

## Research Paper

# Investigation of Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V Alloy Weld Zone Welded by TIG Method

Mehdi Kabiri Laghab<sup>1</sup>, Majid Belbasi<sup>2\*</sup>, Mohamad Amar Mofid<sup>3</sup>

1. MSc graduated of Materials Engineering, Department of Petroleum, Mining and Materials Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Tehran, Iran.
2. Assistant prof. of Materials Engineering, Department of petroleum, mining and materials engineering, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Tehran, Iran.
3. Assistant prof. of Materials Engineering, Department of petroleum, mining and materials engineering, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Tehran, Iran.

Received: 2021/10/26

Revised: 2021/11/25

Accepted: 2021/12/12

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/jnm.2021.24515.1859

### Keywords:

Agriculture, Water well, Conflict perception, Conflict management

### Abstract

**Introduction:** Ti-6Al-4V alloy is one of the most widely used alloys in aerospace, marine and chemical industries. A few research has been done on the corrosion of the weld cross section of this alloy. And NaCl is 3.5%. The aim of this study was to investigate the effect of current intensity on the corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy welded tungsten-neutral gas (TIG) in seawater and 3.5% NaCl solutions

**Methods:** In this research, a sheet of Ti-6Al-4V alloy with dimensions of 40 × 50 × 3 mm and a filler of Ti-6Al-4V alloy were prepared. Then, in order to investigate the effect of current intensity on the corrosion resistance of the weld cross section of this alloy, the prepared samples were weld with current intensities of 70, 80 and 90 amps. In order to observe the microstructure of the samples, first the parts were prepared and micro-etched and then the parts were imaged in the base metal, weld zone and heat affected zone using a light microscope. Potentiostat apparatus was used for electrochemical tests of dynamic potential polarization. In this test by TOEFL method, corrosion potential ( $E_{corr}$ ) and current density ( $i_{corr}$ ) were calculated.

**Findings:** Microstructural studies of the samples showed that the base metal has directional structure of  $\alpha$  phase was in the field of the deformed  $\beta$  phase. In the HAZ region, due to the relatively rapid cooling of the alloy from the high temperature of  $\beta$  transformation, the fine needle  $\alpha$  phase is formed. In the welding area of welded specimens with currents of 80 and 90 amps compared to the specimen of 70 amps, more heat is applied and this has led to more grain growth. with increasing the welding current intensity from 70 to 80 amps, the grain size in the welding area and also the corrosion rate of the welding area has increased and with further increasing the current intensity from 80 amps to 90 amps in the weld zone did not change the grain size and the corrosion rate of the weld zone also decreased. The results showed that the corrosion rate of the weld zone of Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution was higher than seawater. The reason can also be attributed to the higher concentration of NaCl salt in 3.5% NaCl solution compared to seawater. For welding Ti-6Al-4V alloy, using a current of 70 amps has shown better corrosion resistance than the currents of 80 and 90 amps.

**Citation:** Mehdi Kabiri Laghab, Majid Belbasi, Mohamad Amar Mofid, Investigation of Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V Alloy Weld Zone Welded by TIG Method, Quarterly Journal of New Materials. 2021; 12 (44): 1-12.

**\*Corresponding author:** Majid Belbasi

**Address:** Department of petroleum, mining and materials engineering, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Tehran, Iran.

**Tell:** +989125143153

**Email:** dr.belbasi@gmail.com

## Extended Abstract

### Introduction

A few research has been done on the weld zone of Ti-6Al-4V alloy, some of which they are mentioned. Shamanian et al. investigated the corrosion behavior of the weld zone of Ti-6Al-4V alloy in 10% hydrochloric acid solution. As a result of TiG welding process, a structure with coarse needle grains in the weld metal was obtained which contained the needle microstructure of  $\beta + \alpha$ . They stated that the weld metal has a higher corrosion rate than the base metal and the base metal has a higher polarization resistance than the weld metal. In another study conducted by Shamanian et al. about the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution, they concluded that coarseness of weld metal grains causes a sharp decrease in corrosion resistance of the weld zone. Heidar Beigi et al. Investigated the effect of tungsten gas arc welding (GTAW) process on the microstructure and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy welding zone in simulated electrolyte solution, physiological serum. The results of their studies showed that the corrosion resistance of the weld zone compared to the base metal in this solution and at a temperature of 37 °C was severely reduced. In the research conducted by Karimzadeh et al., The effect of preheat and postheat heat treatment on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy was investigated. The results showed that the corrosion behavior of the base metal was better than the HAZ and FZ regions. Heat treatment, especially dissolution and hard deposition, improved the corrosion properties of the weld. The aim of this research was to investigate the effect of current intensity on the corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy welded tungsten-neutral gas (TIG) in seawater and 3.5% NaCl solutions.

### Materials and Methods

For this research, a sheet of Ti-6Al-4V alloy with initial dimensions of 40 ×1000× 1000 mm and a thickness of 3 mm and a filler of Ti-6Al-4V alloy were prepared. Welding was performed in a single-way, two-way, manual manner using a 315 amp tungsten electrode welding machine with DC current and a filler made of Ti-6Al-4V alloy. Argon gas with 99.99% purity was used to protect the welding section. Then, in order to investigate the effect of current intensity on the corrosion resistance of the weld cross section of this alloy, the prepared samples were welded with current intensities of 70, 80 and 90 amps. In order to observe the grain size and microstructure of the samples, first the samples were prepared and micro-etched and then were imaged in the base metal (BM), weld zone (FZ) and heat affected zone (HAZ), by light microscopy. PARSTAT2273 potentiostat device was used for electrochemical tests of dynamic polarization. In this test, two separate glass chambers (with KCl-sat saturated calomel reference electrode, graphite counter electrode and working sample electrode of parts), so that in the first glass chamber, 3.5% NaCl solution electrolyte and the second glass chamber The simulated seawater solution was used. Then, in order to achieve a stable state in the open circuit, the prepared samples of weld zone with currents of 70, 80 and 90 amps were immersed for 30 minutes in each of the electrolytes. In this test by TOEFL method, corrosion potential ( $E_{corr}$ ) and current density ( $i_{corr}$ ) were calculated.

### Findings and Discussion

Microstructural studies of the samples showed that the base metal has a directional structure of  $\alpha$  phase was deformed in the field of the  $\beta$  phase. In the HAZ region, due to the relatively rapid cooling of the alloy from the high temperature of  $\beta$  transformation, the fine needle  $\alpha$  phase is formed. In the weld area of welded specimens with currents of

80 and 90 amps compared to the specimen of 70 amps, more heat is applied and this has led to more grain growth. With increasing welding current intensity from 70 to 80 amps, the grain size in the weld zone and also the corrosion rate of the weld zone in Ti-6Al-4V alloy has increased and with further increasing the current intensity from 80 amps to 90 amps in the weld zone, the grain size There is no change and the corrosion rate of the weld zone has also decreased. Therefore, in comparing the current intensities used for welding Ti-6Al-4V alloy, the use of 70 amp current intensity has shown a more suitable corrosion resistance than the 80 and 90 amp current intensities. Examination of corrosion rate of Ti-6Al-4V alloy weld zone in 3.5% NaCl solution and seawater showed that the corrosion rate of weld zone in 3.5% NaCl solution was higher than seawater. The reason can also be attributed to the higher concentration of NaCl salt in 3.5% NaCl solution compared to seawater.

### Conclusion

With increasing welding current intensity from 70 to 80 amps, the grain size in the welding area and also the corrosion rate of the welding area in Ti-6Al-4V alloy has increased and with further increasing the current intensity from 80 amps to 90 amps in the welding area, the grain size There is no change and the corrosion rate of the weld area has also decreased. Therefore, in comparing the current intensities used for welding Ti-6Al-4V alloy, the use of 70 amp current intensity has shown a more suitable corrosion resistance than the 80 and 90 amp current intensities.

### Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

No funding.

### Authors' contributions

Design experiments and perform: Mehdi Kabiri Laghab, Majid Belbasi.

Results and Data analysis: Mehdi Kabiri Laghab, Majid Belbasi, Mohamad Amar Mofid

Supervision and final writing: Mehdi Kabiri Laghab, Majid Belbasi.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بررسی مقاومت به خوردگی ناحیه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری شده به روش TIG

مهدی کبیری لقب<sup>۱</sup>، مجید بلباسی<sup>۲\*</sup>، محمدعمارمفید<sup>۳</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

## چکیده

**مقدمه:** آلیاژ Ti-6Al-4V از آلیاژهای پرکاربرد در صنایع هوایی، دریایی و شیمیایی می باشد. در ارتباط با خوردگی مقطع جوش این آلیاژ تحقیقات معدودی صورت گرفته است هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر شدت جریان بر مقاومت به خوردگی مقطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری شده به روش تنگستن-گاز خنثی (TIG) در محلول های آب دریا و NaCl ۳/۵ % می باشد.

**روش:** در این تحقیق ورقی از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V به ابعاد ۳×۵×۴۰ mm و فیلر از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V تهیه شد. سپس به منظور بررسی تاثیر شدت جریان بر روی مقاومت به خوردگی مقطع جوش این آلیاژ، نمونه های تهیه شده با شدت جریان های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آمپر جوشکاری شد. به منظور مشاهده ریزساختار نمونه ها، ابتدا نسبت به آماده سازی و میکرو اچ قطعات اقدام شد و در ادامه تصویربرداری از قطعات در منطقه فلز پایه، مقطع جوش و منطقه متأثر از حرارت، با استفاده از میکروسکوپ نوری صورت گرفت. برای آزمونهای الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک، از دستگاه پتانسیواستات استفاده شد. در این آزمون از دو محفظه شیشه ای مجزا (با الکتروود مرجع کالومل اشباع KCl-sat، الکتروود شماره گرافیتی و الکتروود کاری نمونه قطعات)، به طوری که در محفظه شیشه ای اول، الکتروولیت محلول NaCl ۳/۵ % و محفظه شیشه ای دوم، محلول آب دریا شیشه سازی شده استفاده گردید. سپس در شرایط مدار باز به منظور رسیدن به حالت پایداری، نسبت به غوطه وری نمونه های آماده سازی شده از مقاطع جوش با شدت جریان های ۷۰ و ۸۰ و ۹۰ آمپر، به مدت زمان ۳۰ دقیقه در هر یک از الکتروولیت ها اقدام شد. در این آزمون به روش تافل، پتانسیل خوردگی (E<sub>corr</sub>) و دانسیته جریان (i<sub>corr</sub>) محاسبه گردید.

**یافته ها:** بررسی های ریزساختاری نمونه ها نشان داد فلز پایه دارای ساختار جهت دار فاز  $\alpha$  در زمینه فاز  $\beta$  تغییر فرم یافته است. در ناحیه HAZ به دلیل سرد شدن نسبتاً سریع آلیاژ از دمای بالای استحاله  $\beta$ ، فاز  $\alpha$  سوزنی ریز تشکیل شده است. در ناحیه جوش نمونه های جوشکاری شده با شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپر نسبت به نمونه ۷۰ آمپر، حرارت بیشتری وارد شده و این امر منجر به رشد بیشتر دانه ها شده است. با افزایش شدت جریان جوشکاری از ۷۰ به ۸۰ آمپر، اندازه دانه ها در ناحیه جوش و همچنین نرخ خوردگی ناحیه جوش افزایش یافته است و با افزایش بیشتر شدت جریان از ۸۰ به ۹۰ آمپر در ناحیه جوش اندازه دانه تغییر نشان نداده و نرخ خوردگی ناحیه جوش نیز کاهش یافته است. برای جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده از شدت جریان ۷۰ آمپر، مقاومت به خوردگی مناسب تری نسبت به شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپری از خود نشان داده است.

**نتیجه گیری:** بررسی نرخ خوردگی ناحیه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول NaCl ۳/۵ % و آب دریا نشان داد که نرخ خوردگی ناحیه جوش آلیاژ در محلول NaCl ۳/۵ % بیشتر از آب دریا است. دلیل آن را نیز می توان به غلظت بالاتر نمک NaCl در محلول NaCl ۳/۵ % در مقایسه با آب دریا نسبت داد. در مقایسه شدت جریان های به کار برده شده برای جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده از شدت جریان ۷۰ آمپر، مقاومت به خوردگی مناسب تری نسبت به شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپری از خود نشان داده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI: 10.30495/jnm.2021.24515.1859

## واژه های کلیدی:

آلیاژ Ti-6Al-4V، مقاومت به خوردگی، جوشکاری TIG، NaCl ۳/۵ %، آب دریا.

\* نویسنده مسئول: مجید بلباسی

نشانی: گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۵۱۴۳۱۵۳

پست الکترونیکی: dr.belbasi@gmail.com

## مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم دارای خواص مناسبی از جمله استحکام کششی، استحکام خستگی، مقاومت به خوردگی می باشد. در حال حاضر پنجاه درصد از تیتانیوم مورد استفاده در صنایع را آلیاژ Ti-6Al-4V در بر گرفته است و حدود ۸۰ درصد از این میزان به مصارف آن در صنایع هوایی، صنایع بیولوژیک، صنایع دریایی و صنایع شیمیایی اختصاص یافته است (۱، ۲). فرآیندهای جوشکاری به طور گسترده ای برای اتصال قطعات تیتانیومی استفاده می شود. تیتانیوم خالص تجاری و بیشتر آلیاژهای تیتانیوم قابلیت جوشکاری با استفاده از روش های مختلف جوشکاری را دارند. جوشکاری به روش قوس تنگستن تحت گاز محافظ<sup>۱</sup>، جوشکاری قوسی با گاز محافظ<sup>۲</sup> و جوشکاری به روش لیزر<sup>۳</sup> از روشهای متداول برای جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V می باشند (۳-۶). ممکن است یک فلز یا یک آلیاژ در یک محیط نسبت به خوردگی حساس نباشد ولی مقطع جوش آن نسبت به خوردگی حساس باشد. اگر فلز پایه و پرکننده مناسبی برای جوشکاری استفاده شود امکان وقوع شکست ناشی از خوردگی به حداقل خواهد رسید. سیکل سرمایش یا گرمایش ناشی از جوشکاری بر میکرو ساختار، ترکیب سطحی جوش و ترکیب سطحی فلز پایه تاثیر خواهد گذاشت. با توجه به احتمال وقوع میکرو جدایش، رسوب فازهای ثانویه، تشکیل مناطق ترکیب نشده، تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه HAZ، تبخیر عناصر آلیاژی ناحیه جوش و آلوده شدن فلز جوش در حین انجماد، می توان بیان نمود که مقاومت به خوردگی مقاطع جوش تا حدودی زیادی به خواص فلز پایه وابسته است. تغییرات صورت گرفته در حین جوشکاری، مقاومت به خوردگی جوش را تغییر خواهد داد. حرارت ورودی و روش جوشکاری نقش بسزایی در این زمینه دارد (۷). به طور کلی آلیاژ Ti-6Al-4V در مقایسه با تیتانیوم خالص تجاری از مقاومت به خوردگی کمتری برخوردار است که به دلیل افزودن عنصر آلومینیم به تیتانیوم می باشد. ولی با این حال مقاومت به خوردگی آن نسبت به سایر آلیاژهای تیتانیوم بیشتر است. ساختارهای سوزنی در آلیاژهای تیتانیوم مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به ساختارهای کروی دارند (۸). در ارتباط با خوردگی مقطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V تحقیقات معدودی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می گردد. شمعانیان و همکارانش به بررسی رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول ۱۰٪ اسید کلریدریک پرداختند. در اثر فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، ساختاری با دانه های درشت سوزنی در فلز جوش حاصل گردید که حاوی ریز ساختار سوزنی  $\beta + \alpha$  بوده است. آنان بیان نمودند نمونه فلز جوش دارای نرخ خوردگی بیشتری نسبت به نمونه فلز پایه می باشد و فلز پایه دارای مقاومت پلاریزاسیون بیشتری نسبت به فلز جوش است، همچنین به این نتیجه رسیدند که حضور ریز ساختار سوزنی و عیوبی مانند تخلخل در منطقه جوش عامل اصلی کاهش مقاومت به خوردگی در منطقه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول

۱۰٪ اسید کلریدریک می باشد (۹). در پژوهش دیگر صورت گرفته توسط شمعانیان و همکارانش در ارتباط با بررسی رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول ۳/۵٪ NaCl به این نتیجه رسیدند که درشت شدن دانه های فلز جوش باعث افت شدید مقاومت به خوردگی منطقه جوش می گردد (۱۰). حیدریگی و همکارانش به بررسی تاثیر فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن گاز (GTAW) بر ریزساختار و رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول الکترولیت شبیه سازی شده بدن یعنی سرم فیزیولوژیکی پرداختند. نتایج بررسیهای آنها نشان داد مقاومت به خوردگی منطقه جوش نسبت به فلز پایه در این محلول و در دمای  $37^{\circ}\text{C}$  کاهش شدیدی داشت و از طرفی جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V به روش مذکور تاثیر بسیار نامطلوبی بر رفتار خوردگی مناطق مختلف گذاشت (۱۱). در تحقیقات صورت گرفته توسط کریم زاده و همکاران اثر عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم بر رفتار خوردگی جوش آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رفتار خوردگی فلز پایه بهتر از منطقه HAZ و FZ بود. عملیات پس گرم بویژه انحلال و رسوب سختی باعث بهبود خواص خوردگی جوش گردید (۱۲). هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر شدت جریان بر مقاومت به خوردگی مقطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری شده به روش تنگستن-گاز خنثی (TIG) در محلول های آب دریا و ۳/۵٪ NaCl می باشد.

## مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق ابتدا ورقی از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V به ابعاد اولیه  $400 \times 10 \times 4$  mm و ضخامت ۳ mm و فیلر از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V تهیه شد. سپس تعداد ۶ عدد قطعه با ابعاد  $40 \times 50 \times 3$  mm برشکاری شد و لبه سازی یکطرفه قطعات مطابق با استاندارد ASME Section IX با دستگاه CNC انجام شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به امکان آلودگی و از طرفی وجود اکسیدهای باقیمانده روی سطح در زمان ساخت ورقهای تیتانیوم پس از برش قطعات، سطح نمونه ها با محلول تینر و سپس با آب به طور کامل تمیز گردید. پس از آماده سازی و تمیزکاری نمونه ها، ضمن استفاده از فیکسچر به منظور جلوگیری از اعوجاج در نمونه ها و نگهداری قطعات در حین جوشکاری، به صورت تک پاسه دو طرفه و به روش دستی با استفاده از دستگاه جوشکاری با الکتروود تنگستنی  $315$  آمپر مدل Time با جریان DC و با کمک فیلر از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری صورت پذیرفت. برای حفاظت از مقطع جوش از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ استفاده گردید. در ادامه به منظور بررسی تاثیر شدت جریان بر روی مقاومت به خوردگی مقطع جوش این آلیاژ، نمونه های تهیه شده با شدت جریان های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آمپر اتصال داده شد. در عملیات جوشکاری خروجی گاز آرگون (از ابتدا تا انتهای عملیات جوشکاری) برای سطح رو قطعات  $10 \text{ Lit/min}$  و برای

3 . Laser welding

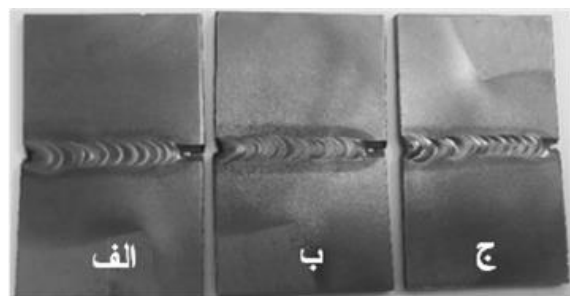
1 . Gas tungsten arc welding  
2 . Gas metal arc welding



دارند. فلز پایه دارای ساختاری شامل زمینه  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  است. لذا ساختار فلز پایه آلیاژ دوفازی  $\alpha$  به همراه  $\beta$  می باشد. شکل ۳ ریزساختار ناحیه HAZ را نشان می دهد. در هر سه نمونه ریز ساختار ناحیه HAZ به صورت دانه بندی مشخص و شامل زمینه  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  سوزنی است. این ساختار شباهت زیادی به ریز ساختار حاصل از آنیل در دمای بالای استحاله  $\beta$  دارد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده.

درصدوزنی	عنصر
۳/۵۶	Ti
۳/۴۵	Al
۳/۴۲	V
۳/۳۰	Fe
۳/۱۵	C
۳/۱۲	N
۳/۰۱	H
۲/۸۸	O



شکل ۱- تصویر نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های الف) ۷۰، ب) ۸۰ و ج) ۹۰ آمپر.

سطح پشت قطعات Lit/min ۵۰ استفاده شد. در شکل (۱) نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های ۸۰، ۷۰ و ۹۰ نشان داده شده است. به منظور مشاهده دانه بندی و ریزساختار نمونه ها، ابتدا نسبت به آماده سازی (تحت استاندارد ASTM E3-17) و سپس میکرو اچ قطعات (تحت استاندارد ASTM 407-2015) اقدام شد، بر این اساس پس از مقطع زدن نمونه ها در ابعاد مدنظر، نسبت به مانت قطعات و سنباده زنی از شماره ۸۰ تا ۲۰۰۰ اقدام گردید و در نهایت پس از انجام پولیش، قطعات در محلول کروم<sup>۴</sup> (شامل: آب مقطر ۹۲ میلی لیتر)، اسید نتریک (۶ میلی لیتر) و اسید هیدرو فلوئوریک (۲ میلی لیتر) اچ شدند. در ادامه تصویربرداری از قطعات در منطقه فلز پایه (BM)، مقطع جوش (FZ) و منطقه متاثر از حرارت (HAZ)، با

استفاده از میکروسکوپ نوری مدل متالوکس ساخت کشور آلمان (تحت استاندارد ASTM E 883-17) با بزرگنمایی های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ صورت پذیرفت. برای آزمونهای الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک، از دستگاه پتانسیواستات PARSTAT2273 ساخت کشور امریکا استفاده شد. نمونه های مورد آزمایش ابتدا تحت سمباده زنی قرار گرفتند، سپس با محلول استون چربی زدایی از روی سطح صورت گرفته و سپس تحت اسیدشویی قرار گرفتند. در این آزمون از دو محفظه شیشه ای مجزا (با الکترومد مرجع کالومل اشباع KCl-sat، الکترومد شمارنده گرافیتی و الکترومد کاری نمونه قطعات)، به طوری که در محفظه شیشه ای اول، الکترولیت محلول NaCl % ۳/۵ و محفظه شیشه ای دوم، محلول آب دریا شبیه سازی شده (مطابق با استاندارد ASTM D1141-98) استفاده گردید. سپس در شرایط مدار باز به منظور رسیدن به حالت پایداری، نسبت به غوطه وری نمونه های آماده سازی شده از مقاطع جوش با شدت جریان های ۷۰ و ۸۰ و ۹۰ آمپر، به مدت زمان ۳۰ دقیقه در هر یک از الکترولیت ها اقدام شد. (حجم محلول به ازای هر قطعه CC ۱۲۵ در نظر گرفته شد) با در نظر گرفتن مدت زمان اعمال پتانسیل ۳۷۰۰ ثانیه و سرعت اسکن ۰/۵ mv/sec و با استفاده از کنترل کامپیوتری نسبت به ترسیم منحنی های پلاریزاسیون اقدام گردید. در این آزمون به روش تافل، پتانسیل خوردگی (E<sub>corr</sub>) و دانسیته جریان (i<sub>corr</sub>) محاسبه گردید. محدوده لحاظ شده برای بررسی نرخ خوردگی قطعات جوشکاری شده با شدت جریان های مذکور، ریشه ناحیه جوش می باشد.

## نتایج

### بررسی ریز ساختاری نمونه ها

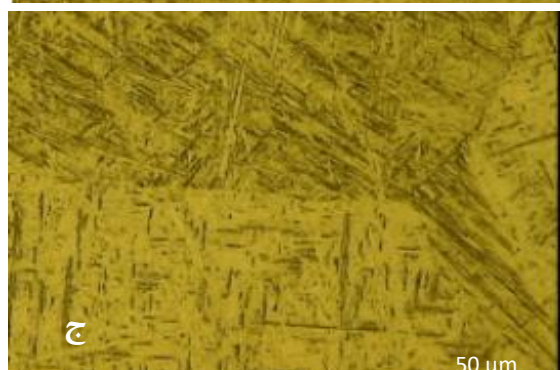
ریزساختار نمونه های جوشکاری شده در شدت جریانهای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آمپر در سه ناحیه فلز پایه، منطقه متاثر از جوش (HAZ) و ناحیه جوش بررسی گردید. شکلهای ۲ تا ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری ریز ساختار فلز پایه، ناحیه HAZ و ناحیه جوش را در ۳ نمونه نشان می دهد. در فلز پایه ریز ساختار تأثیر چندانی از فرآیند جوشکاری نپذیرفت. به همین دلیل ریزساختارهای نشان داده شده در شکل ۲ شباهت زیادی با هم

<sup>1</sup> Kroll

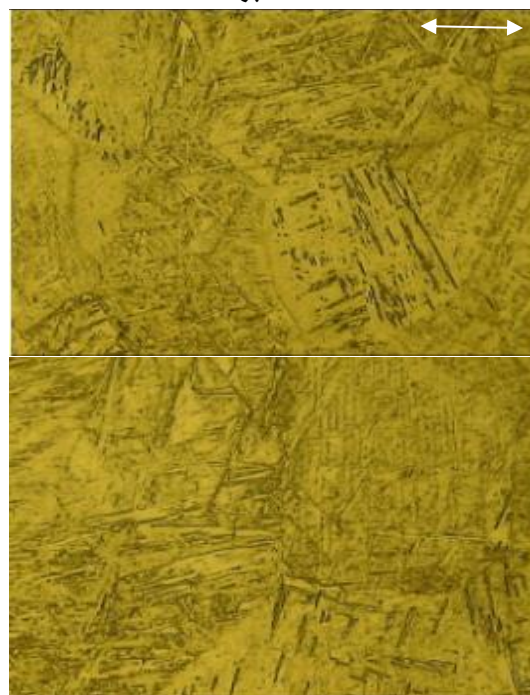
است. در چنین مواردی اولین ریخته گری شده است که کاملاً ذوب شده و سپس حین سرد شدن تا دمای محیط دچار استحاله گردیده است. در هر ۳ نمونه، ریز ساختار شامل فاز  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  سوزنی است. همچنین لایه های نازک فاز  $\alpha$  (نواحی روشن) در مرز دانه های  $\beta$  اولیه دیده می شود. مشابه با ریز ساختار ناحیه HAZ، ریز ساختار ناحیه جوش نیز دارای دانه بندی کاملاً مشخصی است. در نمونه های جوشکاری شده با شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپر نسبت به نمونه ۷۰ آمپر، حرارت بیشتری وارد ناحیه جوش شده و این امر منجر به رشد بیشتر دانه در این نمونه شده است. با افزایش شدت جریان از ۸۰ به ۹۰ آمپر تغییر محسوسی در اندازه دانه ها مشاهده نشده است. در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در منطقه جوش نمونه های فاز  $\alpha$  سوزنی در زمینه فاز  $\beta$  قابل رویت است.



شکل ۲- ریزساختار فلز پایه شامل ساختار دوفازی  $\alpha$  به همراه  $\beta$  در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۷۰ آمپر.



شکل ۴- ریزساختار ناحیه جوش شامل زمینه  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  سوزنی در نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های الف) ۷۰، ب) ۸۰ و ج) ۹۰ آمپر.

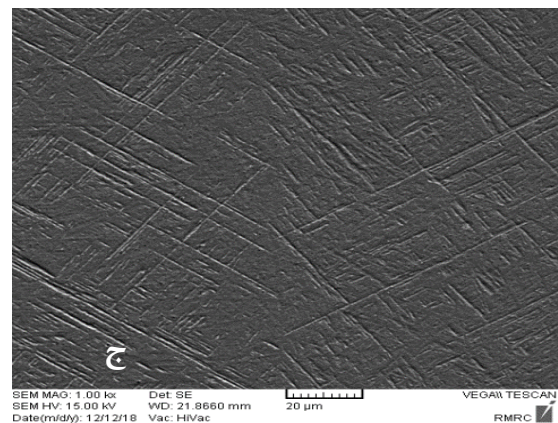
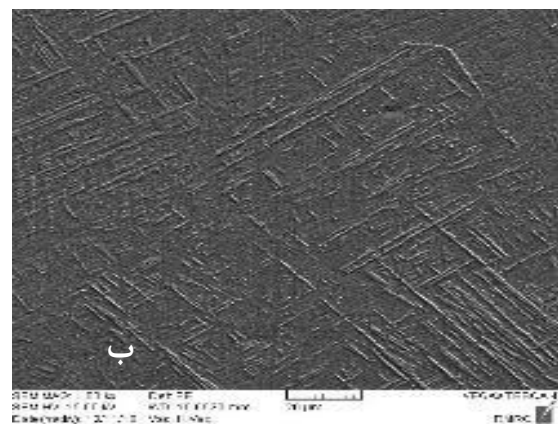
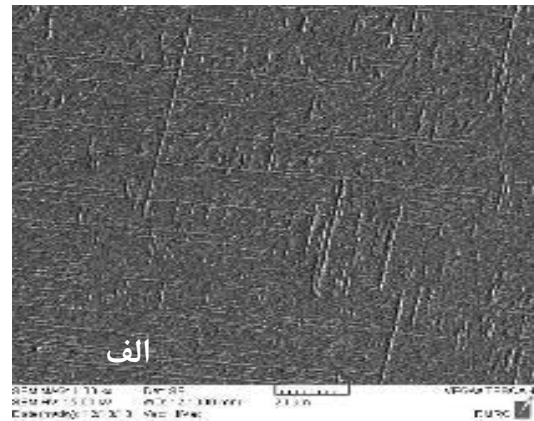


شکل ۳- تصویر نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های الف) ۷۰، ب) ۸۰ و ج) ۹۰ آمپر.

اگر این آلیاژ در دمایی بالاتر از دمایی که در آن استحاله فاز  $\beta$  روی می دهد تحت فرآیند آنیل قرار گیرد، ریزساختاری شامل زمینه فاز  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  سوزنی تشکیل می گردد (۱۲). این امر نشان می دهد این نواحی، دمای بالاتر از دمای استحاله  $\beta$  را تجربه کرده اند. به دلیل سرد شدن نسبتاً سریع آلیاژ از دمای بالای استحاله  $\beta$ ، فاز  $\alpha$  سوزنی نسبتاً ریز تشکیل شده است. در برخی نواحی مرزدانه های  $\beta$  اولیه نیز مقداری فاز  $\alpha$  قابل رویت است. در چنین مواردی اولین فازی که در حین سرد شدن فاز  $\beta$  از دمای بالا تشکیل می شود، فاز  $\alpha$  مرز دانه ای است (۱۳). ریزساختار ناحیه جوش شکل ۴ دارای دانه بندی درشت است و مشابه یک ناحیه ریز تشکیل شده است. در برخی نواحی مرزدانه های  $\beta$  اولیه نیز مقداری فاز  $\alpha$  قابل رویت



که نرخ خوردگی نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر نسبت به نمونه ۷۰ آمپری افزایش یافته است. هر چند که پتانسیل خوردگی نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر مثبت تر شده و این یعنی از نظر ترمودینامیکی، این نمونه نجیب تر و تمایل به خوردگی در آن کمتر شده است، اما در مبحث خوردگی همواره جنبه سینتیکی بر جنبه ترمودینامیکی غلبه دارد. چرا که ترمودینامیک تنها تمایل ذاتی یک عنصر یا ماده را به شرکت در واکنش های الکتروشیمیایی بیان می دارد اما این که این عنصر یا ماده در محیط خورنده با چه سرعتی خورده می شود را سینتیک خوردگی کنترل می کند که بهترین مشخصه از سینتیک خوردگی همان پارامتر نرخ خوردگی است. بنابراین می توان گفت مقاومت به خوردگی در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر کاهش یافته است. در بخش مقایسه ریزساختار بیان شد که به دلیل افزایش حرارت ورودی به ناحیه جوش در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر، اندازه دانه این نمونه در مقایسه با نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۷۰ آمپر افزایش یافته است. بنابراین دلیل افزایش نرخ خوردگی در این نمونه را می توان بزرگ تر شدن دانه های ناحیه جوش دانست. تحقیقات زیادی در مورد تاثیر اندازه دانه بر نرخ خوردگی در فلزات و آلیاژهای مختلف انجام شده است که نتایج آنها لزوماً مشابه و تأیید کننده یکدیگر نبوده است. به عنوان مثال در برخی موارد ریزتر شدن دانه ها منجر به بهبود مقاومت به خوردگی شده ولی در مواردی هم ریزدانه بودن ساختار باعث شده تا نرخ خوردگی افزایش یابد. به عنوان مثال شمعیان و همکاران رفتار خوردگی منطقه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول ۳/۵ درصد NaCl را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها بیان داشتند که نتایج آزمون های متالوگرافی و خوردگی نشان داد که درشت شدن دانه های فلز جوش باعث افت شدید مقاومت خوردگی منطقه جوش گردید (۱۰). در تحقیق دیگری بیان شد که مقاطع جوش آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی به دلیل حرارت ورودی کمتر و ساختار همگن حساسیت کمتری به خوردگی در محیط ۲۰ میلیمتر محلول اسید کلریدریک در دمای ۳۵ °C نسبت به مقاطع جوش نمونه های جوشکاری شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن گاز دارد (۱۴). همچنین در بررسی خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی مشاهده شد که میزان خوردگی نمونه های آلیاژ Ti-6Al-4V در محیط ۳.۵% NaCl در دمای ۸۰ °C بیشتر از نمونه های دیگر می باشد (۱۵). در بررسی دیگری که بر روی آلیاژ منیزیم AZ91 در حالت پیر سازی شده (T6) انجام شد نتایج نشان داد در حالتی که اندازه دانه برابر ۱۶۰ میکرون بود نرخ خوردگی برابر 0.22 mm/yr اما وقتی آلیاژ به روش گاز زدایی ریز دانه تر شده و اندازه دانه آن به ۷۳ میکرون رسید نرخ خوردگی به 0.1 mm/yr کاهش یافت (۱۶). همچنین در تحقیقی که در زمینه اثر اندازه دانه بر رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن 304L انجام گردید نتایج نشان داد که نمونه های با اندازه دانه متفاوت نرخ خوردگی تقریباً یکسانی دارند اما با کاهش اندازه دانه مقاومت در برابر حفره دار شدن بهبود یافته است (۱۷). به لحاظ تئوری روشن است که هر چه دانه های یک ساختار ریزتر باشند مساحت مرز دانه ها در واحد سطح نمونه بیشتر خواهد بود



شکل ۵- تصاویر SEM ناحیه جوش شامل زمینه  $\beta$  تغییر فرم یافته به همراه فاز  $\alpha$  سوزنی در نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های الف) ۷۰، ب) ۸۰ و ج) ۹۰ آمپر.

**بررسی خوردگی نمونه های جوشکاری شده در آب دریا**  
 برای بررسی رفتار خوردگی نمونه ها از آزمون الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک استفاده شد. پارامترهای مهم در آزمون خوردگی (Ecorr)، دانسیته جریان خوردگی (icorr) و نرخ خوردگی است که در مقایسه رفتار خوردگی نمونه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. جدول ۲ مقادیر دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی را به همراه سرعت خوردگی که به کمک منحنی های پلاریزاسیون و روش برونیایی تافل تعیین شده را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد



جدول ۳ مقادیر دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی را به همراه سرعت خوردگی که به کمک منحنی های پلاریزاسیون و روش برونیابی تافل تعیین شده اند نشان می دهد. مقایسه پتانسیل خوردگی و نیز نرخ خوردگی در دو نمونه نشان می دهد که مقاومت در برابر خوردگی در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر نسبت به نمونه ۷۰ آمپر کاهش یافته است. در محلول NaCl ۳/۵ %، در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر هم پتانسیل خوردگی منفی تر شده که نشان می دهد از نظر ترمودینامیکی تمایل به انجام واکنش های خوردگی بیشتر شده و هم نرخ خوردگی بیشتر شده که نشان دهنده افزایش سینتیک خوردگی در این نمونه است. در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۸۰ آمپر هم ترمودینامیک و هم سینتیک خوردگی موید کاهش مقاومت به خوردگی در این نمونه است. دلیل این امر را می توان بزرگ تر شدن اندازه دانه ها دانست. مقایسه رفتار خوردگی نمونه ها نشان می دهد پتانسیل خوردگی نمونه ۹۰ آمپری نسبت به نمونه ۸۰ آمپری اندکی مثبت تر شده و نرخ خوردگی آن نیز اندکی کاهش یافته است. این نشان می دهد هم ترمودینامیک و هم سینتیک خوردگی در این نمونه در جهت کاهش خوردگی تغییر کرده است. با افزایش شدت جریان از ۷۰ به ۸۰ آمپر، نرخ خوردگی در محلول NaCl ۳/۵ % افزایش یافته اما با افزایش شدت جریان به ۹۰ آمپر نرخ خوردگی مجدداً کاهش می یابد. مشابه همین رفتار خوردگی در محیط آب دریا نیز مشاهده گردید. در شکل ۷ منحنی های پلاریزاسیون نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آمپر نمایش داده شده و با یکدیگر مقایسه گردیده است.

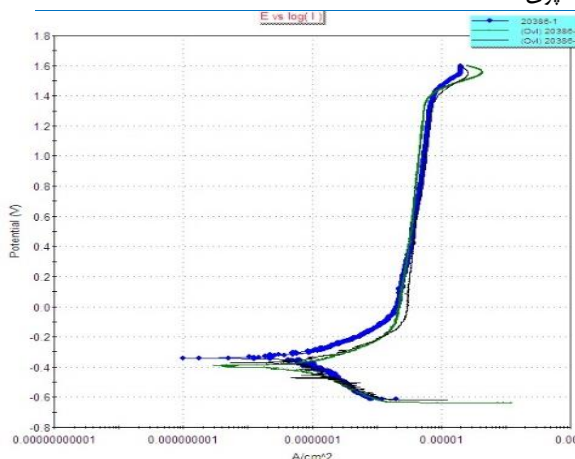
#### مقایسه خوردگی نمونه ها در دو محیط

با مقایسه جداول ۲ و ۳ مشاهده می شود در نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان ۷۰ و ۹۰ آمپر، نرخ خوردگی در محلول NaCl ۳/۵ % بیشتر از محیط آب دریا است اما در نمونه ۸۰ آمپری نرخ خوردگی در محلول NaCl ۳/۵ % کمتر از محیط آب دریا است. به طور عمومی آلیاژهای تیتانیوم نرخ خوردگی بسیار ناچیزی در محیط آب دریا حتی تا دماهای حدود ۲۶۰ °C دارند. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده برای کارکرد در محیط آب دریا یک انتخاب مناسب است. مقاومت به خوردگی بالای آلیاژهای تیتانیوم به دلیل لایه اکسید پسیوی است که بر روی سطح آن تشکیل می شود (۸). با توجه به اینکه آزمون های خوردگی در این تحقیق بر روی ناحیه جوش انجام شده است و ناحیه جوش به دلیل عواملی مثل میکروجدایش، رسوب فازهای ثانویه، رشد دانه ها، عدم یکنواختی در ترکیب شیمیایی و آلوده شدن ناحیه جوش، مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به فلز پایه دارد. به ازای هر ۱۰ لیتر آب دریای شبیه سازی شده مطابق با استاندارد ASTM D1141-98، ۲۴۵/۳۴ گرم NaCl و ۴۰/۹۴ گرم سولفات سدیم به علاوه مقادیر مشخصی از نمک های  $MgCl_2$ ،  $CaCl_2$ ،  $SrCl_2$ ،  $KCl$  و  $KBr$  ... موجود می باشد. هر چند غلظت کلریدها در آب دریای شبیه سازی شده مطابق با استاندارد مذکور مجموعاً در حدود ۳/۵ % است اما از این مقدار سهم نمک NaCl حدود ۲/۵ % وزنی است و مابقی کلریدها جمعاً حدود ۱ % وزنی سهم دارند. این در حالی است که غلظت

و از آنجا که مرز دانه عموماً نسبت به داخل دانه ها مقاومت به خوردگی کمتری دارد، می توان نتیجه گرفت که هر چه مرز دانه ها در نمونه بیشتر باشد، سرعت خوردگی نمونه بیشتر خواهد بود. تحلیل دقیق تر آن است که در صورتی که دانه ها بیش از حد ریز باشند باعث افزایش نرخ خوردگی می شوند. اما در صورتی که ساختار به صورت دانه درشت باشد رفتار خوردگی برعکس خواهد بود، یعنی در صورت بزرگتر شدن دانه ها، مقاومت به خوردگی کاهش خواهد یافت. آنچه که در این تحقیق رخ داده نیز از همین قاعده تبعیت می کند. در مقاله دیگری بیان شد که ریز دانه شدن در آلیاژهای تیتانیوم مقاومت به خوردگی را افزایش می دهد ولی این اثر بصورت یک رویه نیست. افزایش و کاهش خوردگی وابسته به فرآیند و محیط می باشد (۱۸). چون اندازه دانه در ساختار نمونه ۸۰ آمپری اندکی بزرگتر است، مقاومت به خوردگی آن کمتر است اما در مورد نمونه ۹۰ آمپری نرخ خوردگی این نمونه نسبت به نمونه ۸۰ آمپری کاهش می یابد. اندازه دانه ها در ناحیه جوش نیز در این نمونه نسبت به نمونه ۸۰ آمپری افزایشی نشان نمی دهد. در شکل ۶ منحنی های پلاریزاسیون نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آمپر با یکدیگر مقایسه شده است.

#### جدول ۲- مقایسه پارامترهای خوردگی نمونه های جوشکاری شده با شدت جریانهای مختلف در آب دریا.

نمونه	پتانسیل خوردگی $E_{corr}$ (mV)	دانسیته جریان خوردگی $i_{corr}$ (nA/cm <sup>2</sup> )	نرخ خوردگی (mm/year)
۷۰ آمپری	-۵۱۲	۲۷	$4/655 \times 10^{-4}$
۸۰ آمپری	-۲۲۸	۱۲۰	$2/084 \times 10^{-3}$
۹۰ آمپری	-۴۷۸	۲۵	$4/426 \times 10^{-4}$



شکل ۶- منحنی های پلاریزاسیون نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های ۷۰ آمپر (آبی رنگ)، ۸۰ آمپر (سبز رنگ) و ۹۰ آمپر (سیاه رنگ) در آب دریا. بررسی رفتار خوردگی نمونه ها در NaCl ۳/۵ %

بررسی های ریزساختاری نمونه ها نشان داد فلز پایه دارای ساختار جهت دار فاز  $\alpha$  در زمینه فاز  $\beta$  تغییر فرم یافته است. در ناحیه HAZ به دلیل سرد شدن نسبتاً سریع آلیاژ از دمای بالای استحاله  $\beta$ ، فاز  $\alpha$  سوزنی ریز تشکیل شده است. در ناحیه جوش نمونه های جوشکاری شده با شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپر نسبت به نمونه ۷۰ آمپر، حرارت بیشتری وارد شده و این امر منجر به رشد بیشتر دانه ها شده است. با افزایش شدت جریان جوشکاری از ۷۰ به ۸۰ آمپر، اندازه دانه ها در ناحیه جوش و همچنین نرخ خوردگی ناحیه جوش در آلیاژ Ti-6Al-4V افزایش یافته است و با افزایش بیشتر شدت جریان از ۸۰ آمپر به ۹۰ آمپر در ناحیه جوش اندازه دانه تغییری نشان نداده و نرخ خوردگی ناحیه جوش نیز کاهش یافته است. لذا در مقایسه شدت جریان های به کار برده شده برای جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده از شدت جریان ۷۰ آمپر، مقاومت به خوردگی مناسب تری نسبت به شدت جریانهای ۸۰ و ۹۰ آمپری از خود نشان داده است. بررسی نرخ خوردگی ناحیه جوش آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول NaCl ۳/۵% و آب دریا نشان داد که نرخ خوردگی ناحیه جوش آلیاژ در محلول NaCl ۳/۵% بیشتر از آب دریا است. دلیل آن را نیز می توان به غلظت بالاتر نمک NaCl در محلول NaCl ۳/۵% در مقایسه با آب دریا نسبت داد.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

انجام آزمایشها: مهدی کبیری لقب، مجید بلباسی؛  
تحلیل داده ها و نتایج: مهدی کبیری لقب، مجید بلباسی، محمدعمار مفید؛ نگارش نهایی: مجید بلباسی، مهدی کبیری لقب.

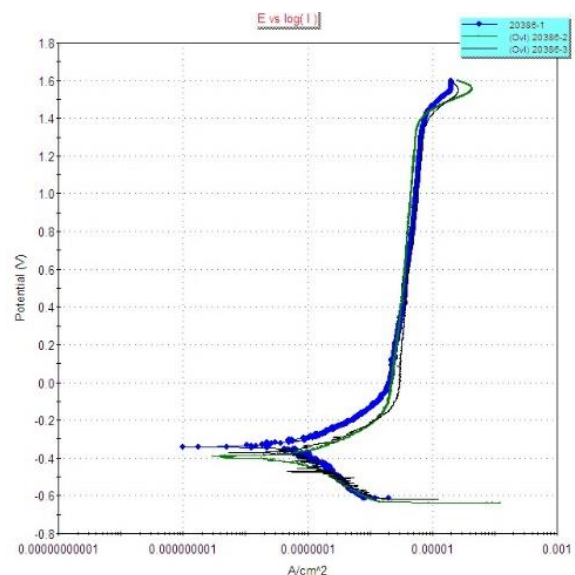
### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

نمک NaCl در دیگر محیط خورنده این تحقیق یعنی محلول NaCl ۳/۵% برابر ۳/۵% وزنی است. افزایش نرخ خوردگی نمونه ها در محلول NaCl ۳/۵% نسبت به محیط آب دریای شبیه سازی شده نشان می دهد نقش نمک NaCl در خوردگی نمونه ها نسبت به نمک های دیگر برجسته تر است و از طرفی کلر موجود در NaCl نیز در میزان خوردگی نمونه ها موثر بوده و با افزایش غلظت کلر پتانسیل خوردگی در این آلیاژ، کاهش می یابد. لذا عوامل فوق باعث کاهش استحکام لایه پسیو و افزایش نرخ خوردگی نمونه ها گردیده است.

جدول ۳- مقایسه پارامترهای خوردگی ۳ نمونه جوشکاری شده با شدت جریانهای مختلف در محلول 3.5% NaCl

نمونه	پتانسیل خوردگی $E_{corr}(mV)$	دانسیته جریان خوردگی $i_{corr}(nA/cm^2)$	نرخ خوردگی $(mm/year)$
۷۰ آمپر ری	-۳۳۰	۷۴	$1.0 \times 10^{-3} \times 1.297$
۸۰ آمپر ری	-۳۹۴	۹۳	$1.0 \times 10^{-3} \times 1.620$
۹۰ آمپر ری	-۳۷۰	۸۱	$1.0 \times 10^{-3} \times 1.423$



شکل ۷- منحنی های پلاریزاسیون مقایسه ای نمونه های جوشکاری شده با شدت جریان های ۷۰ آمپر (آبی رنگ)، ۸۰ آمپر (سبز رنگ) و ۹۰ آمپر (سیاه رنگ) در محلول 3.5% NaCl

### نتیجه گیری

## References

1. Matthew, J. D., Titanium and Its alloys source book, ASM, 1982.
2. Lin, J.J., Lv, Y.H., Liu, Y.X., Xu, B.S., Sun, Z., Li, Z.G. and Wu, Y.X. 2016. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing, *Materials and Design*, 102: 30-40.
3. Kashaev, N., Ventzke, V., Fomichev, Fomin, V. F. and Riekehr, S. 2016. Effect of Nd:YAG laser beam welding on weld morphology and mechanical properties of Ti-6Al-4V butt joints and T-joints , *Optic Lasers Engineering*, 86: 172-180.
4. Yu, H., Li, F., Yang, J., Shao, J., Wang, Z. and Zeng, X. 2018. Investigation on laser welding of selective laser melted Ti-6Al-4V parts: Weldability, microstructure and mechanical properties, *Materials Science Engineering A*, 712: 20-27.
5. Balasubramanian, M., Jayabalan , V. and Balasubramanian, V. 2008. Effect of pulsed gas tungsten arc welding on corrosion behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Materials and Design*, 29:1359-1363.
6. Vahid Shad, Y., and khodabakhshi, A. 2019. Investigation of different parameters on penetration depth and welding width of titanium alloy grade 5 (Ti-6Al-4V) welded by plasma method, *Journal of New Materials*, 10(38): 33-48. [In Persian].
7. Wahid, A., Olson, D.L. and Matlock, D.K. 1993. Corrosion of Weldments, Colorado School of Mines C.E. Cross, Martin Marietta Astronautics Group.
8. Boyer, R., Welsch, G. and Cooling, E.W. 1994. Titanium Alloys, Properties and physical Metallurgy, ASM.
9. Atapor, M., fathi, M. and shamaniyan, M. 2019. Investigation of the effect of tungsten-gas arc welding process on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weld zone in 10% hydrochloric acid solution, The fourth joint conference of the Association of Metallurgical Engineers and the Iranian Foundry Association. [In Persian].
10. Atapor, M., fathi, M. and shamaniyan, M. 2018. Evaluation of corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weld zone in 3.5% NaCl solution, Eleventh National Corrosion Congress. [In Persian].
11. Heydarbeygi, M., Karimzadeh, F., Saatchi, A. and Tahviliyan, A. 2016. Improvement the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weld area by heat treatment, 11th Annual Congress of Iranian Association of Metallurgical Engineers. [In Persian].
12. Karimzadeh, F., Heidarbeygi, M. and Saatchi, A. 2008. Effect of heat treatment on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weldments, *journal of materials processing technology*, 206: 388-394.
13. Rodney, R.B. 1998. Metals Hand book, Corrosion Resistance of Titanium and Titanium Alloys, ASM.
14. Atapour, M., Pilchak AL. and Frankel, GS. 2010. Corrosion behavior of friction stir-processed and gas tungsten arc-welded Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41: 2318-2327.
15. Chiyani, M. and Atapor, M. 2019. Investigation of the effect of temperature on the corrosion behavior of similar welded titanium alloy Ti-6Al-4V by friction stirring method, *Iranian Journal of Welding Science and Technology*, 5(2): 129-140. [In Persian].
16. Fukuzaki, M. , Tamura, Y. and kono, N. 2005. Relationship between Behavior and Microstructure in an AZ91 Magnesium Alloy, *Journal of japan institute of light metals*, 55(9): 389-394.
17. Atapor, M., Fathi, M. and Shamaniyan, M. 2019. Investigation of the effect of tungsten-gas arc welding process on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weld zone in 10% hydrochloric acid solution, The fourth joint conference of the Association of Metallurgical Engineers and the Iranian Foundry Association. [In Persian].
18. Ralaston, K.D. and Birbilis, N. 2010. Effect of grain size on corrosion: A Review, *Corrosion*, 66(9): 1-13.



