

بررسی تاثیر اندازه دانه بر روی رفتار خوردگی فولاد API-5L-X70 در محیط شبیه سازی شده خاک

فرزاد بنی اسد آزاد^۱، منصور فرزام^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

* نویسنده مسئول: منصور فرزام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

چکیده

در این پژوهش تاثیر اندازه دانه بر روی رفتار خوردگی فولاد API-5L-X70 توسط روش های الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. از ۲ ورق فولادی با دو اندازه دانه ی متفاوت تولید شده به روش ترمومکانیکال استفاده شد. به منظور بررسی بیشتر عملیات حرارتی های آنیل و نرماله بر روی نمونه ی ریز دانه تر صورت گرفت و دسته ی دیگری از این نمونه ها در آب یخ و نمک کوئنچ شدند. با تغییر فاکتور زمان عملیات حرارتی طیف بیشتری از اندازه دانه بدست آمد. برای بررسی ساختار و اندازه دانه از تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی و نرم افزار MIP Cloud بهره گرفته شد. با توجه به وجود ساختار های متفاوت، متوسط قطر دانه های فریت، فریت پلی گونال و بسته های مارتنزیت مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی رفتار خوردگی از آزمون های پلاریزاسیون خطی تافل و امپدانس الکتروشیمیایی در محیط خورنده شبیه سازی شده خاک با pH خنثی استفاده شد. نتایج نشان داد که نمونه درشت دانه ۲۶۴۷ با متوسط قطر دانه های فریت $18/9 \mu m$ رفتار خوردگی بهتری را نسبت به نمونه ریز دانه $6530 \mu m$ با قطر متوسط $13/4 \mu m$ از خود نشان داده است. به طوری که نرخ خوردگی از $1/533 \text{ mpy}$ به $1/358 \text{ mpy}$ کاهش یافته است. همین روند نیز در قطعات عملیات حرارتی شده به جز نمونه های سرد شده در هوا مشاهده شد. در این نمونه ها با افزایش اندازه دانه های فریت پلی گونال از $23/62 \mu m$ به $31/79 \mu m$ چگالی جریان خوردگی از $1/116$ به $2/194$ میکرو آمپر بر سانتی متر مربع افزایش یافته است که می توان به دلیل رسوب زدایی ناخالصی ها و وجود گرادیان مشخص از عناصر آلیاژی باشد.

کلیدواژه: اندازه دانه، فولاد API-5L-X70، خوردگی، پلاریزاسیون خطی، امپدانس الکتروشیمیایی، عملیات حرارتی.

Investigating the Effect of Grain Size on the Corrosion Behavior of API-5L-X70 Steel in Simulated Soil Environment

F. B. Azad¹, M. Farzam^{2*}

¹MSc, Department of Inspection Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

²Associate Professor, Department of Inspection Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

* Corresponding Author: M. Farzam

Submission: 2018, 05, 30 Acceptance: 2018, 12, 16

Abstract

In this study, the effect of grain size on the corrosion behavior of API-5L-X70 steel was investigate by using electrochemical methods. Two steel sheets with two different grain sizes were manufactured by using the thermo-mechanical method. In order to further investigate anneal and normalize heat treatment was performed on a fine grain sample. And another group of these samples were quenched in salt water and ice. By changing the time of heat treatment, a greater range of grain sizes were obtained. To investigate the structure and grain size, the electron microscopic images and MIP Cloud software were used. The average diameter of ferrite and polygonal ferrite grains and martensite packets due to the existence of different structures has been investigated. TOEFL linear polarization and electrochemical impedance tests were used to evaluate corrosion behavior, in simulated soil with neutral pH soil. The results showed that coarse-grained sample 2647 with a mean diameter of ferrite grains of 18.9 μm showed better corrosion behavior compared to the fine grain sample 6530 with a mean diameter of 13.4 μm . The results show the corrosion rate decreased from 1.533 mpy to 1.358 mpy. The same trend was observed in the heat treatment parts except for the air-cooled samples. In this samples by increasing the size of the polygonal ferrite grains from 23.62 μm to 31.79 μm the Corrosion current density was increased from 1.116 to 2.194 $\mu\text{A.cm}^{-2}$ which can be due to depletion of impurities and the presence of a gradient of alloying elements.

Keywords: Grain size, API-5L-X70 Steel, Corrosion, Linear Polarization, Electrochemical Impedance, Heat treatment

۱- مقدمه

با توجه به هزینه های مستقیم و غیر مستقیم خوردگی در صنایع مختلف به خصوص نفت و گاز، توجه به روش های پیشگیری و پایش خوردگی بسیار پر اهمیت است. در زمینه پیشگیری از خوردگی، شناخت و انتخاب صحیح مواد تحت عنوان متریا لسلکشن^۱ مطرح است. بدین منظور باید مواد مصرفی صنایع که اغلب فلزات هستند را به خوبی از نظر خواص و ساختار شناخت و رفتار آنها را در محیط های مختلف مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به اهمیت انتقال خطوط لوله گاز مدفون در خاک، در این تحقیق به بررسی ریزساختاری تاثیر اندازه دانه ی فولاد های X70 تحت استاندارد API-5L در محیط خورنده خاک پرداخته شده است.

لوله های مورد استفاده در صنایع انتقال نفت و گاز باید دارای ترکیب مطلوبی از استحکام، چقرمگی، جوش پذیری و مقاومت به خوردگی باشند [۱ و ۲]. در این میان لوله های فولادی گرید X از جمله X70 این نیاز را برآورده می کنند. فولادهای X70 دارای استحکام ۷۰ Ksi و دمای انتقال منفی ۴۰ درجه سانتی گراد متناسب با نیاز صنایع انتقال گاز می باشند [۳]. این فولاد ها در گروه فولاد های پر استحکام و کم آلیاژ قرار دارند که با استفاده از مقادیر جزئی عناصر آلیاژی به استحکام بالایی درست یافته اند. خواص مکانیکی این فولاد ها توسط عناصر آلیاژی و فرآیندهای ترمومکانیکال کنترل می شود [۴، ۵]. روش های پیشرفته زیادی شامل تکنیک های [۶، ۷] SMAT، [۸] HESP، [۹ و ۱۰] USSP و [۱۱] TSDR برای کنترل ساختار کریستالی استفاده می شود. با توجه به میکرو آلیاژی بودن این فولاد ها کنترل اندازه دانه

دشوار بوده و از فرآیندهای ترمومکانیکال و نورد، برای کنترل ساختار استفاده می شود. از دو پارامتر دما و زمان در شرایط پیش گرم برای بهبود ریز ساختار و اندازه دانه استفاده می شود [۱۲ و ۱۳]. با تغییر اندازه دانه می توان خواص مکانیکی را بهبود بخشید. در تحقیق صورت گرفته توسط حسیان [۱۴] در رابطه با سینتیک رشد اندازه دانه های آستنیت در فولاد های X70 و X65، این نتیجه حاصل شد که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی اندازه دانه ی فولاد API-5L-X70 افزایش می یابد.

همچنین تغییر اندازه دانه می تواند بر روی خواص خوردگی تاثیر گذار باشد. در تحقیق انجام شده توسط محمدیان راد بر روی تاثیر اندازه دانه بر روی رفتار خوردگی ترک القایی هیدروژنی بر روی فولاد API5L-X70 بیان شده که ساختار دانه ریز باعث افزایش سرعت رشد ترک خوردگی هیدروژنی نیست به ساختار درشت دانه شده است. البته نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه می باشد [۱۵]. در این تحقیق تاثیر اندازه دانه بر روی خوردگی مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که گفته شد بین اندازه دانه و خواص مکانیکی یاد شده رابطه ی مشخصی وجود دارد [۱۶، ۱۷]. اما با توجه به تحقیقات صورت گرفته [۱۸-۲۲] رابطه معینی بین اندازه دانه و مقاومت به خوردگی فلزات در محیط های مختلف بیان نشده است. رفتار الکتروشیمیایی فلزات و ریزساختار را می توان تحت پارامتر های محیط، تنش های پسماند و جداسازی و انحلال ناخالصی ها مورد بررسی قرار داد [۲۳].

یکی از مشخصه های اصلی برای پی بردن به رابطه ی بین ریزساختار و خواص مکانیکی اندازه دانه می باشد [۲۴]. با

^۱Ultrasonic Shot Peening

^۲slab casting and direct rolling

^۳Hossain

^۱Material Selection

^۲Surface Mechanical Attrition Treatment

^۳High-Energy Shot Peening

توجه به تحقیقات صورت گرفته تغییر ریز ساختار کریستالی منجر به تغییر خواص خوردگی می شود [۲۵، ۲۶]؛ اما رابطه مشخصی بین اندازه دانه و مقاومت به خوردگی فلزات ارائه نشده است [۱۸، ۲۳]. در بعضی از تحقیقات صورت گرفته محققان بهبود رفتار خوردگی را با کاهش اندازه دانه [۲۷-۲۹] و در بعضی دیگر افزایش نرخ خوردگی را با افزایش اندازه دانه گزارش داده اند [۳۰، ۳۱]. یان تانگ [۳۲] گزارش داد که نرخ خوردگی فولاد WDH370 در محیط آب دریا با افزایش اندازه دانه از $5\mu\text{m}$ تا $25\mu\text{m}$ کاهش می یابد و بعد از آن نرخ تغییرات بسیار ناچیز است و کاهش اندازه دانه با افزایش انرژی سطح دانه سبب خوردگی بیشتر می شود. باید در نظر داشت تغییر اندازه دانه خواص دیگر فلز را نیز تحت تاثیر قرار می دهد. از طرفی با افزایش اندازه دانه خواص مکانیکی فلز مانند

استحکام کاهش می یابد؛ در این بین اندازه دانه باید به گونه ای انتخاب شود که بیشترین خواص مکانیکی و کمترین نرخ خوردگی را داشته باشد [۳۲]. از آنجا که رابطه بین اندازه دانه و خوردگی مشخص و ثابت نیست در این تحقیق به بررسی رابطه بین اندازه دانه و رفتار خوردگی در محیط خاک پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از دو ورق فولادی API-5L-X70، با دو اندازه دانه متفاوت استفاده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ذکر شده توسط شرکت لوله سازی اهواز تایید شده است

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد های API-5L-X70 استفاده شده در تحقیق

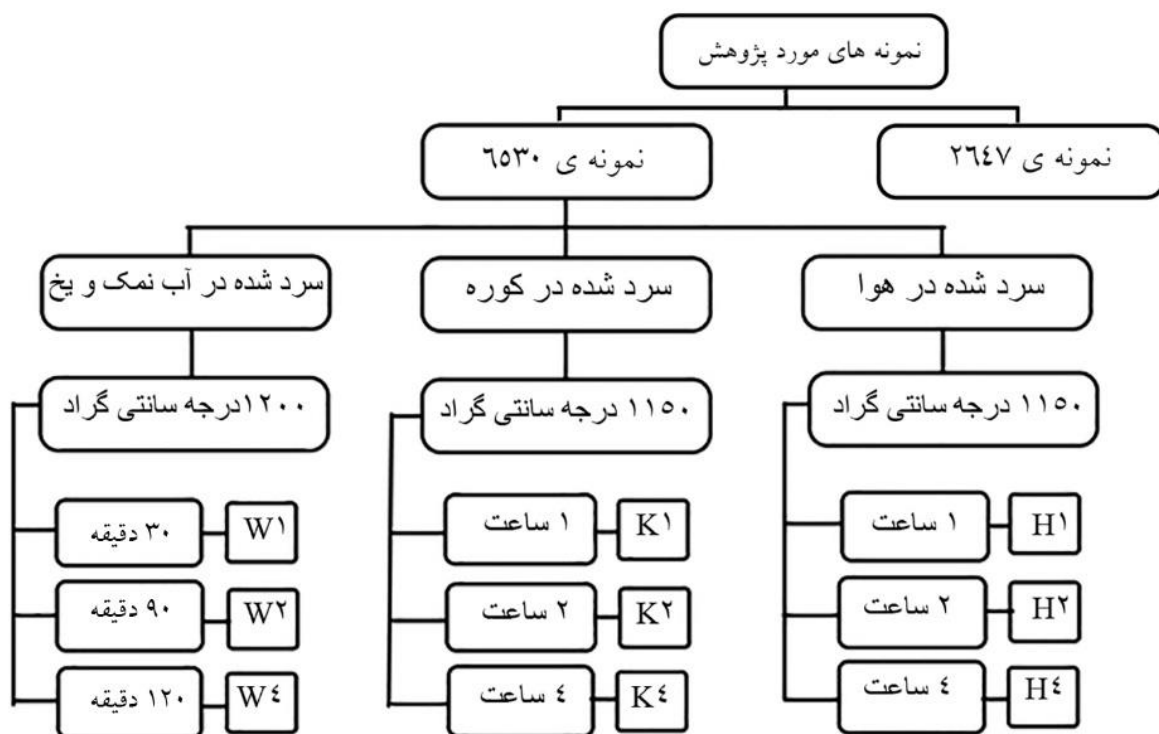
عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti
درصد وزنی نمونه ۲۶۴۷	۰/۰۶۴	۰/۱۸۹	۱/۳۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۱۳۱	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۰/۰۳	۰/۲۳۹	۰/۰۴۷	۰/۰۲
درصد وزنی نمونه ۶۵۳۰	۰/۰۷۹	۰/۲۳۸	۱/۴۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۳	۰/۱۳۳	۰/۰۸۸	۰/۱۰۹	۰/۰۴۴	۰/۰۸۳	۰/۰۵۶	۰/۰۲۹

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در این آزمایش بر طبق استاندارد ASRM A370

خواص مکانیکی	Y.S kpsi	UTS kpsi	$\Delta L/L_0$	سختی (راکول C)
۲۶۴۷	۷۹	۸۹	۵۰	۸۶
۶۵۳۰	۸۴	۹۵	۴۰	۹۵

بعد از ارزیابی اولیه ساختاری توسط میکروسکوپ نوری از تست های کشش و ضربه به منظور بررسی اولیه خواص مکانیکی ورق های فولادی استفاده شد. نمونه هایی در ابعاد $۱\frac{۱}{۵} \times ۳$ سانتی متر از لوله های ۴۸ اینچی برای انجام عملیات حرارتی برشکاری و تراشکاری شد. به منظور بررسی بیشتر عملیات حرارتی های آنیل و نرماله بر روی نمونه ی ریز دانه تر صورت گرفت و دسته ی دیگری از این نمونه ها در آب یخ و نمک کوئنچ شدند. دلیل انتخاب قطعه ۶۵۳۰ برای انجام عملیات حرارتی دسترسی آزمایشگاهی بیشتر به این قطعه نسبت به نمونه دیگر بود. برای انجام فرآیند عملیات حرارتی از کوره الکتریکی استفاده شد. تعداد ۳ نمونه

در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد برای مدت زمان های ۳۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه قرار داده شد و سپس در محیط آب نمک و یخ کوئنچ شدند. ۶ نمونه در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های ۱، ۲ و ۴ ساعت قرار داده و در محیط های هوا و کوره روشن با دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد سرد شدند. علت تغییر زمان و دمای عملیات حرارتی دستیابی به طیف بیشتری از اندازه دانه بود. فرآیند عملیات حرارتی صورت گرفته بر روی نمونه ها در شکل ۱ آمده است. از هر قطعه عملیات حرارتی شده ۲ نمونه در ابعاد استاندارد ۱ سانتی متر مربع و ضخامت ۰/۵ سانتی متر برای تست های خوردگی، عکس برداری الکترونی برش داده شد.



شکل ۱- روند عملیات حرارتی و نام گذاری نمونه ها

تست ۳ مرتبه تکرار شد و برای اندازه گیری پتانسیل مدار باز و تعادل قبل از هر تست به مدت ۲۰۰۰ ثانیه زمان داده شد. نتایج حاصل توسط نرم افزار ZView و نرم افزار همراه دستگاه اتولب (Auto Lab software) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

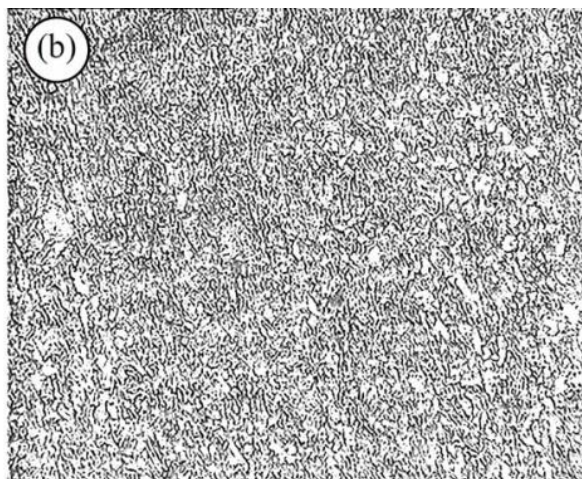
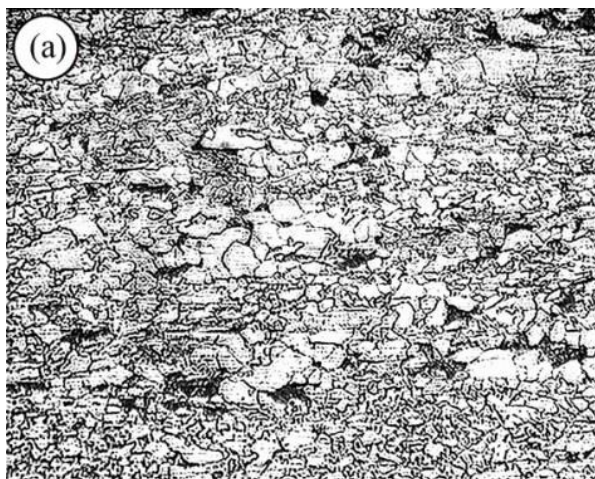
۳- نتایج و بحث

۳-۱- میکروساختار و اندازه دانه

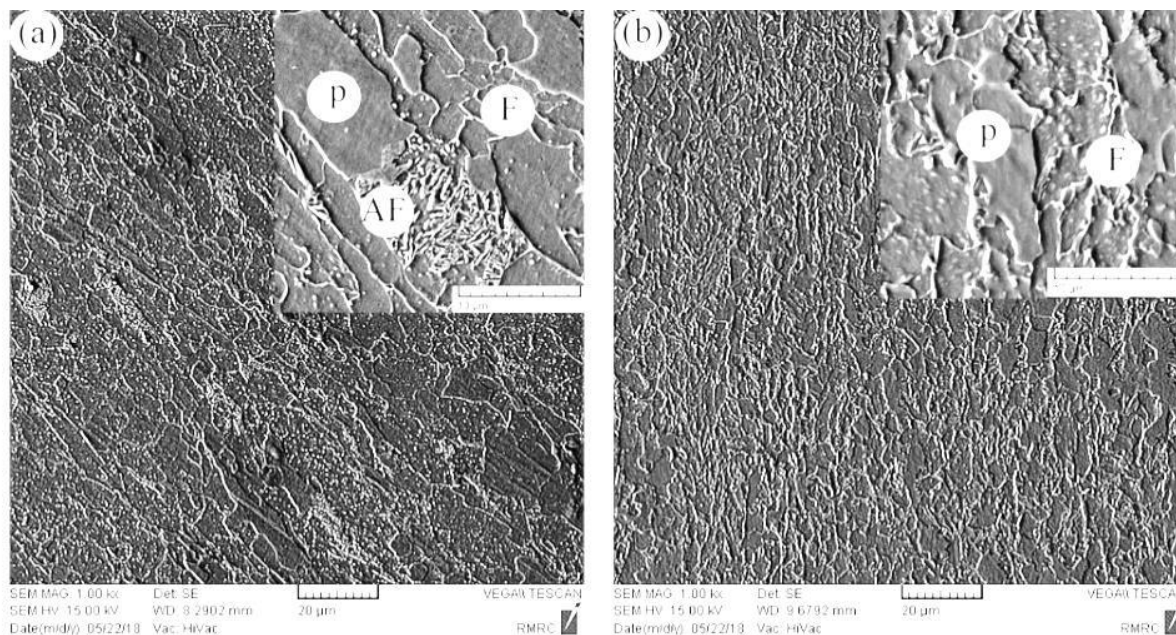
شکل ۲ و ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی و نوری نمونه های اولیه ی تولید شده توسط فرآیند ترمومکانیکال را نشان می دهد؛ که دارای ساختار فریتی (F) و پرییتی (P) و فریت سوزنی (AF) بوده و تفاوت در اندازه دانه در دو فولاد قابل مشاهده است. با آستنیت شدن قطعات در دمای بالا و سرد شدن آهسته در در کوره ساختار های فریت پلی گونال (PF) و بینیت دانه ای (GB) به وجود آمده است (شکل ۴). که با افزایش زمان عملیات حرارتی اندازه دانه های فریت افزایش یافته است اما تغییر محسوسی در سایز دانه های بینیت مشاهده نشده است.

از میکروسکوپ الکترونی و نوری و نرم افزار MIP Cloud برای بررسی و تعیین دقیق اندازه دانه استفاده شد. نمونه های خوردگی پس از اتصال سیم مسی رابط، به طوری که فقط یک سطح در معرض محیط خورنده قرار گیرد توسط مانت سرد سه جزئی پوشانده شدند و سپس سطح نمونه ها با سمبادهای ۱۲۰ تا ۲۰۰۰ و پولیش میکرونی توسط نمده به خوبی آماده سازی و قبل از انجام تست های خوردگی سطح نمونه ها با اتانول و آب مقطر به منظور زدودن آلودگی و چربی شست و شو داده شدند.

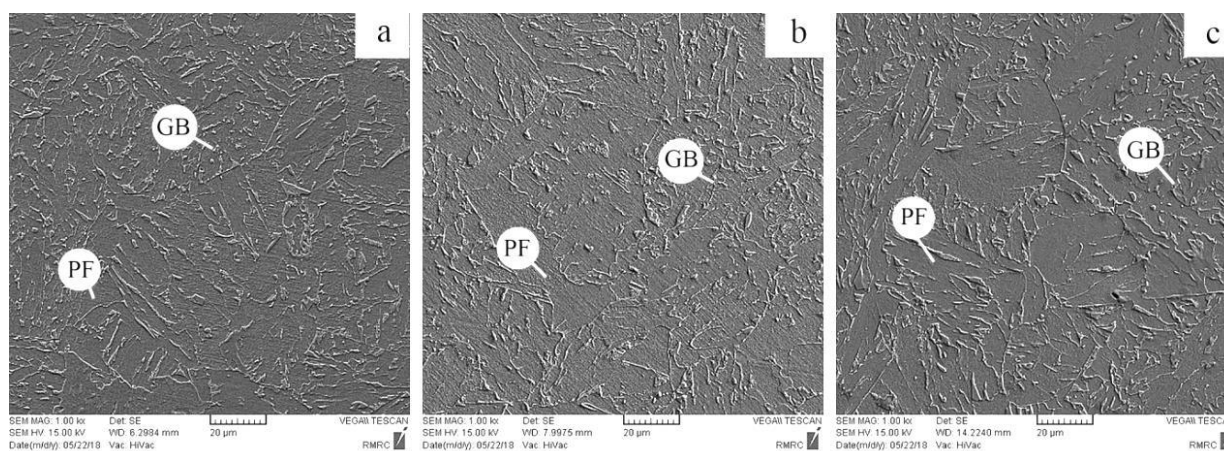
از آزمون های پلاریزاسیون خطی تافل و امپدانس الکتروشیمیایی توسط دستگاه Auto Lab Model PGSTAT 302N برای بررسی رفتار خوردگی در محیط شبیه سازی شده خاک با ترکیب شیمیایی آورده شده در جدول ۳ استفاده شده است. در این آزمایش از سیستم سه الکترودی با الکتروود مرجع کالومل و الکتروود کمکی پلاتین استفاده شد. آزمون پلاریزاسیون خطی با توجه به پتانسیل مدار باز در محدوده $-V3/0$ تا $-V9/0$ با نرخ جاروب 1 mv/s و آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در بازه فرکانس بین 100 kHz تا 1 mHz با دامنه $\pm 10 \text{ mv}$ انجام شد. هر



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری (a) میکروساختار مربوط به نمونه ۲۶۴۷ (b) میکروساختار مربوط به نمونه ۲۶۳۰



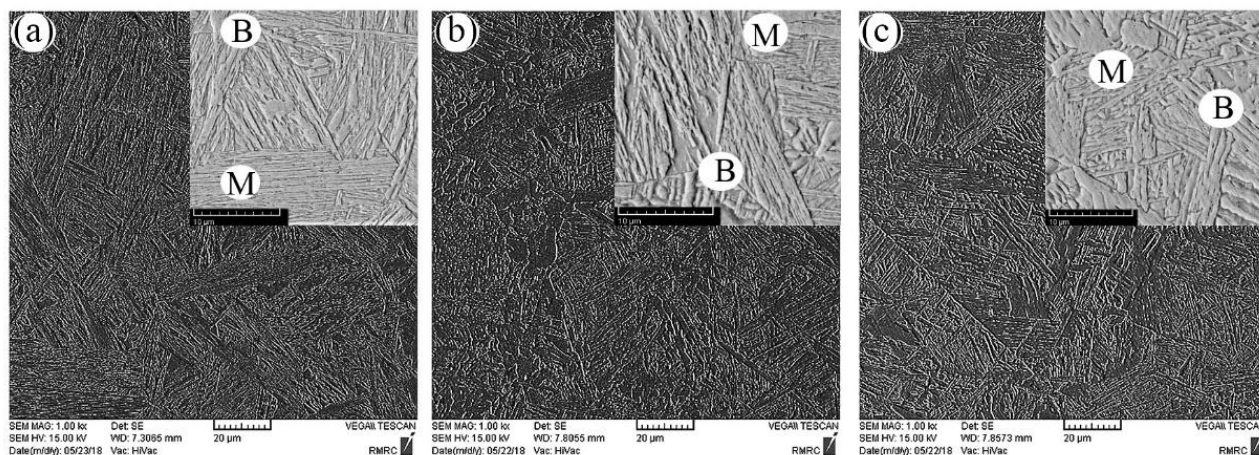
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) میکروساختار مربوط به نمونه ۲۶۴۷ (b) میکروساختار مربوط به نمونه ۶۵۳۰



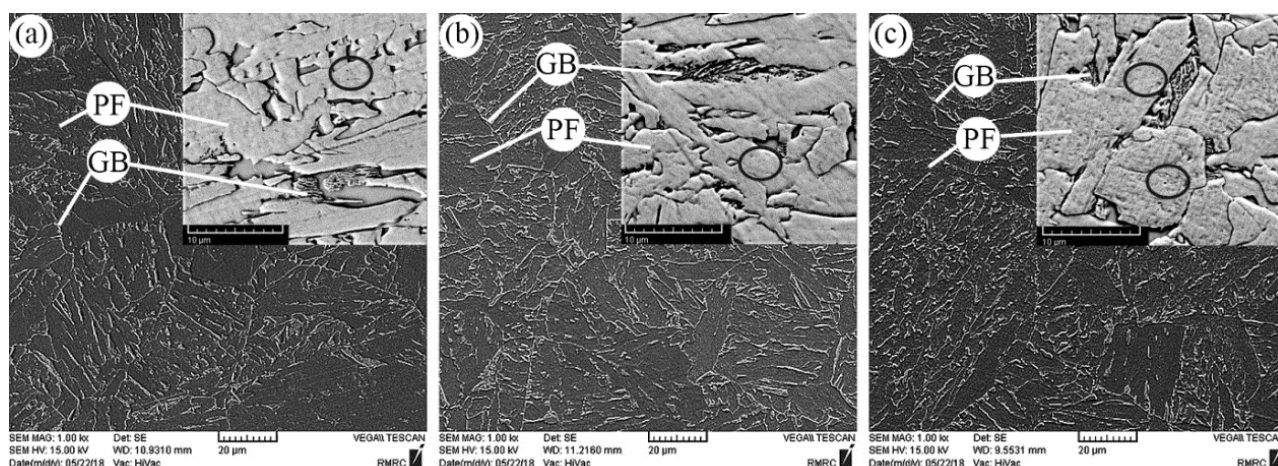
شکل ۴ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه های آنیل شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های a، ۱ ساعت، b، ۲ ساعت، c، ۴ ساعت

گذاری ساختارها در این آزمایش بر اساس تحقیقات پیشین و مراجع دیگر صورت گرفته است [۳۳، ۳۴]. اندازه دانه های فریت با افزایش زمان عملیات حرارتی بزرگ تر شده است. همچنین حضور یکنواخت از عناصر آلیاژی و ناخالصی ها با روند افزایش دما بیشتر شده است.

ریز ساختار بدست آمده از سرد شدن نمونه ی ۶۵۳۰ در آب نمک و یخ، شامل ساختار مارتزیتی و بینیتی بوده که در شکل ۵ آمده است. شکل ۶ ریز ساختار نمونه ها بعد از حرارت دهی و خنک سازی در هوا را نشان می دهد که ساختار فریت پلی گونال (PF) و بینیت دانه ای (GB) قابل تشخیص است. نام



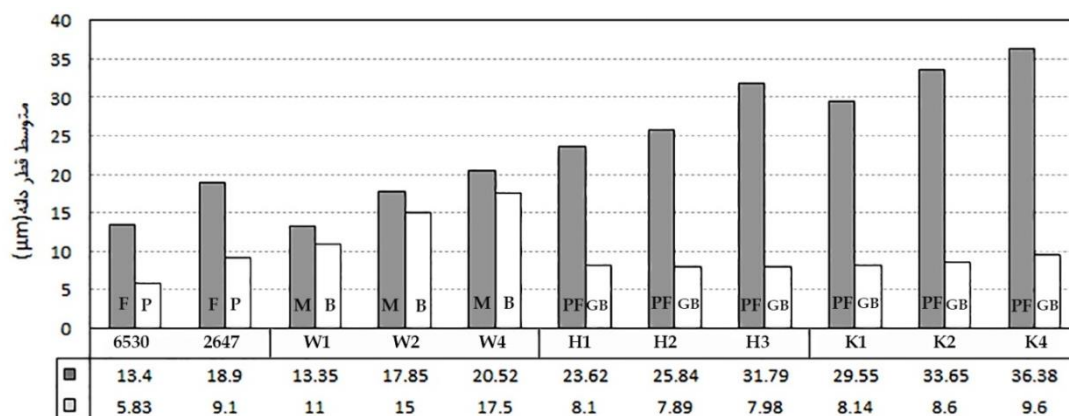
شکل ۵ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه های عملیات حرارتی شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های (a) ۳۰ دقیقه (b) ۹۰ دقیقه (c) ۱۲۰ دقیقه و سرد شده در آب نمک و یخ



شکل ۶ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه های نرماله شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های (a) ۱ ساعت - (b) ۲ ساعت - (c) ۴ ساعت

میکرو آلیاژی بودن این فولاد تغییرات اندازه دانه قابل توجه نیست. در نمونه های ۶۵۳۰ و ۲۶۴۷ اندازه دانه های فریت و در نمونه های H و K اندازه دانه ای فریت پلی گونال ملاک بررسی خوردگی قرار گرفته است. در نمونه های کوئنچ شده اندازه بسته های مارتنزیت مد نظر بوده است.

قطر متوسط دانه های اندازه گیری شده با نرم افزار طبق استاندارد ASTM-E112 در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه بررسی اندازه دانه با افزایش زمان حرارت دهی اندازه دانه های فریت پلی گونال در نمونه های H و K افزایش یافته است اما تغییرات دانه های بینیت قابل توجه نبوده است. به دلیل



شکل ۲- جدول متوسط اندازه دانه اندازه گیری شده برای قطعات مورد آزمایش توسط نرم افزار
Microstructural Image Processing

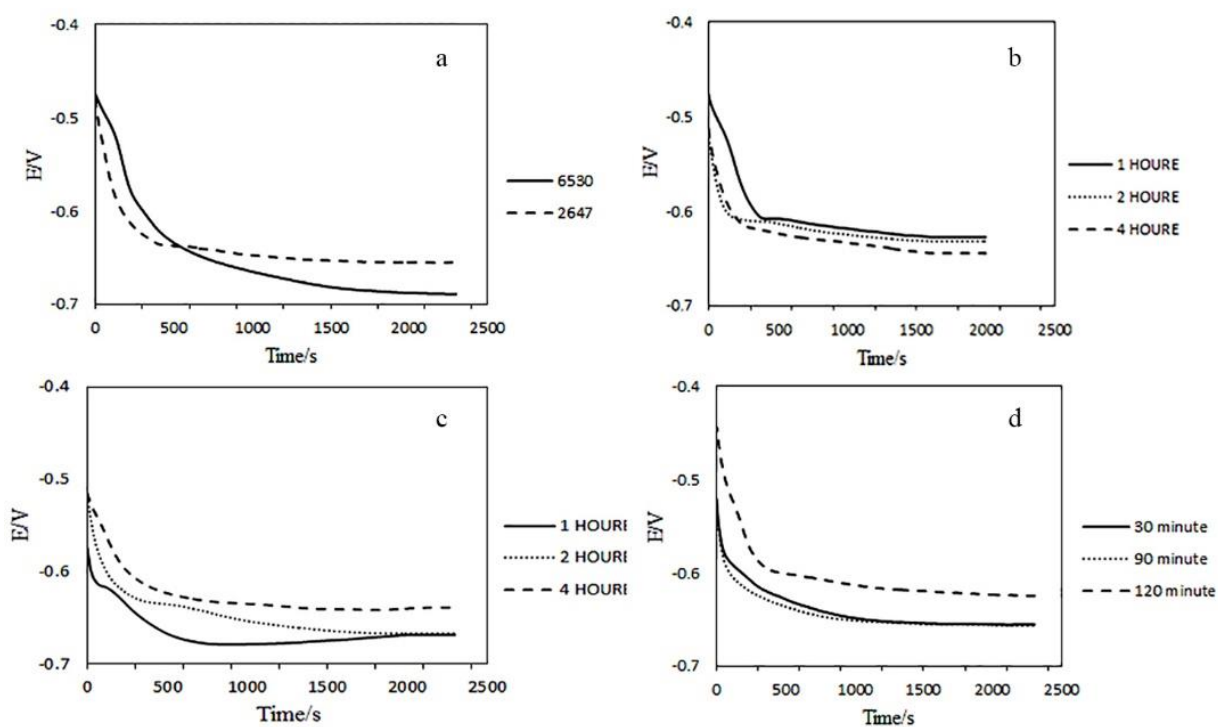
[۳۶، ۳۷]. هرچه این پتانسیل در محدوده مثبت تری قرار گیرد، فولاد رفتار خوردگی بهتری را از خود نشان می دهد [۳۸]. اما برای نمونه های سرد شده در هوا رفتاری عکس مشاهده شده است به طوری که با افزایش زمان عملیات حرارتی نمودار در جهت منفی پتانسیل انتقال یافته است. که بیانگر کاهش پایداری لایه اکسیدی تشکیل شده با افزایش اندازه دانه است.

نمودار تافل قطعات مورد آزمایش واکنش خوردگی از نوع نفوذی را نشان می دهد. که چگالی جریان با افزایش پتانسیل به آرامی زیاد می شود. کنترل نمودار تافل از نوع نفوذی غیر ایده آل است و در این حالت نمی توان چگالی جریان خوردگی را به طور دقیق بدست آورد و تنها می توان آن را تخمین زد.

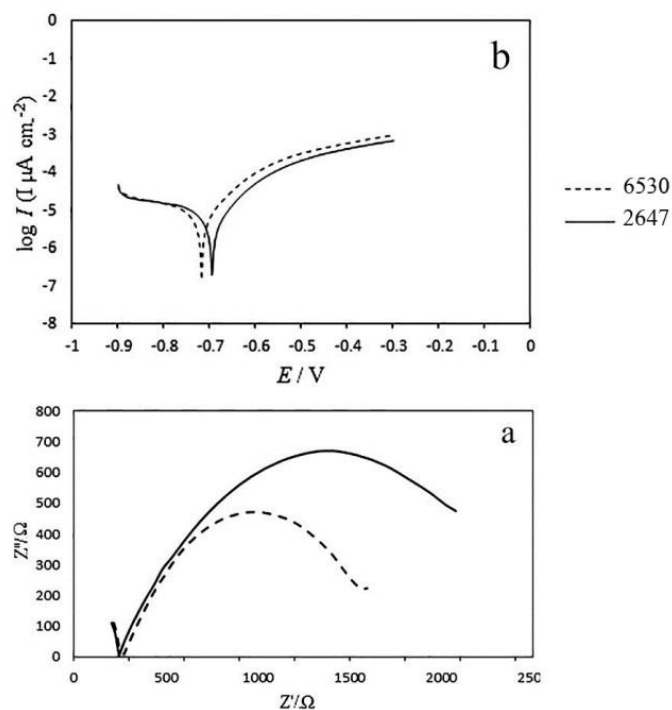
شکل ۹ نمودار پلاریزاسیون خطی و امپدانس الکتروشیمیایی نمونه های ۲۶۴۷ و ۶۵۳۰ را نشان می دهد. با توجه به تحلیل شیب تافلی، جریان خوردگی ساختار دانه ریز و دانه درشت به ترتیب ۳/۴۰۳ و ۳/۰۱۲ میکرومتر بوده است و همچنین نیم دایره نایکوست نمونه درشت دانه مقاومت بیشتری را نشان می دهد که بیان کننده رفتار خوردگی بهتر نمونه درشت دانه نسبت به نمونه ریز دانه می باشد.

۲-۳- آزمون های الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون خطی

در این تحقیق با توجه به انجام ۳ فرآیند متفاوت، اندازه دانه های بدست آمده از هر فرآیند به طور جداگانه مورد مقایسه قرار گرفته است. رفتار پتانسیل مدار باز-زمان برای فولاد مورد آزمایش در محیط شبیه سازی شده خاک در شکل ۸ نشان داده شده است. با قرار گیری یک فلز در الکترولیت پتانسیل مدار باز تغییر خواهد کرد [۳۵] و برای این فولاد پتانسیل با گذشت زمان کاهش یافته است و بعد از مدت زمان در حدود ۳۵ دقیقه در محدوده $\pm 0.05 / -0.65$ ولت به حالت پایدار رسیده است. این مدت زمان، برای تشکیل لایه اکسید بر روی سطح و تبدیل آن به دولایه الکتریکی نیاز است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در صورتی که بر روی سطح فلز لایه روئین یا پسیو تشکیل شود پتانسیل مدار باز با گذشت زمان افزایش می یابد و در صورتی که تشکیل لایه اکسیدی متخلخل تشکیل شود این پتانسیل کاهش می یابد [۳۵]. با افزایش زمان عملیات حرارتی و افزایش اندازه دانه در این محیط همان طور که در شکل مشاهده می شود، نمودار در جهت مثبت پتانسیل انتقال یافته است. این امر نشان دهنده ی پایداری بیشتر لایه اکسید تشکیل شده بر روی سطح می باشد.



شکل ۸- نمودار پتانسیل صفر a، برای نمونه های ۲۶۴۷ و ۶۵۳۰، b، نمونه های عملیات حرارتی شده و سرد شده در هوا c، عملیات حرارتی شده و سرد شده در کوره d، عملیات حرارتی شده و سرد شده در آب نمک و یخ



شکل ۹- a، نمودار نایکوست b، نمودار تافل مربوط به نمونه های ۲۶۴۷ و ۶۵۳۰

ماده پلی کریستال در یک الکترولیت با دو pH متفاوت مشاهده شد که با کاهش اندازه دانه در $pH=1$ ، این ماده رفتار خوردگی بهتری را نسبت به $pH=6$ از خود نشان داده است. به طوری که این ماده در $pH=1$ رفتار پسیو و در $pH=6$ رفتار اکتیو از خود نشان داده است [۴۲ و ۴۳].

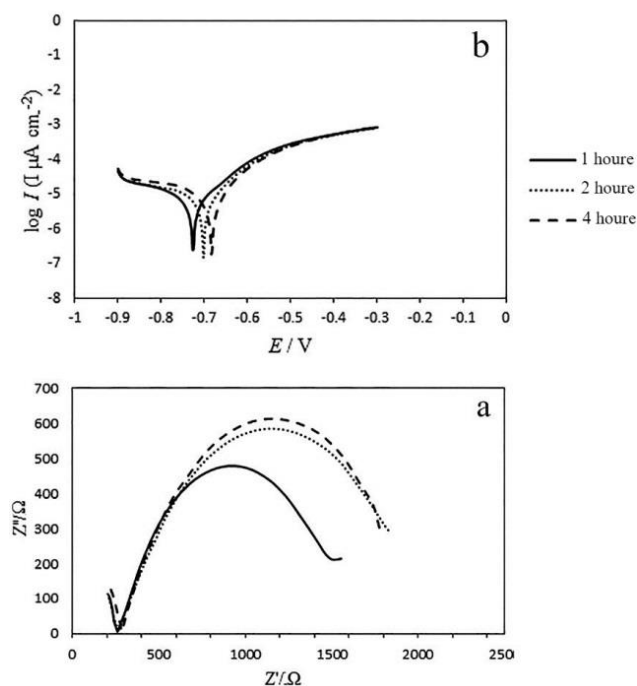
نتایج آنالیز الکتروشیمیایی نمونه آنیل شده در شکل ۱۰ آمده است. در این آزمایش با توجه به نمودار نایکوست، مقاومت فلز با افزایش زمان عملیات حرارتی افزایش یافته است و همچنین داده های نمودار نایکوست نیز نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون خطی را تایید می کند. با افزایش اندازه پتانسیل خوردگی روند صودی داشته و نمودار به سمت راست یعنی مثبت نمودار انتقال یافته است.

تحلیل نتایج پلاریزاسیون بروی یک فولاد در الکترولیت یکسان نشان می دهد که کاهش اندازه دانه ممکن است باعث تشدید واکنش های خوردگی نسبت به نمونه درشت دانه شود [۲۹، ۳۰، ۴۳، ۴۴]. این در حالی است که در بعضی مقالات رفتار عکس گزارش شده است که این امر را می توان به دلیل وجود تنش های پسماند در حین فرآیند ساخت و تولید توجیه کرد [۲۷، ۳۱]. در تحقیق صورت گرفته بر روی فولاد زنگ نزن در محیط سدیم کلرید وجود تنش های پسماند سبب افزایش نرخ خوردگی شده است؛ با این حال بعد از فرآیند آنیل و درشت شدن ساختار مقاومت به خوردگی بهبود چشم گیری داشته است [۴۵ و ۴۶].

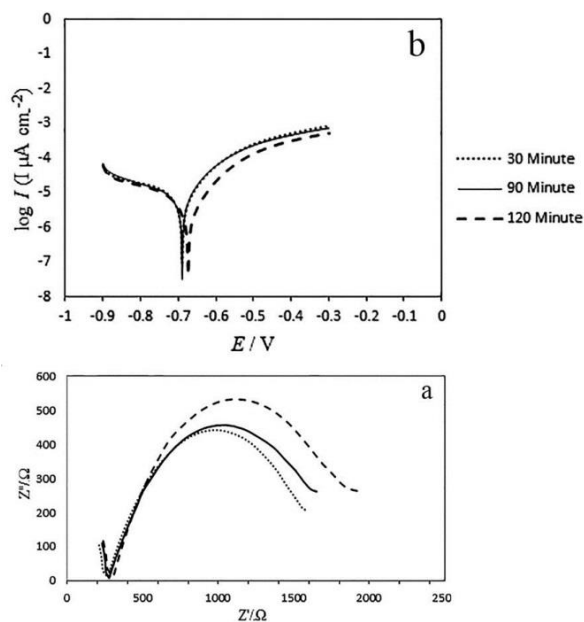
نتایج آزمون الکتروشیمیایی برای نمونه های کونچ شده (شکل ۱۱) بهبود رفتار خوردگی را با افزایش اندازه دانه و زمان عملیات حرارتی نشان می دهد. تغییرات نمودار تافلی برای نمونه ۳۰ و ۹۰ دقیقه تغییر محسوسی را نشان نمی دهد اما با افزایش زمان می توان کاهش جریان خوردگی و افزایش مقاومت فلز با توجه به نمودار نایکوست را مشاهده کرد. روند تغییرات در شاخه کاتدی نمودار ۱۲۰ دقیقه محسوس تر بوده و در این زمان نسبت به زمان های دیگر جریان خوردگی کاهش بیشتری یافته است.

فرآیند های ترمومکانیکالی که به منظور ریز کردن ساختار استفاده می شود، تنش های فشاری و تغییر نابجایی ها را به دنبال دارد که می تواند اثرات متنوعی بر روی رفتار خوردگی فلز داشته باشد [۲۳]. اگر چه کاهش تابع کار و افزایش نرخ نفوذ می تواند تشکیل لایه پسیو را در یک موقعیت خاص بهبود بخشد اما وجود تنش و کرنش های زیر لایه ای باعث ایجاد ترک و عیوب در فیلم پسیو می شود که تاثیر مثبت افزایش دانسیته ی مرز دانه ها را خنثی می کند [۲۳]. همچنین تحلیل نمودار پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ تولید شده توسط روش SMAT در محلول ۰/۱ مولار سدیم کلرید، افزایش جریان آندی و عدم وجود منطقه ی غیر فعال را نشان می دهد که در مقایسه با نمونه ی ساده نرخ خوردگی بیشتر بوده است [۳۱]. در بررسی صورت گرفته بر روی فولاد کم کربن ریزدانه شده توسط عملیات ساچمه زنی، نرخ خوردگی نسبت نمونه درشت دانه در محیط $H_2SO_4-NaSO_4$ افزایش یافته است [۳۰].

رفتار الکتروشیمیایی یک فلز از تعامل بین محیط و سطح در معرض محیط خورنده مورد بررسی قرار می گیرد. فلز در یک الکترولیت می تواند رفتار اکتیو، پسیو و یا حالتی بینابین از خود نشان دهد. ادعا می شود که کاهش اندازه دانه به علت افزایش پایداری لایه پسیو سبب بهبود رفتار خوردگی می شود [۳۹-۴۲]. اما در این فولاد و با توجه به محیط فیلم اکسیدی تشکیل شده، نمونه ریز دانه نسبت به درشت دانه پایداری کمتری را از خود در برابر خوردگی نشان داده است. در صورت اکتیو بودن رفتار فلز، کاهش اندازه دانه سبب فعالیت بیشتر سطح می شود و در صورتی که رفتار پسیو مشاهده شود، ریز شدن ساختار سبب پایداری فیلم اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح و افزایش مقاومت به خوردگی می شود [۲۳]. با توجه به نمودار های پتانسیل مدار باز- زمان رفتار فولاد مورد آزمایش در محیط خاک اکتیو بوده است که بیانگر پایداری کمتر لایه اکسیدی تشکیل شده با کاهش اندازه دانه می باشد. در تحقیق صورت گرفته بر روی یک



شکل ۱۰- a، نمودار نایکوست b، نمودار تافل مربوط به نمونه های آنیل شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های ۱، ۲ و ۴ ساعت



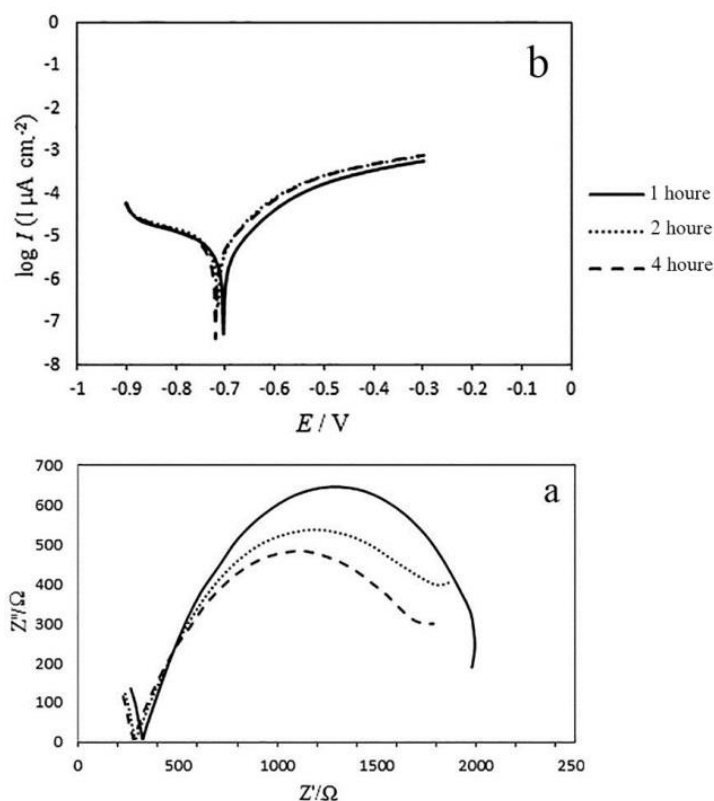
شکل ۱۱- a، نمودار نایکوست b، نمودار تافل مربوط به نمونه های حرارت داده شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و سرد شده در آب نمک و یخ در مدت زمان های ۳۰ و ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه

رفتاری عکس خواهد داشت. به گفته بعضی از محققان در کنار سنیتیک رشد سریع، دانسته ی بالای مرزدانه ها سبب افزایش چسبندگی مکانیکی نیز شده است [۵۰]. اما با این حال افزایش واکنش پذیری سطح با افزایش دانسته ی مرزدانه ها سبب افزایش مناطق شروع خوردگی می شود [۵۱].

شکل ۱۲ نتایج نمونه های سرد شده در هوا را نشان می دهد. بر خلاف نتایج حاصل از آزمایشات قبلی در این بررسی رفتاری عکس مشاهده شد. به طوری که با افزایش زمان آستنیه شدن دانسته جریان خوردگی افزایش یافته و آزمون امپدانس الکتروشیمیایی کاهش مقاومت را با افزایش اندازه دانه نشان می دهد. که بیانگر افزایش نرخ خوردگی با افزایش اندازه دانه می باشد. این امر را می توان به دلیل جدا سازی ناخالصی ها در مرز دانه ها و ایجاد مناطق حساس به خوردگی عنوان کرد.

از دیدگاه متالورژیکی مرز دانه ها به عنوان مکانهای فعال دارای انرژی بیشتری نسبت به بالک ماده بوده [۴۷] و ریز دانه شدن باعث افزایش مرزدانه ها و اتصالات سه گانه می شود [۴۸]. این امر سبب افزایش واکنش پذیری بیشتر سطح با افزایش فعالیت الکترون ها، کاهش نظم اتمی و افزایش نفوذ می شود [۴۹]. کاهش تابع کار الکترونی و افزایش نرخ انتقال بار را به همراه خواهد داشت.

پالومبو^۸ و همکارانش در تحقیقی ثابت کردند که تعداد اتم ها در موقعیت های بین دانه ای برای یک ماده ی ریز دانه بیشتر از ماده ی درشت دانه می باشد [۴۸]. با توجه به مطالب گفته شده کاهش اندازه دانه با افزایش واکنش پذیری سطح باعث افزایش سرعت تشکیل فیلم اکسیدی بر روی سطح می شود. در صورتی که این فیلم اکسیدی رفتار پسو داشته باشد سبب بهبود رفتار خوردگی می شود در غیر این صورت



شکل ۱۲- a، نمودار نایکوست b، نمودار تافل مربوط به نمونه های نرماله شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان های ۱، ۲ و ۴ ساعت

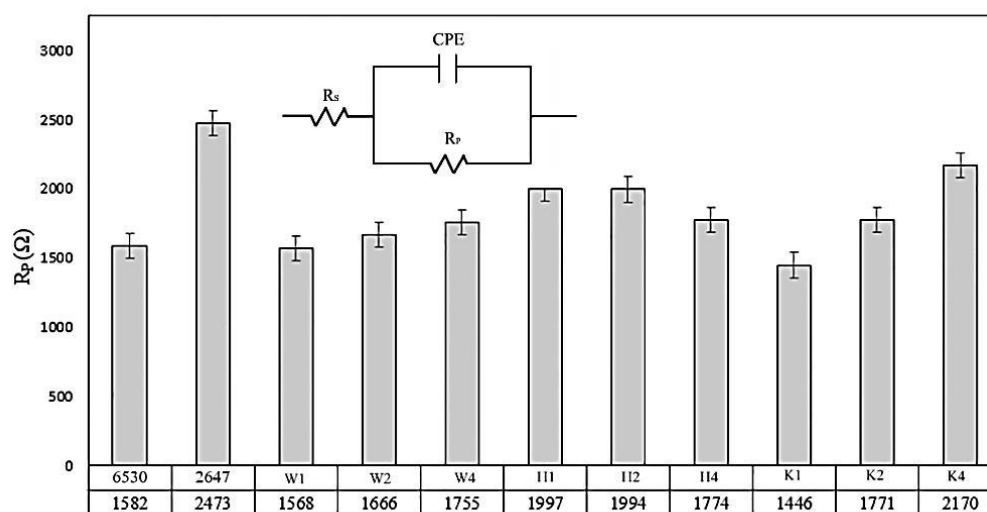
جداسازی ناخالصی و یا وجود گرا دیان مشخص از عناصر آلیاژی ناشی از عملیات حرارتی می تواند سبب حساسیت فلز در مقابل حملات موضعی شود و وجود غلظت های کم از ناخالصی می تواند تخریب های بزرگی در مرز دانه ها به وجود آورد [۵۲-۵۴]. از دیدگاه خوردگی تاثیر جداسازی ناخالصی ها مانند حساسیت می باشد. فرآیندهای صورت گرفته به منظور ریز دانه کردن ساختار سبب کاهش اثرات مضر جداسازی ناخالصی در مرز دانه ها می شود [۴۰]. عملیات حرارتی صورت گرفته بعد از این فرآیند به منظور کاهش تنش های پسماند منجر به جدایش در مرز دانه ها می شود. اما در صورت انتخاب سیکل عملیات حرارتی مناسب؛ به وسیله پیدایش راه های نفوذ سریع اثرات مضر آن تا حدودی جبران می شود.

نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون خطی در جدول ۴ آورده شده است. همان طور که گفته شد با توجه به کنترل نفوذی غیر ایده آل واکنش خوردگی چگالی جریان از برون یابی شاخه آندی و کاتدی در پتانسیل مدار باز تخمین زده شده است. رفتار خوردگی هر گروه از قطعات عملیات حرارتی

شده به صورت جداگانه بررسی شده است. نرخ خوردگی نمونه های درشت دانه بر اساس دانسیته جریان خوردگی کمتر از نرخ خوردگی نمونه های ریز دانه است. این امر در نمونه های سرد شده در کوره و آب نمک و یخ و همچنین نمونه های اولیه قابل مشاهده است. در نمونه های نرماله شده دانسیته جریان خوردگی با افزایش اندازه دانه افزایش یافته است. شکل ۱۳ نتایج حاصل از تست امپدانس الکتروشیمیایی توسط نرم افزار ZView را نشان می دهد. در این شکل روند تغییرات مقاومت پلاریزاسیون را برای نمونه های مورد آزمایش نشان داده شده است. در مدار معادل آورده شد در شکل RS، RP و CEP به ترتیب بیان گر مقاومت محلول، مقاومت پلاریزاسیون و ثابت المان فازی مربوط به ظرفیت خازن دولایه الکتریکی و مقاومت انتقال بار واکنش انحلال می باشد. نتایج نشان می دهد که در نمونه های اولیه، W و K مقاومت پلاریزاسیون با افزایش اندازه دانه افزایش یافته است که بیانگر افزایش مقاومت سطح فلز در مقابل انتقال بار و بهبود رفتار خوردگی است. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نتایج حاصل از تست پلاریزاسیون خطی را تایید می کند.

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون خطی مورد آزمایش

شماره نمونه	I_{corr} $\mu A.cm^{-2}$	B_c (V/dec)	B_a (V/dec)	E_{corr} (V)	R_p ($H\Omega.cm^{-2}$)	C.R (mpy)
۶۵۳۰	۳/۴	۰/۰۶۶	۰/۰۹۱	-۰/۷۱۸	۷/۶۱۹	۱/۵۳۳۸
۲۶۴۷	۳/۰۱۲	۰/۰۵۶	۰/۰۷۲	-۰/۶۹۵	۵/۸۲	۱/۳۵۸۷
W1	۲/۸	۰/۰۵۸	۰/۰۸۱	-۰/۶۹	۵/۶۹	۱/۲۶۳۱
W2	۲/۷۳۲	۰/۰۵۲	۰/۰۷۱	-۰/۶۹	۵/۸۴۸	۱/۲۳۲۴
W4	۱/۳۲۹	۰/۰۵۵	۰/۰۶۲	-۰/۶۷۴	۱۱/۰۷	۰/۵۹۹۳
H1	۱/۱۱۶	۰/۰۴۴	۰/۰۳۷	-۰/۷۰۳	۶/۳۷۷	۰/۵۰۳۴
H2	۱/۹۹۴	۰/۰۴۴	۰/۰۵	-۰/۷۱۵	۴/۷۸۳	۰/۸۹۹۵
H4	۲/۱۹۴	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	-۰/۷۲	۶/۶۹۹	۰/۹۸۹۷
K1	۲/۹۸۳	۰/۰۷۱	۰/۰۸۶	-۰/۷۲۶	۸/۸۷	۱/۳۴۵۷
K2	۲/۶۰۱	۰/۰۵۶	۰/۰۶۸	-۰/۷۰۲	۶/۳۰۵	۱/۱۷۳۳
K4	۲/۱۴۳	۰/۰۷۶	۰/۰۶۲	۰/۶۸۳	۵/۴۴	۰/۹۶۶۷



شکل ۱۳- روند تغییرات مقاومت پلاریزاسیون حاصل از تست امپدانس الکتروشیمیایی

نتیجه گیری

- با توجه به نتایج پلاریزاسیون خطی در نمونه های ۲۶۴۷ و ۶۵۳۰ با افزایش اندازه دانه های فریت از ۱۳/۴ به ۱۸/۶ میکرومتر نرخ خوردگی از ۱/۵۳ mpy به ۱/۳۵ mpy کاهش یافته است.
- افزایش اندازه دانه های فریت پلی گونال در نمونه های آنیل شده در محدوده ی ۲۹/۵۵ تا ۳۶/۳۸ میکرومتر نرخ خوردگی را از ۱/۳۵ mpy به ۰/۹۶ mpy کاهش داده است.
- افزایش زمان عملیات حرارتی برای نمونه سرد شده در آب نمک و یخ باعث کاهش دانسیته جریان خوردگی از ۲/۸ به ۲/۸ $\mu\text{A.cm}^{-2}$ و افزایش مقاومت پلاریزاسیون سطح فلز شده است.
- نتایج حاصل از پلاریزاسیون خطی و امپدانس الکتروشیمیایی نشان می دهد که افزایش اندازه دانه از ۲۳/۶۲ به ۳۱/۷۹ میکرومتر برای نمونه های سرد شده در هوا باعث افزایش نرخ خوردگی شده است.
- افزایش زمان عملیات حرارتی در نمونه های نرماله شده باعث افزایش دانسیته جریان خوردگی شده است که این امر می تواند به سبب وجود گرا دیان مشخص از عناصر آلیاژی و ناخالصی ها باشد.

مراجع

- [1] Yakubtsov, I., P. Poruks, and J. Boyd, *Microstructure and mechanical properties of bainitic low carbon high strength plate steels*. Materials Science and Engineering: A, 2008. 480(1-2): p. 109-116.
- [2] Hwang, B. and C.G. Lee, *Influence of thermomechanical processing and heat treatments on tensile and Charpy impact properties of B and Cu bearing high-strength low-alloy steels*. Materials Science and Engineering: A, 2010. 527(16-17): p. 4341-4346.
- [3] Natividad, C., et al., *Mechanical and Metallurgical Properties of Grade X70 Steel Linepipe Produced by Non-conventional Heat Treatment*, in *Characterization of Metals and Alloys*. ۲۰۱۷, Springer. p. ۳-۱۱.
- [4] Duan, L.-N., et al., *Austenite grain growth behavior of X80 pipeline steel in heating process*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010. 17(3): p. 62-66.
- [5] BOTT, I., S. KOJIMA, and M. SAMPAIO, *The Development of API 5L X80 Steel For Pipeline Productions by the TMCR Process*. T&B Petroleum, Rio de Janeiro, 2003(15): p. 68-70.

- [6] Lin, Y., et al., *Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel*. Acta Materialia, ۲۰۰۶. ۵۴(۲۰): p. ۵۵۹۹-۵۶۰۵.
- [7] Tao, N., et al., *An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment*. Acta materialia, 2002. 50(18): p. 4603-4616.
- [8] Wang, T., J. Yu, and B. Dong, *Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of Cr18Ni9Ti stainless steel*. Surface and Coatings Technology, 2006. ۲۰۰(۱۶-۱۷): p. ۴۷۷۷-۴۷۸۱.
- [9] Liu, G., J. Lu, and K. Lu, *Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening*. Materials Science and Engineering: A, 2000. ۲۸۶(۱): p. 91-95.
- [10] Wu, X., et al., *Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP*. Acta materialia, 2002. 50(8): p. 2075-2084.
- [11] Sha, Q. and Z. Sun, *Grain growth behavior of coarse-grained austenite in a Nb-V-Ti microalloyed steel*. Materials Science and Engineering: A, 2009. 523(1-2): p. 77-84.
- [12] Sha, Q.-y., et al., *A new route for identification of precipitates on austenite grain boundary in an Nb-V-Ti microalloyed steel*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011. 18(8): p. 53-57.
- [13] Klein, M., et al. *Thermomechanically hot rolled high and ultra high strength steel grades-processing, properties and application*. in *Materials Science Forum*. 2005. Trans Tech Publ.
- [14] Hossain Seikh, A., et al., *Austenite grain growth kinetics in API X65 and X70 line-pipe steels during isothermal heating*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. 2014.
- [۱۵] محمدیان راد، رضا؛ منصور فرزام و اسلام پوربندری، ۱۳۹۲، بررسی ترک حاصل از خوردگی القایی هیدروژنی (HIC) در فولاد خط لوله API X70، چهاردهمین کنگره ملی خوردگی، تهران، انجمن خوردگی ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [16] Hall, E., *The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results*. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1951. 64(9): p. 747.
- [17] Petch, N.J., *The cleavage strength of polycrystals*. J. of the Iron and Steel Inst., 1953. 174: p. 25-۲۸.
- [18] Birbilis, N., M.X. Zhang, and Y. Estrin. *Surface grain size effects on the corrosion of magnesium*. in *Key Engineering Materials*. 2008. Trans Tech Publ.
- [19] Mahmoud, T., *Effect of friction stir processing on electrical conductivity and corrosion resistance of AA6063-T6 Al alloy*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008. 222(7): p. 1117-1123.
- [20] Hoseini, M., et al., *Comparative effect of grain size and texture on the corrosion behaviour of commercially pure titanium processed by equal channel angular pressing*. Corrosion Science, ۲۰۰۹. ۵۱(۱۲): p. ۳۰۶۴-۳۰۶۷.
- [21] Liu, K.T. and J.G. Duh, *Grain size effects on the corrosion behavior of Ni50. 5Ti49. 5 and Ni45. ۶Ti۴۹. ۴Al۵. ۱ films*. Journal of Electroanalytical Chemistry, ۲۰۰۸. ۶۱۸(۱-۲): p. ۴۵-۵۲.
- [22] Barbucci, A., et al., *Corrosion behaviour of nanocrystalline Cu90Ni10 alloy in neutral solution containing chlorides*. Corrosion Science, 1998. 41 (۳): p. 463-475.
- [23] Ralston, K. and N. Birbilis, *Effect of grain size on corrosion: a review*. Corrosion, 2010. 66(7): p. 075005-075005-13.
- [24] Lehto, P., et al., *Characterisation of local grain size variation of welded structural steel*. Welding in the World, 2016. 60(4): p. 673-688.
- [25] Chung, M.-K., et al., *Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys*. Materials Science and Engineering: A, 2004. 366(2): p. 282-291.
- [26] Birbilis, N., et al., *Grain character influences on corrosion of ECAPed pure magnesium*. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2010. 45(3): p. 224-230.
- [27] Wang, S., et al., *Preparation and electrochemical corrosion behavior of bulk nanocrystalline ingot iron in HCl acid solution*. The Journal of Physical Chemistry B, 2005. 109(7): p. 2499-۲۵۰۳.
- [28] Hadzima, B., et al., *Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained interstitial free steel*. Materials Science and Engineering: A, 2007. 462(1-2): p. 243-247.

- [29] Afshari, V. and C. Dehghanian, *Effects of grain size on the electrochemical corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline Fe coatings in alkaline solution*. Corrosion Science, 2009. ۵۱(۸): p. ۱۸۴۴-۱۸۴۹.
- [30] Li, Y., F. Wang, and G. Liu, *Grain size effect on the electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallized low-carbon steel*. Corrosion, 2004. 60(10): p. 891-896.
- [31] HAO, Y.-w., et al., *Effect of surface mechanical attrition treatment on corrosion behavior of 316 stainless steel*. Journal of iron and steel Research, international, ۲۰۰۹. ۱۶(۲): p. ۶۸-۷۲.
- [32] Chen, Y.T. and K.G. Zhang. *Influence of Grain Size on Corrosion Resistance of a HSLA Steel*. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ.
- [33] Alizadeh, M. and S. Bordbar, *The influence of microstructure on the protective properties of the corrosion product layer generated on the welded API X70 steel in chloride solution*. Corrosion Science, 2013. 70: p. 170-179.
- [34] Du, C., et al., *Effects of microstructure on corrosion of X70 pipe steel in an alkaline soil*. Journal of materials engineering and performance, 2009. 18(2): p. 216-220.
- [35] Tait, W., *An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists*, 1994. Chapter. 6: p. 63-77.
- [36] Yue, T., et al., *Excimer laser surface treatment of aluminum alloy AA7075 to improve corrosion resistance*. Surface and Coatings Technology, 2004. 179(2-3): p. 158-164.
- [37] Jinlong, L. and L. Hongyun, *Comparison of corrosion properties of passive films formed on phase reversion induced nano/ultrafine-grained 321 stainless steel*. Applied Surface Science, ۲۰۱۳. ۲۸۰: p. ۱۲۴-۱۳۱.
- [38] Jinlong, L., et al., *Comparison of corrosion behavior between coarse grained and nano/ultrafine grained alloy 690*. Applied Surface Science, 2016 :۳۶۰ .p. 403-408.
- [39] Wang, L., et al., *Electrochemical corrosion behavior of nanocrystalline Co coatings explained by higher grain boundary density*. Electrochimica Acta, 2007. 52(13): p. 4342-4350.
- [40] Cheng, D., et al., *Corrosion properties of nanocrystalline Co-Cr coatings*. Annals of biomedical engineering, 2001. 29(9): p. 803-809.
- [41] Elkedim, O., H. Cao, and P. Fluzin. *Hardness and corrosion performance of nanocrystalline iron powder prepared by ball milling: comparison with different iron obtained by conventional methods*. in *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*. 1999. Trans Tech Publ.
- [42] Zeiger, W., M. Schneider, and H. Worch. *Passivity and pitting corrosion of a nanocrystalline FeAl8-alloy*. in *Materials science forum*. 1998. Trans Tech Publ.
- [43] Zeiger, W., et al., *Corrosion behaviour of a nanocrystalline FeAl8 alloy*. Nanostructured Materials, 1995. 6(5-8): p. 1013-1016.
- [44] Di Schino, A. and J. Kenny, *Effect of grain size on the corrosion resistance of a high nitrogen-low nickel austenitic stainless steel*. Journal of Materials Science Letters, 2002. 21(24): p. 1969-۱۹۷۱.
- [45] Wang, X. and D. Li, *Mechanical, electrochemical and tribological properties of nano-crystalline surface of 304 stainless steel*. Wear, 2003. 255(7-12): p. 836-845.
- [46] Wang, X. and D. Li, *Mechanical and electrochemical behavior of nanocrystalline surface of 304 stainless steel*. Electrochimica Acta, ۲۰۰۲. ۴۷(۲۴): p. ۳۹۳۹-۳۹۴۷.
- [47] Fontana, M.G. and W. Stactile, *Corrosion Science and Technology*. Plenum Press, London , ۱۹۷۰. p. 149.
- [48] Palumbo, G., S. Thorpe, and K. Aust, *On the contribution of triple junctions to the structure and properties of nanocrystalline materials*. Scripta metallurgica et materialia, 1990. 24(7): p. ۱۳۴۷-۱۳۵۰ .
- [49] Splinter, S., et al., *XPS characterization of the corrosion films formed on nanocrystalline Ni-P alloys in sulphuric acid*. Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films, ۱۹۹۶. ۲۴(۳): p. ۱۸۱-۱۸۶.
- [50] Tao, S. and D. Li, *Tribological, mechanical and electrochemical properties of nanocrystalline copper deposits produced by pulse electrodeposition*. Nanotechnology, 2005. 17(1): p. 65.

- [51] Osório, W.R., C.M. Freire ,and A. Garcia, *The role of macrostructural morphology and grain size on the corrosion resistance of Zn and Al castings*. Materials Science and Engineering: A, ۲۰۰۵. ۴۰۲(۱-۲): p. ۲۲-۳۲.
- [52] Ambat, R., N.N. Aung, and W. Zhou, *Evaluation of microstructural effects on corrosion behaviour of AZ91D magnesium alloy*. Corrosion science, 2000. 42(8): p. 1433-1455.
- [53] Ben-Hamu, G., et al., *The relation between microstructure and corrosion behavior of Mg-Y-RE-Zr alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 2007. 431(1-2): (p. 269-276.
- [54] Balyanov, A., et al., *Corrosion resistance of ultra fine-grained Ti*. Scripta Materialia, 2004. ۵۱(۳): p. ۲۲۵-۲۲۹.