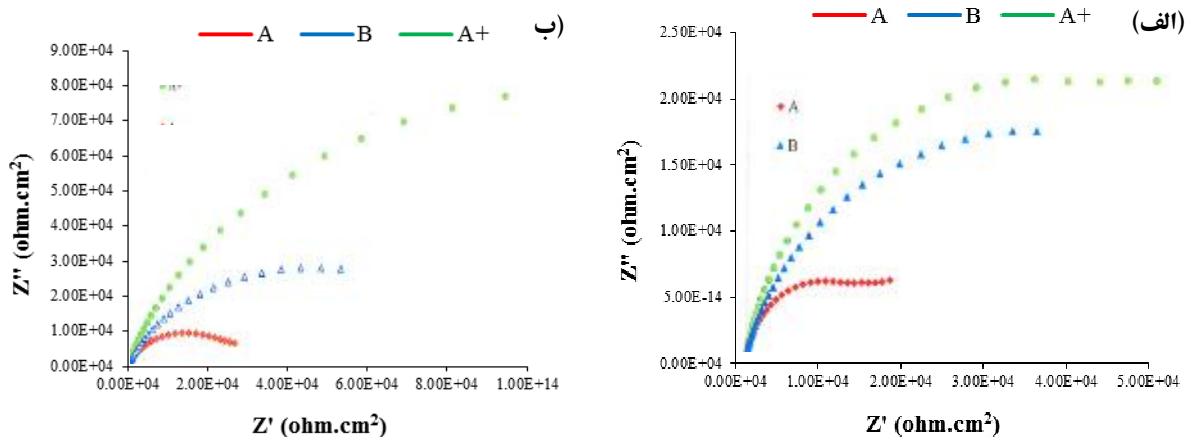
نمونه	A	B	A+
محیط C60	-۰/۳۴۳	-۰/۲۳۹	-۰/۲۲۵
محیط آب فرّش	-۰/۲۹۲	-۰/۲۵۴	-۰/۲۰۷

پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و حفره‌دار شدن به منظور بررسی رفتار خوردگی قطعات در آب C60 و آب فرّش واحد گندله‌سازی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گردید.

### ۳-۲-۱- بررسی آزمون مدار باز<sup>۵</sup>

به منظور رسیدن به حالت پایدار، قبل از انجام آزمون‌های خوردگی، نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در شرایط مدار باز به مدت یک ساعت مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این آزمون که در شکل (۳) و همچنین جدول (۳) ارائه شده، نشان می‌دهد که پتانسیل مدار باز قطعه A+ مثبت‌ترین مقدار و قطعه A منفی‌ترین مقدار را دارد که نشان از نجیب بودن پتانسیل قطعه A+ و فعال-تر بودن پتانسیل قطعه A می‌باشد.

گرچه به تنهایی با نتایج آزمون مدار باز نمی‌توان در رابطه با سرعت خوردگی اظهار نظر کرد و تنها رفتار کلی قطعات مشخص می‌شود. در شکل (۴) نیز پتانسیل قطعات در دو محیط آب C60 و آب فرّش واحد گندله‌سازی مقایسه شده‌اند.



شکل ۵- نمودارهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محیط: الف) آب C60، ب) آب فرس.

فرش نشان می‌دهد. نتایج عددی حاصل از منحنی‌های پتانسیودینامیک در جدول (۵) ارائه شده‌اند. در این جدول پتانسیل خوردگی  $E_{corr}$ ، چگالی جریان خوردگی  $i_{corr}$  شیب تافل آندی  $\beta_a$ ، شیب تافل کاتدی  $\beta_c$  و مقاومت در برابر پلاریزاسیون  $R_p$  می‌باشد. به منظور محاسبه مقاومت در برابر پلاریزاسیون و مقایسه رفتار خوردگی نمونه‌های مورد آزمایش از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$R_p = \frac{\beta^a \beta^c}{2.3i^c (\beta^a + \beta^c)} \quad (1)$$

تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در شرایط C60 ناپایدار بوده و با نرخ بالا به صورت یکنواخت دچار خوردگی می‌شوند. علاوه بر این، با مقایسه پتانسیل و چگالی جریان خوردگی تمامی نمونه‌ها در دو محیط مشخص می‌شود که رفتار خوردگی در شرایط C60 به مراتب شدیدتر از شرایط آب فرش می‌باشد. به دلیل پایداری شیمیایی پایین فاز فریت دلتا در نمونه‌های دو فاز A و B در مقایسه با فاز مارتزیت نمونه  $A^+$ ، مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌های A و B پایین‌تر از نمونه فولادی  $A^+$  می‌باشد. همچنین در فولادهای دوفازی، امکان تشکیل سلول گالوانیک در فصل مشترک فازهای فریت و مارتزیت وجود داشته که منجر به افزایش نرخ خوردگی نسبت به فولاد تک‌فاز می‌شود. در واقع نمونه دوفازی B به دلیل محتوای بیشتر عنصر مولیبدن در ریزساختار، مقاومت خوردگی بیش‌تری را نسبت به

گندله‌سازی در جدول (۴) قابل مشاهده است. منحنی‌های نایکوئیست تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در محلول آب C60 دارای یک انتهای منفی بوده که ناشی از نرخ خوردگی بالای قطعات فولادی در محیط آب C60 می‌باشد. به بیان دیگر، به دلیل نرخ بالای انحلال یون‌های آهن در محیط آب C60 یک نیم حلقه در قسمت بالای محور که بیانگر ظرفیت بوده و یک نیم حلقه در قسمت منفی به واسطه الفاگر قابل مشاهده است (شکل ۵-الف). مطابق با مطالعات موانگا و همکاران (۱۸)، انتهای منفی در نمودار به دلیل جذب هیدروژن و محصولات مثل  $Zn(I)$ ،  $Zn(II)$ ،  $Fe(II)$  و  $Fe(I)$  اتفاق می‌افتد. طبق جدول (۴) مقاومت الکترولیت  $R_s$ ، ظرفیت خازنی  $C_{dl}$  و مقاومت نسبت به خوردگی  $R_p$  مشخص شده است. با بررسی قطر نیم دایره‌های نایکوئیست نمونه‌ها و همچنین مقادیر  $R_p$  ملاحظه شد قطعه  $A^+$  بیش‌ترین و قطعه A کمترین مقاومت به خوردگی را در هر دو محیط داشته‌اند و بهترین عملکرد خوردگی برای نمونه  $A^+$  می‌باشد.

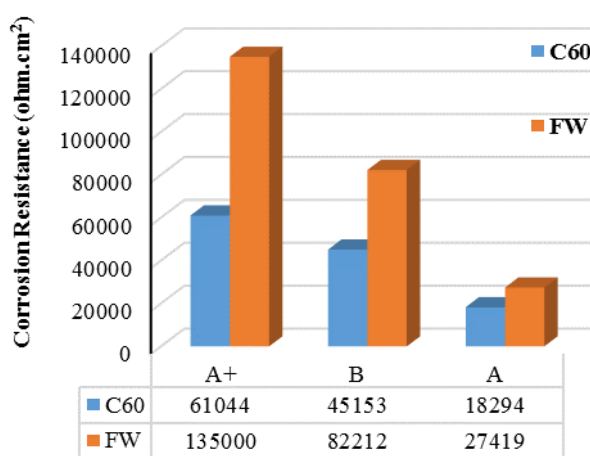
نمودار ستونی شکل (۶) نیز نشان می‌دهد که مقاومت به خوردگی قطعات در آب فرش بیشتر از آب C60 است.

### ۳-۲-۳- بررسی آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک<sup>۷</sup>

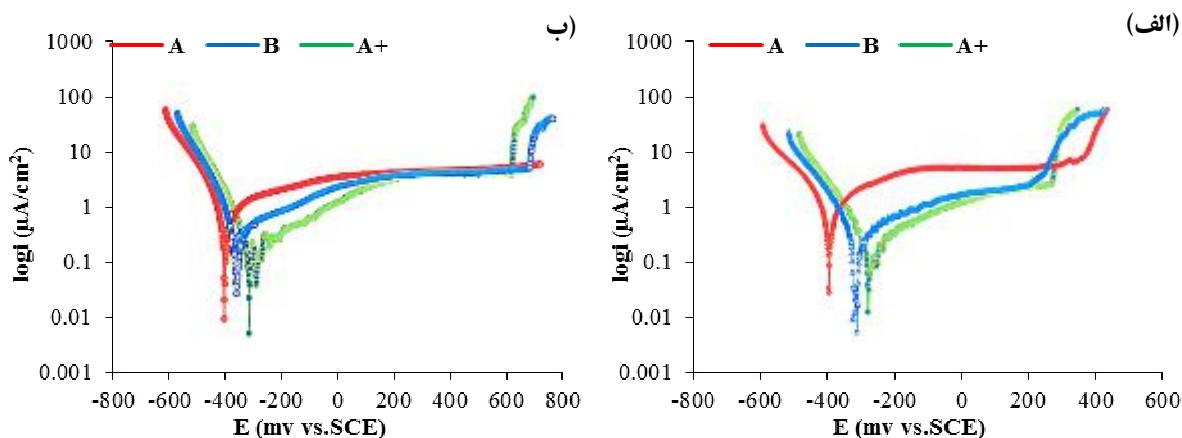
شکل (۷-الف و ب) منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های مورد آزمایش را به ترتیب در محیط‌های C60 و آب

جدول ۴- داده‌های عددی استخراج شده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

محیط آب فرس				محیط C60				نمونه
n	C <sub>dl</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	n	C <sub>dl</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	R <sub>p</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	R <sub>s</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	
۰/۸۵۶	۷/۸۴ E -۰۵	۱/۳۴ E -۰۵	۳۴۰	۰/۸۴۲	۱/۰۵ E -۰۴	۶۱۰۴۴	۸۶/۵۳	A <sup>+</sup>
۰/۸۰۳	۱/۳۱ E -۰۴	۸۲۲۱۲	۲۹۲	۰/۸۳۴	۱/۲۰ E -۰۴	۴۵۱۵۳	۸۳/۷۴	B
۰/۸۲۶	۱/۲۰ E -۰۴	۲۷۹۱۴	۳۵۰	۰/۸۳۲	۱/۳۸ E -۰۴	۱۸۲۹۴	۸۴/۱۶	A



شکل ۶- نمودار ستونی نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در دو محیط.



شکل ۷- نمودارهای حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون در محیط: (الف) آب C60، (ب) آب فرس.

ریزساختار، رفتار خوردگی بهتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان می‌دهد.

نمونه A در هر دو محیط نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که نمونه A<sup>+</sup> به دلیل افزایش محتوای عنصر مولیبدن در

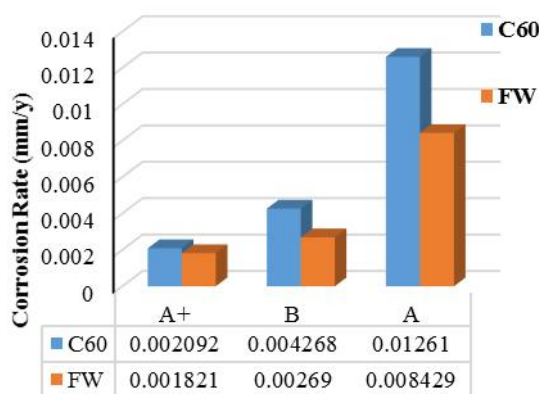


جدول ۵- داده‌های عددی استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

محیط آب فرس			محیط C60			نمونه
A	B	A <sup>+</sup>	A	B	A <sup>+</sup>	
-۰/۳۳۹	-۰/۳۰۴	-۰/۲۴۳	-۰/۳۷۷	-۰/۲۹۸	-۰/۲۶۲	E <sub>corr</sub> (V)
۷/۷۳ E - ۰۷	۲/۴۷ E - ۰۷	۱/۶۷ E - ۰۷	۱/۱۶ E - ۰۶	۳/۹۲ E - ۰۷	۱/۹۲ E - ۰۷	i <sub>corr</sub> (A/Cm <sup>2</sup> )
۳/۳۹ E - ۰۴	۶/۵۰ E - ۰۴	۱/۸۸ E - ۰۴	۲/۰۵ E - ۰۴	۵/۷۲ E - ۰۴	۱/۰۶ E - ۰۴	R <sub>p</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )
۳/۷۶۳	۱/۴۰۳	۰/۳۲۲	۰/۴۹۳	۰/۴۴۲	۰/۶۸۹	β <sub>a</sub>
۰/۱۴۵	۰/۰۹۱	۰/۰۹۳	۰/۱۶۸	۰/۱۶۲	۰/۱۲۷	β <sub>c</sub>

### ۳-۲-۴- آزمون حفره دار شدن<sup>۸</sup>

روش‌های مختلفی برای گزارش میزان مقاومت یک فلز در برابر خوردگی حفره‌دار شدن وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از نمودار پتانسیل برحسب جریان برای تعیین پتانسیلی است که در آن حفره‌دار شدن شروع می‌شود. همچنین با برگرداندن پتانسیل (پلاریزاسیون سیکلی) و محاسبه نقطه تقاطع و مساحت ناحیه برگشتی می‌توان پتانسیل حفاظت (E<sub>prot</sub>) از حفره‌دار شدن را نیز محاسبه نمود. در پتانسیل‌های پایین‌تر از نقطه تقاطع و نواحی با مساحت کمتر، حفره‌دار شدن اتفاق نخواهد افتاد. شکل (۹) خوردگی حفره‌ای را در هر سه آلیاژ نشان می‌دهد. به طوری که با شکستن یا آسیب دیدن لایه پسیو، خوردگی حفره‌ای آغاز و رشد کرده است. در واقع مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن عمدتاً به رشد یک فیلم اکسید کروم بر روی سطح آن نسبت داده می‌شود. تغییرات و شکسته شدن لایه اکسید مستقیماً بر مقاومت خوردگی موضعی تأثیر می‌گذارد و منجر به خوردگی حفره‌ای می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در طی رخداد خوردگی حفره‌ای و در رقابت بین دو عنصر کروم و مولیبدن، افزایش محتوای کروم به دلیل تشکیل لایه محافظ قوی، نقش سازنده مؤثرتری نسبت به مولیبدن در کاهش حفرات سطحی دارد (۲۰). با توجه به مقادیر E<sub>prot</sub> و همچنین مساحت نواحی ایجاد شده می‌توان نتیجه گرفت که



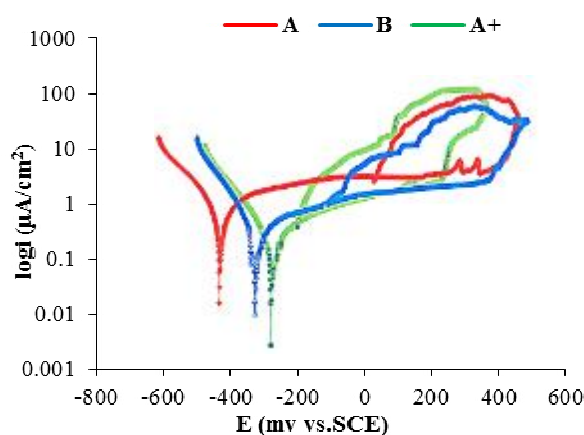
شکل ۸- نمودار ستونی نتایج آزمون پلاریزاسیون در دو محیط.

همچنین نمودار ستونی شکل (۸) کاهش سرعت خوردگی تمام قطعات در محیط آب فرس نسبت به آب C60 را نشان می‌دهد. در راستای تحقیقات انجام شده، لیما و همکاران (۱۷) با پژوهش بر رفتار خوردگی غلتک‌های ریخته‌گری پیوسته در محیط‌های حاوی NaCl و تحلیل غلظت‌های یون کلراید به این نتیجه رسیدند که فولادهای مارتنزیتی ۴۱۴ با درصد مولیبدن بیشتر نسبت به فولاد ۴۱۵، در محیط با غلظت ppm NaCl ۳۰۰ مقاومت به خوردگی بیشتری از خود نشان می‌دهند. ژانگ و همکاران (۱۹) نیز با بررسی اندازه‌گیری حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای فولادهای زنگ نزن به نقش کروم و مولیبدن در جلوگیری از بروز خوردگی اشاره کردند.

C60 می باشد.

۳. براساس مشاهدات انجام شده دلیل بالاتر بودن مقاومت به خوردگی نمونه A<sup>+</sup> نسبت به دو نمونه دیگر را می توان اختلاف در آنالیز قطعات و ریزساختار آن ها دانست. به طوری که این اختلاف باعث ایجاد پیل های گالوانیک موضعی و تخریب لایه اکسید سطحی و نهایتاً شروع و رشد خوردگی حفره ای خواهد شد.

۴. با توجه به نتایج بررسی های انجام شده، تغییر محیط و اصلاح ریزساختار دو راه اساسی برای کاهش خوردگی این آلیاژ خواهد بود.



شکل ۹- نمودار آزمون حفره دار شدن در آب C60.

نمونه A به دلیل محتوای بیشتر عنصر کروم و ایجاد لایه اکسیدی قوی، در برابر حفره دار شدن مقاوم تر است.

#### ۴- نتیجه گیری

۱. بررسی های ریزساختار نشان می دهد که نمونه A<sup>+</sup> دارای یک ریزساختار کاملاً مارتنزیتی می باشد در حالی که در نمونه های A و B حضور فریت دلتا در زمینه مارتنزیتی قابل مشاهده می باشد.

۲. نتایج آزمون های خوردگی حاکی از مقاومت به خوردگی بالای قطعه A<sup>+</sup> نسبت به دو نمونه دیگر در هر دو محیط می باشد. همچنین کاهش سرعت خوردگی تمام قطعات در محیط آب فرس نسبت به آب C60 نشان از کمتر بودن یون های مهاجمی همچون کلر در آب فرس نسبت به آب

#### واژه نامه

1. screening
2. roller plates
3. fresh water
4. Kaneko
5. open circuit potential (OCP)
6. electrochemical impedance spectroscopy (EIS)
7. potential dynamic polarization (PDP)
8. pitting

#### مراجع

1. Elskamp F, Kruggel-Emden H. Review and benchmarking of process models for batch screening based on discrete element simulations. *Advanced Powder Technology*. 2015 May 1;26(3):679-97. doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.001
2. Jafari A, Nezhad VS. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear. *Powder Technology*. 2016 Sep

- 1;297:126-43. doi:10.1016/j.powtec.2016.04.008
3. Lavoie JG, inventor; Met Chem Canada Inc, assignee. Adjustable roller screen. United States patent US 6,053,330. 2000 Apr 25.
  4. Abd Rashid RZ, Salleh HM, Ani MH, Yunus NA, Akiyama T, Purwanto H. Reduction of low grade iron ore pellet using palm kernel shell. Renewable energy. 2014 Mar 1;63:617-23. doi:10.1016/j.renene.2013.09.046
  5. Horabik J, Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. Biosystems engineering. 2016 Jul 1;147:206-25. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017
  6. Yang XD, Zhao LL, Li HX, Liu CS, Hu EY, Li YW, Hou QF. DEM study of particles flow on an industrial-scale roller screen. Advanced Powder Technology. 2020 Nov 1;31(11):4445-56. doi: 10.1016/j.apt.2020.09.020
  7. Bringas JE. Hand Book of Comparative World Steel Standards. 5th ed. West Conshohocken; 2004.
  8. Rajasekhar A, Reddy GM, Mohandas T, Murti VS. Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 431 martensitic stainless steel electron beam welds. Materials & Design. 2009 May 1;30(5):1612-24.
  9. Moayed MH, Newman RC. Evolution of current transients and morphology of metastable and stable pitting on stainless steel near the critical pitting temperature. Corrosion science. 2006 Apr 1;48(4):1004-18. doi:10.1016/j.corsci.2005.03.002
  10. Childress J, Liou SH, Chien CL. Magnetic properties of metastable 304 stainless steel with BCC structure. Le Journal de Physique Colloques. 1988 Dec 1;49(C8):C8-113.
  11. Padurean I, Trusculescu M, Demian IG. Influence of structural state on cavitation erosion of martensitic stainless steel quenching and laser hardened. The Romanian Journal of Technical Sciences. Applied Mechanics. 2007 Jun 1;52(2):125-32.
  12. Tedmon CS, Vermilyea DA, Rosolowski JH. Intergranular corrosion of austenitic stainless steel. Journal of the Electrochemical Society. 1971 Feb 1;118(2):192. doi:10.1149/1.2407966
  13. Burstein GT, Vines SP. Repetitive nucleation of corrosion pits on stainless steel and the effects of surface roughness. Journal of The Electrochemical Society. 2001 Nov 6;148(12):B504. doi:10.1149/1.1416503
  14. Alvarez MG, Galvele JR. Pitting corrosion – Shreir's Corrosion", Elsevier, (2010).
  15. Galvele JR. Transport processes and the mechanism of pitting of metals. Journal of the Electrochemical Society. 1976 Apr 1;123(4):464. doi:10.1149/1.2132857
  16. Kaneko M, Isaacs HS. Effects of molybdenum on the pitting of ferritic-and austenitic-stainless steels in bromide and chloride solutions. Corrosion Science. 2002 Aug 1;44(8):1825-34. doi:10.1016/S0010-938X(02)00003-3
  17. Lima DD. Study of corrosion resistance of martensitic stainless steels used in continuous casting rolls. Fortaleza; 2020.
  18. Mouanga M, Puiggali M, Tribollet B, Vivier V, Pébère N, Devos O. Galvanic corrosion between zinc and carbon steel investigated by local electrochemical impedance spectroscopy. Electrochimica acta. 2013 Jan 15;88:6-14. doi.org/10.1016/j.electacta.2012.10.002
  19. Zhang S, Li H, Jiang Z, Zhang B, Li Z, Wu J, Fan S, Feng H, Zhu H. Effects of Cr and Mo on precipitation behavior and associated intergranular corrosion susceptibility of superaustenitic stainless steel S32654. Materials Characterization. 2019 1;152:141-50. doi:10.1016/j.matchar.2019.04.010
  20. McCafferty E. Introduction to corrosion science. 3rd ed. New York; 2010 [chapter 10].