نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 146-133

بررسی تأثیر متغیرهای جریان پالسی در جوشکاری قوسی تنگستن-گاز آلومینیوم 5456 بر تحولات ریزساختاری، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی اتصالات

محمدرضا صمدی[1]، حسین مستعان[1*]، مهدی رفیعی[2]، مصطفی صالحی[1]

1- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران.

2- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد. ایران.

(دریافت مقاله: 1398/09/22 ؛ پذیرش مقاله: 1398/05/19)

چکیده

امروزه آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل خواص ویژهای که دارند، کاربرد زیادی در صنایع دریایی و هوایی دارند. آلیاژهای سری 5xxx نیز از این قاعده مستثنی نیستند و به دلیل مقاومت به خوردگی عالی، چقرمگی و استحکام بالا و همچنین جوشپذیری مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند. یکی از مشکلات موجود در جوشکاری ذوبی این آلیاژها، کاهش تنش تسلیم و استحکام نهایی کششی در اثر رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت میباشد. در این پژوهش به مقایسه دو حالت جوشکاری قوسی تنگستن – گاز با جریان مستقیم و جریان پالسی به منظور تعیین تاثیر آن بر ریزساختار، خواص مکانیکی و خواص خوردگی پرداخته شد. همچنین با تغییر زمان برقراری قوس در جریان پیک و جریان زمینه، در جوشکاری با فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز پالسی بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی این آلیاژ مطالعه شد. جهت بررسی ریزساختار و سطح مقطع شکست به ترتیب از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد، نتایج نشان داد که شکست تمام اتصالات به صورت کاملا نرم بوده است. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی آزمایش کشش و برای بررسی مقاومت به خوردگی آزمایش پلاریزاسیون و امپدانس انجام شد.

کلمات کلیدی: آلومینیومهای سری 5000، فلز پرکننده، جوشکاری قوسی تنگستن- گاز، خوردگی، ریزساختار.

A study on the effect of pulsed current gas tungsten arc welding parameters on the microstructural evolutions, corrosion behavior and mechanical properties of AA 5456 weld joints

M.R. Samadi[1], H. Mostaan[*1], M. Rafiei[2], M. Salehi[1]

1--Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

(Received 13 December 2019 ; Accepted 9 September 2020)

Abstract

Nowadays, aluminum and its alloys have extensive applications in marine and aerospace industrious owing to their excellent properties. Among these alloys, 5xxx series of aluminum alloys have also excellent corrosion resistance, high toughness and strength and also good weldability. Decrease in yield strength and also tensile strength due to the grain growth in the heat affected zone is of the main problems in the welding of these series of Al alloys. In this research work, gas tungsten arc weld joints in two modes i. e. direct current and pulsed current were compared in order to study the effect of this parameter on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of weld joints. Also,

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-mostaan@araku.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

the effect pulsed current parameters such as peak current and basic current were investigated. Microstructural evolutions and fracture surfaces of weld joints were examined by optical microscope and scanning electron microscope, respectively. It was found that the fracture behavior of all joints is in a ductile manner. Also, tensile test and electrochemical polarization were conducted in order to study the mechanical properties and corrosion behavior of weld joints.

Keywords: 5xxx series Al alloys; Filler metal; Gas tungsten arc welding; Corrosion; Microstructure.

1- مقدمه

خواص منحصربفرد آلومینیوم امروزه این فلز را به یکی از پرکاربردترین فلزات تبدیل کرده است. بطوری که آلومینیوم و آلیاژهای آن پس از فـولاد پر مصرف‌ترین آلیاژهای صنعتی هستند [1و2]. آلیاژهای سری 5xxx بر پایه منیزیم هستند و بیشـترین اسـتحکام در آلیاژهای عملیات حرارتی‌ناپذیر آلومینیوم را دارند. این دسته از آلیاژهـای آلومینیوم قابل کرنش سختی هستند و مقاومت به خوردگی عالی، چقرمگی و جوش-پذیری عالی از خود نشان می‌دهند و بـه دلیل داشتن این خواص، کـاربرد وسـیعی در زمینـه سازه‌های خطوط هوایی، پل و کاربردهای دریایی پیدا کرده‌اند [1و 3].

آلیاژهای آلومینیوم سری 5xxx که توانایی انحلال بیش از 5 درصد منیزیم را در خود دارند به‌علت ایجاد محلول جامد باعث افزایش استحکام در این آلیاژها می‌گردند. طبق دیاگرام فازی دوتایی آلومینیوم-منیزیم (Al-Mg) مشاهده می‌شود که میزان منیزیمی که در حالت تعادلی و دمای محیط می‌تواند در زمینه آلومینیومی حل شود 1/4 درصد می‌باشد. همچنین با افزایش میزان منیزیم حل شده همواره استحکام‌دهی آلیاژ بالاتر می‌رود [4]. در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم سری 5xxx ریزساختار یک جوش لب‌به‌لب در شرایط آنیل شده و جوش داده شده با پرکننده‌ای مثل: 5356 به این صورت تغییر می‌کند که فلز پایه دارای یک ساختار ریزدانه شامل: یک زمینه از محلول جامد منیزیم در آلومینیوم می‌باشد و بوسیله رسوبات ریز Al_3Mg_2 در کنار هم و همراه ذرات درشت‌تر Al-Fe-Si-Mn تحت رسوب سختی قرار گرفته است. در منطقه متأثر از حرارت Al_3Mg_2 بیشتری تشکیل خواهد شد که ممکن است شروع به درشت شدن نمایند. با افزایش دما، مقداری از Al_3Mg_2 مجددا حل می‌شود. فلز جوش یک ساختار ریختگی از محلول فوق‌اشباع منیزیم در آلومینیوم با ذرات بین‌فلزی نامتقارن مانند Al_3Mg_2 است. اگر نرخ سرد شدن فلز جوش به اندازه کافی سریع باشد از تشکیل رسوب Al_3Mg_2 ممانعت می‌کند. آلیاژهای سری 5xxx با 1 درصد تا 2/5 درصد منیزیم اگر بصورت خودزا یا با فلز پرکننده‌ای با ترکیب مشابه خود جوشکاری شوند، ممکن است نسبت به ترک خوردن داغ حساس شوند. راه حل رفع این مشکل استفاده از فلز پرکننده‌ای حاوی بیشتر از 3/5 درصد منیزیم است [5]. در فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز حرارت لازم برای ذوب فلز پایه و سیم جوش مصرفی از طریق تشکیل قوس الکتریکی بین الکترود تنگستن غیر مصرفی و سطح قطعه کار ایجاد می‌گردد و در این فرآیند برای محافظت قوس الکتریکی، حوضچه جوش و منطقه متأثر از حرارت از گاز خنثی استفاده می‌شود. هنگامی که از نوع جریان مستقیم با قطبیت الکترود منفی استفاده شود، حدود 75 درصد گرما در فلز پایه و 25 درصد گرما در الکترود به وجود می‌آید، بنابراین عمق نفوذ افزایش پیدا می‌کند و در صورتی که از نوع جریان مستقیم با قطبیت الکترود مثبت استفاده گردد 75 درصد گرما در الکترود می‌باشد و عمق نفوذ کم می‌شود. درصورتی که از جریان متناوب استفاده شود گرما بصورت مساوی بین الکترود و قطعه کار تقسیم می‌شود و این نوع جریان برای برداشتن لایه اکسیدی فلزات بهتر است و در جوشکاری آلومینیوم استفاده می‌گردد [6].

در روش قوس پالسی جریان جوشکاری در بازده زمانی کم از یک مقدار بالا به یک مقدار پایین تغییر می‌کند که باعث ایجاد مهره‌های جوش در محل جوشکاری می‌شود. تغییرات جریان قدرت کنترل رسوب‌گذاری و تعیین شکل دانه را ایجاد می‌کند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

در این روش منطقه ذوب ریزدانه‌تر است و کیفت جوش افزایش یافته است که دلیل آن کاهش گرمای ورودی می‌باشد. در جریان‌های بالا حتی در زمان کم حرارت زیادی به قطعه اعمال می‌شود اما زمانی که جریان کاهش پیدا می‌کند حرارت ورودی فرصت انتقال به فلز پایه را دارد که این عامل باعث باریک‌تر شدن منطقه متأثر از حرارت می‌گردد [7].

آلیاژهای آلومینیوم و همچنین کامپوزیت‌های بر پایه آلومینیوم به دلیل مقاومت به خوردگی مناسبی که دارند [8]، در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند اما باید با این حال احتیاط لازم در هنگام جوشکاری و قرار گرفتن در محیط‌های خاص صورت گیرد. آلیاژهای سری 5xxx علاوه بر خوردگی یکنواخت که رایج‌ترین نوع خوردگی در آن‌ها می‌باشد، متحمل انواع دیگر خوردگی نظیر: خوردگی حفره‌دار شدن، خوردگی بین‌دانه‌ای، خوردگی تنشی، خوردگی شکافی، خوردگی فرسایشی و خوردگی میکروبی نیز می‌شوند [9 و 10].

اگر میزان منیزیم در آلیاژهای سری 5xxx بیشتر از 3 الی 4 درصد شود، فاز Al_3Mg_2 موسوم به فاز β شروع به رسوب کردن خواهد نمود [5]. رسوب فاز Al_3Mg_2 در مرزدانه باعث ایجاد خوردگی بین‌دانه‌ای وخوردگی تنشی در این آلیاژها می‌شود. رسوب‌گذاری Al_3Mg_2 در دمای محیط به آهستگی انجام می‌شود، اما با افزایش دما سرعت رسوب‌گذاری نیز افزایش می‌یابد، که باعث می‌شود مقاومت به خوردگی جوش کمتر از فلز پایه باشد [5 و 11].

کاتساس و همکارانش [12] در بررسی خوردگی آلیاژهای جوشکاری شده AA5083 یافتند که منطقه حاوی رسوب Al_3Mg_2 در واقع همان منطقه متأثر از حرارت می‌باشد زیرا فلز جوش به‌علت ذوب شدن، کاملا همگن می‌شود و همچنین فلز پایه به‌قدری حرارت دریافت نمی‌کند که بتواند تشکیل رسوبات Al_3Mg_2 را در خود داشته باشد به همین علت این منطقه متأثر از حرارت می‌باشد که رسوبات فاز β در آن تشکیل می‌شود. کالکرافت و همکارانش [11] متوجه شدند با کنترل جریان پالسی و حرارت ورودی در واقع انتخاب تکنیک‌های جوشکاری مناسب می‌توان به طور قابل توجه‌ای حساسیت به خوردگی را با جلوگیری از تشکیل رسوبات در منطقه متاثر از حرارت کاهش داد. بالاسوبرامانیان و همکارانش [13] در روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز، به‌جای جریان ثابت از جریان پالسی برای جوشکاری آلیاژ آلومینیوم استفاده کردند که نتیجه آن کاهش حرارت ورودی به قطعه، یکنواخت‌تر شدن پروفیل دمایی در کل قطعه، افزایش استحکام کششی جوش و تغییر ریزساختار به سمت هم‌محور می‌باشد.کومار و همکارانش [14]، هنگام بررسی خواص مکانیکی آلیاژ 5456 جوشکاری شده به روش جوشکاری پالسی قوس تنگستن-گاز متوجه شدند با تغییر در پارامترهای جوشکاری مانند: جریان و سرعت جوشکاری می‌توان به حالت بهینه از قبیل، استحکام کششی برابر 290 مگاپاسکال، استحکام تسلیم برابر 183 مگاپاسکال، ازدیاد طول 12 درصد و سختی متوسط منطقه جوش 118 ویکرز دستیابی پیدا کرد. در جوشکاری پالسی قوس تنگستن-گاز برای آلیاژهای آلومینیوم می‌توان اشاره کرد که خواص مکانیکی اتصالات صورت گرفته تحت تاثیر پارامترهایی چون تغییر جریان، سرعت جوشکاری و فرکانس پالس و ... می باشد. در این پژوهش قصد بر آن است تا اثر پارامترهای جریان پالسی بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصالات حاصل از جوشکاری قوسی تنگستن-گاز آلیاژ آلومینیوم 5456 مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

2-مواد و روش تحقیق

در این پژوهش جهت تهیه نمونه‌های جوشکاری از ورق آلومینیوم AA5456 به ضخامت 1 mm استفاده شد. براساس استاندارد جوشکاری آمریکا (AWS) از مفتول پرکننده ER5183 به قطر 1/4 میلیمتر استفاده شد. ترکیب شیمیایی مواد مصرفی در جدول (1) ارائه شده است.

تعداد 8 نمونه از ورق آلومینیوم AA5456 به صورت تسمه‌های مستطیلی به ابعاد 180×100 میلی‌متر بریده شدند. برشکاری نمونه‌ها توسط دستگاه گیوتین رایکوتکنیک هیدرولیکی انجام شد. نمونه‌های بریده شده براساس استاندارد AWS آماده شدند [15]. به علت جلوگیری از تشکیل تخلخل، نمونه‌های تهیه شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول1- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 5456 و مفتول پرکننده ER5183

عنصر	Ti	Zn	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Al
AA 5456	**<0.05**	<0.05	<0.05	0.17	0.12	0.04	0.55	4.79	Base
ER5183	**0.08**	0.005	0.005	0.12	0.05	0.08	0.66	4.8	Base

از فلز پایه، قبل از جوشکاری در محلول تمیزکننده شامل: ۵۰٪ اسید نیتریک و 50% آب در داخل ظرفی از جنس فولاد زنگ‌نزن چربی‌زدایی شدند و در ادامه شسته و خشک شدند. قبل از شروع جوشکاری به منظور حذف لایه اکسیدی لبه‌های اتصال با برس سیمی از جنس فولاد زنگ‌نزن برس زنی شدند.به علت ضخامت کم نمونه‌ها نیازی به پخ زنی نبوده، در ادامه نمونه‌ها بصورت لب‌به‌لب به دو روش یک‌بار با جریان مستقیم، نمونه A و سه بار با جریان پالسی با پارامتر جریان جوشکاری یکسان ولی زمان‌های متفاوت جوشکاری شدند (نمونه‌های B,C و D). جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش نوع Fronus و مدل Magic Wave 2600 انجام شد. الکترود مصرف‌نشدنی مورد استفاده الکترود تنگستنی حاوی 2 درصد اکسیدتوریم به قطر 3/2 میلی‌متر انتخاب شد. جوشکاری نمونه-ها با گاز محافظ آرگون با خلوص 99/999 استفاده شد.

روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز جریان پالسی با قطبیت جریان مستقیم الکترود منفی در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است، که اولین بار توسط دانکن و همکارانش در سال 1983 به ثبت رسید. در این روش 75% حرارت ورودی بر روی قطعه کار یا همان فلز پایه متمرکز است [16].

در شکل (1)، P و B به ترتیب جریان پیک و جریان زمینه می‌باشند. مدت زمانی که قوس جوشکاری در جریان بالایی خود یا همان جریان پیک قرار دارد (t_P) و مدت زمانی که قوس جوشکاری در جریان زمینه قرار دارد را (t_B) می‌نامند. همانطورکه از شکل (1) مشاهده می‌شود جریان به طور مداوم بین جریان‌های P و B تغییر می‌کند به همین دلیل جریان متوسط جوشکاری (I_m) تعریف می‌شود:

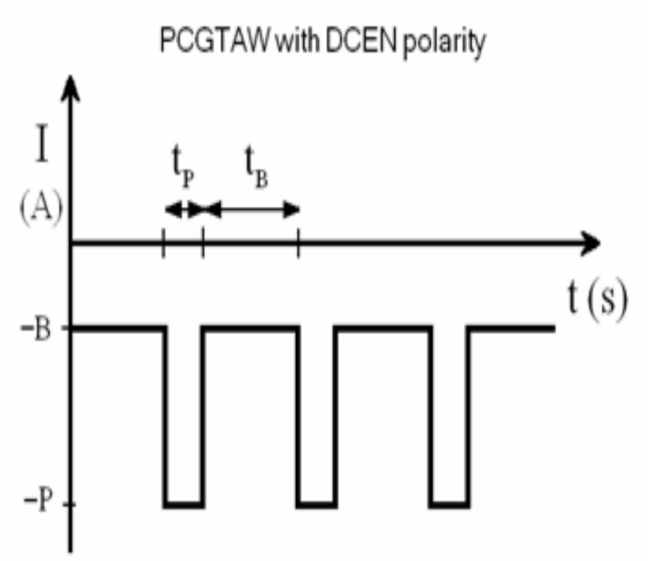
$$I_m = \frac{P \times t_P + B \times t_B}{t_P + t_B} \quad (1)$$

در فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن- گاز پالسی، نسبت زمان قوس جوشکاری در جریان پیک به زمان قوس جوشکاری در جریان زمینه، با T و نسبت مقدار جریان پیک به مقدار جریان زمینه نیز با K نشان داده شده است، که از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند:

$$T = \frac{t_P}{t_B} \quad (2)$$

$$k = \frac{P}{B} \quad (3)$$

از جمله پارامترهای مهم در جوشکاری با جریان مستقیم در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز می‌توان به جریان جوشکاری، ضخامت فلز پایه، جریان گاز محافظ، تعداد پاس جوشکاری، موقعیت جوشکاری، قطر مفتول پرکننده، قطر الکترود تنگستنی، سرعت حرکت و درز اتصال اشاره کرد. این پارامترها بر اساس استاندارد AWS در جدول (2) ارائه شده‌اند.



شکل1- نمودار جریان جوشکاری - زمان در روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز پالسی با قطبیت جریان مستقیم الکترود منفی [16]

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول2- پارامتر های جوشکاری برای اتصال لب لب آلومینیوم در فرایند جوشکاری

سرعت حرکت (mm/s)	جریان گاز محافظ (lit/min)	قطر الکترود تنگستنی (mm)	قطر مفتول پرکننده (mm)	تعداد پاس جوشکاری	درز اتصال (mm)	موقعیت جوشکاری	جریان جوشکاری (A)	ضخامت نمونه (mm)
4/5-2/1	15	3/2	1/4	1	2	سر به سر	70	1

برای جوشکاری نمونه‌های 2 و 3 و 4 از روش جوشکاری با جریان پالسی استفاده شده است، که پارامترهای اصلی جوشکاری عبارتند از: جریان پیک (P)، جریان زمینه (B)، زمان روشن بودن پالس (t) و فرکانس اعمالی پالس (F). پارامترهای انتخاب شده در جدول (3) ارائه شده‌اند.

جدول3- پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری قوسی تنگستن - گاز پالسی

پارامتر های فرایند	مقدار	واحد	نماد
جریان پیک	90	A	P
جریان زمینه	60	A	B
زمان قوس جوشکاری در جریان پیک	0/0-015/05	S	t_P
زمان قوس جوشکاری در جریان زمینه	0/05 -0/1	S	t_B
فرکانس پالس	4	Hz	F

بعد از انجام عملیات جوشکاری جهت بررسی ریزساختار نمونه‌هایی با ابعاد 1×10×30 میلی‌متر از قطعه جوشکاری شده برش داده شدند و پس از آن نمونه‌ها با سنباده‌های 180 تا 5000 آماده‌سازی شدند و پولیش نهایی با ترکیب آب و آلومینا انجام شد. در ادامه نمونه‌ها با محلول اسیدی کلر اچ شدند و تصاویر میکروسکوپی نوری توسط میکروسکوپ صاایران (IM420) گرفته شد و همچنین برای بررسی سطح مقطع شکست از نمونه‌های کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری شده است.

جهت بررسی خواص مکانیکی از آزمایش کشش استفاده شد. جهت تعیین و مقایسه استحکام جوش از آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8-00 توسط دستگاه کشش 30 تنی مدل INSTRON-4486 ساخت کشور انگلستان استفاده شد و نمونه‌های کشش توسط وایرکات برای انجام تست کشش بریده و بصورت عرضی تهیه شدند [18].

در ادامه برای بررسی مقاومت به خوردگی از تست پلاریزاسیون و امپدانس در یک سلول با استفاده از یک مجموعه سه الکترودی که شامل: یک الکترود مرجع کالومل، الکترودهای متقارن پلاتین و فولاد است بعنوان الکترود کار مورد استفاده قرار گرفت.

دستگاه پتانسیواستات ساخته شده توسط شرکت Ivium بود. تست Potentiodynamic بر روی هر نمونه سه بار انجام شد تا تکرارپذیری در اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی انجام شود. در آزمون امپدانس دامنه سیگنال AC با محدوده ولتاژ 10 mv و محدوده فرکانس از 100 kHz تا 10 مگاهرتز اعمال شد.

سطوح بازرسی نمونه‌ها قبل از آزمایشات با استون پاک شده و محلول الکترولیت مورد استفاده محلول حاوی NaCl 3.5wt% در آب مقطر بود. این محلول pH حدود 6 را اندازه گرفت و آزمایش‌ها در دمای اتاق انجام شد.

برای محاسبه میزان نفوذ، چگالی نمونه توسط قانون ارشمیدوس محاسبه شد. همچنین وزن مولکولی نمونه‌ها با توجه به وزن مولکولی هر قسمت در نمونه براساس درصد وزن آن‌ها محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

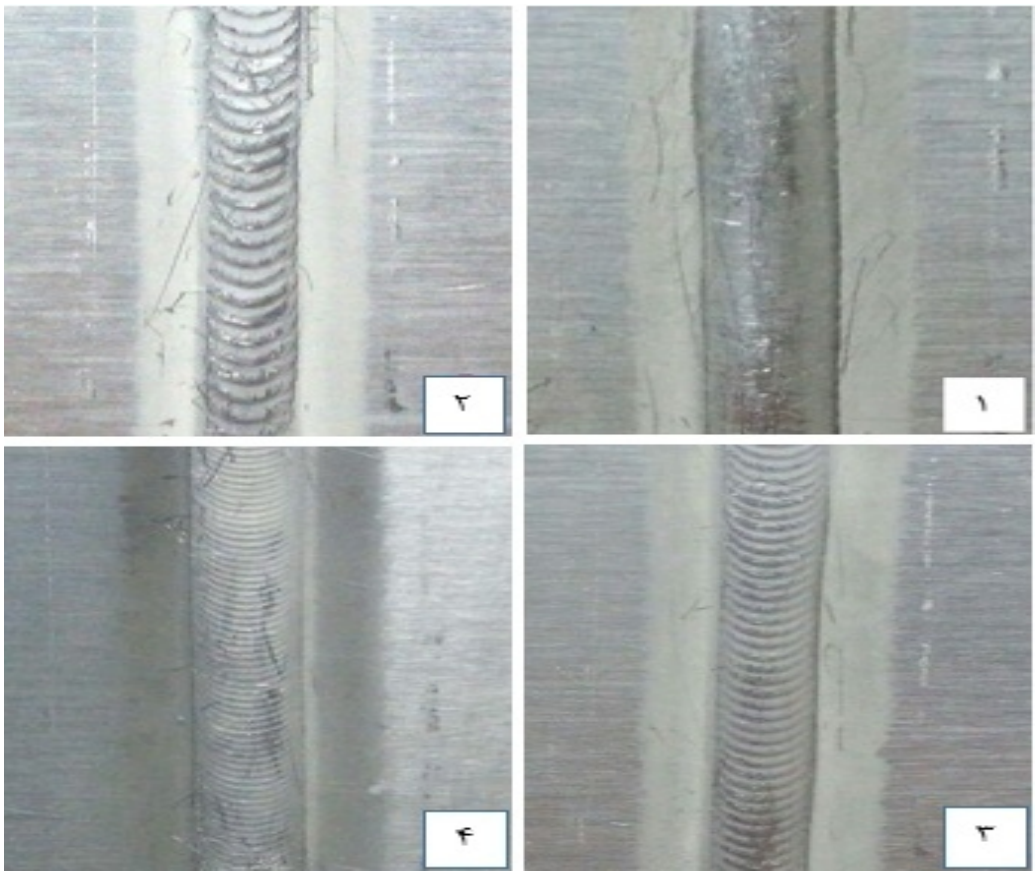
3-1- نتایج آزمون خوردگی

آزمون امپدانس الکتروشیمیایی آزمونی است که در آن جریان متناب به سیستم وارد می‌شود و امپدانس به دو صورت امپدانس حقیقی و موهومی از سیستم دریافت می‌شود. با رسم این اطلاعات بر حسب یکدیگر به روش‌های گوناگون که در ادامه آمده است، می‌توان با فیت نتایج بر روی مدار معادل‌های الکتروشیمیایی، پارامترهای مؤثر در خوردگی سیستم را تحلیل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول4- پارامترهای جوشکاری قطعه جوش شده با جریان مستقیم و سه قطعه با جریان پالسی

نمونه	I_m (A)	طول جوش (mm)	V (Volt)	T	t_B (s)	t_P (s)	K	B (A)	P (A)
1	70	180	40	–	–	–	–	–	–
2	70	180	40	0/5	0/1	0/05	1/5	60	90
3	68/57	180	40	0/4	0/075	0/03	1/5	60	90
4	66/92	180	40	0/3	0/05	0/015	1/5	60	90



شکل2- تصویر از سطح نمونه‌ها بعد از اتمام فرایند جوشکاری، (1) نمونه جوشکاری شده با جریان مستقیم، (2و 3و 4) نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالسی

و هر پارامتر را کمی نمود [19].

در زیر منحنی‌های نایکوئیست1 (Z' بر حسب "Z-) مربوط به نمونه‌ها آمده است:

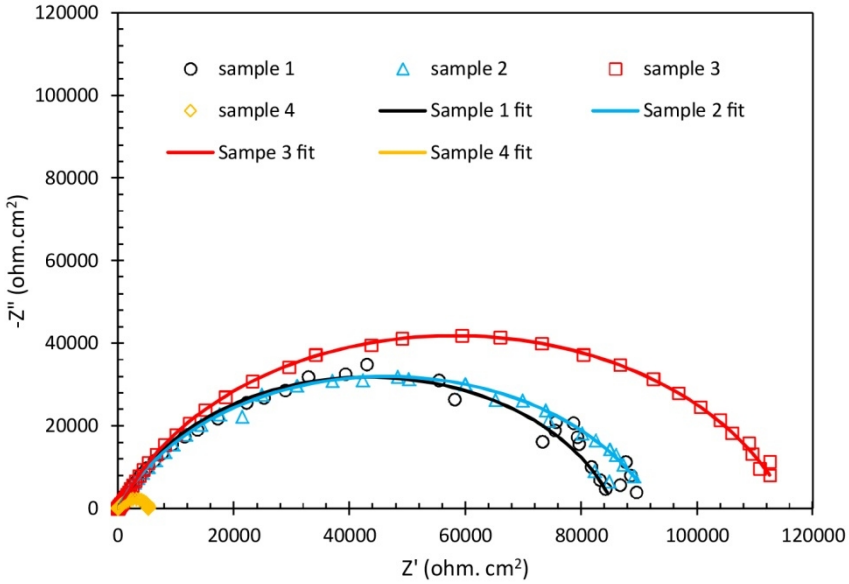
مطابق شکل (3)، هر منحنی نایکوئیست شبیه یک نیم‌دایره است که قطر این نیم‌دایره می‌تواند بیانگر مقاومت سیستم در برابر خوردگی باشد [20]. مطابق شکل (3)، بیشتر بودن قطر نیم‌دایره نمونه 3 و کوچک‌تر بودن این قطر در نمونه 4 نسبت به دیگر نمونه‌ها کاملا مشهود است. این می‌تواند بیانگر بهینه بودن نمونه سوم از لحاظ مقاومت در برابر خوردگی باشد.منحنی‌های باد2 مربوط به این نمونه‌ها در زیر آمده است:

مطابق شکل (4-الف) امپدانس در کمترین فرکانس در منحنی‌های باد-امپدانس در نمونه 4 از بقیه به صورت مشهودی کمتر است که این بیانگر کمتر بودن مقاومت کل سیستم در برابر خوردگی در این نمونه می‌باشد [21]. در سه نمونه دیگر منحنی باد-امپدانس تقریبا شبیه یکدیگر است. اما امپـدانـس در

۱-Nyquist Plot

۲-Bode

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل3- نمودار نایکوئیست نمونه‌ها بعلاوه نتایج فیت داده‌های حاصل از آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی بر روی مدار معادل‌های الکتروشیمیایی مناسب (نقاط نتایج حاصل از آزمایش و خطوط نتایج حاصل از فیت می‌باشد)

کمترین فرکانس نمونه 3 اندکی از دو نمونه دیگر بیشتر است. جهت تعیین دقیق‌تر پارامترهای الکتروشیمیایی، نتایج حاصل از آزمایش امپدانس بر روی مدار معادل الکتروشیمیایی منطبق گردید،

به منظور تعیین تعداد ثابت زمانی برای انتخاب مدار معادل مناسب از منحنی‌های باد-زاویه فاز استفاده می‌شود. در شکل (4-ب)، وجود دو قله در هر چهار نمونه بیانگر دو ثابت زمانه بودن سیستم می‌باشد. مدار معادل‌های دو ثابت زمانه می‌تواند به صورت‌های مختلفی در نظر گرفته شود که از بین آن‌ها مدار معادل نشان داده شده در شکل (5) بهترین فیت بر روی نتایج آزمایشگاهی را حاصل نموده است.

این مدار معادل شامل سه مقاومت (به ترتیب از چپ مقاومت محلول، مقاومت پوشش و مقاومت انتقال شارژ) و دو عنصر فاز ثابت (مربوط به پوشش و لایه ی دوگانه) می‌باشد. معادل‌سازی نمونه‌های اندازه‌گیری شده با مدار معادل الکتروشیمیایی توسط نرم افزار ZsimpWin انجام شد و نتایج در شکل های (4) و(5) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، معادل‌سازی توانسته است به خوبی بر نمودارهای نایکوییست و باد منطبق شود.

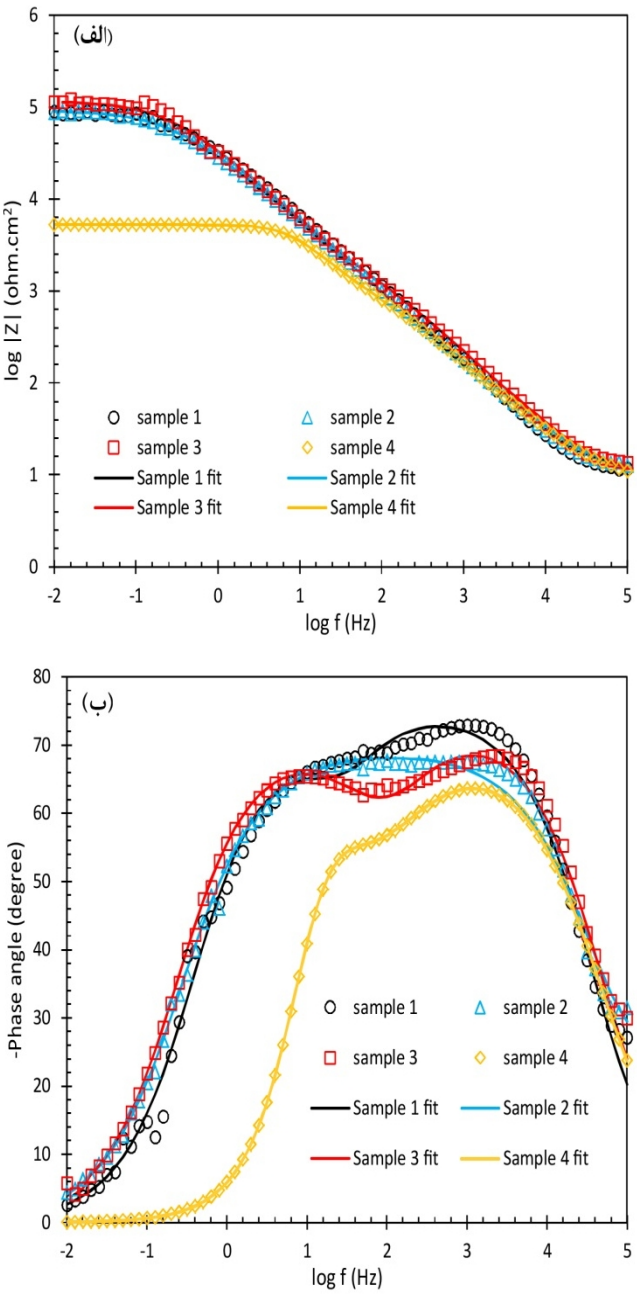
مقادیر پارامترهای بدست آمده از این معادل سازی عبارتست از: چنانچه مجموع مقاومت پوشش و انتقال بار به عنوان مقاومت سیستم در برابر خوردگی در نظر گرفته شود، این پارامتر در نمودارهای شکل(6) با یکدیگر مقایسه شده است.

مطابق شکل(6)، نمونه 3 دارای بیشترین مقاومت کل و پس از آن نمونه 2، نمونه 1 و نمونه 4 قرار دارد که این نتایج از روی شکل منحنی‌های نایکوئیست نیز مشهود بود. جهت بررسی دقیق‌تر سیستم، آزمایش پلاریزاسیون به عمل آمده است. نتایج این آزمایش در شکل (7) نشان داده شده است.

پلاریزاسیون آندی، پتانسیودینامیک یک نمونه‌ی فلزی را توسط روابط جریان-پتانسیل آن توصیف می‌کند. پتانسیل نمونه به آهستگی به سمت مقادیر مثبت‌تر پویش و از این رو به عنوان آند عمل کرده و خورده می‌شود و یا پوشش اکسیدی تشکیل می‌دهد. نمودار کامل جریان-پتانسیل یک نمونه می‌تواند در زمانی کوتاه و در برخی موارد در اندک دقایقی اندازه‌گیری شود [22]. منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌ها در شکل(7) ارائه شده است.

از روی شکل منحنی‌های پلاریزاسیون به نظر می‌رسد واکنش کاتدی تحت کنترل نفوذ قرار گرفته است زیرا شاخه کاتدی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

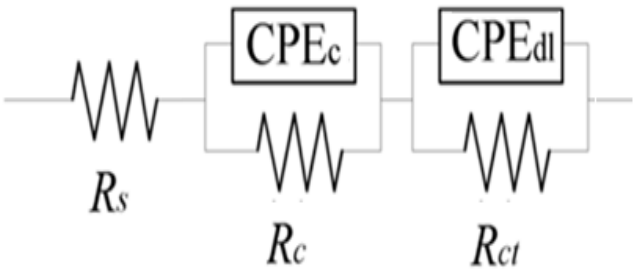


شکل4- منحنی‌های الف) باد-امپدانس و ب) باد-زاویه فاز نمونه‌های مورد مطالعه (نقاط نتایج حاصل از آزمایش و خطوط نتایج حاصل از فیت می‌باشد)

آندی باید شبیه هم باشند تا شاخه کاتدی تحت کنترل اکتیواسیون باشد اما در منحنی می بینید این طور نیست و تقریبا شاخه کاتدی عمودی شده است و بنابراین با شیب شدیدی همراه بوده است. همچنین بیشتر بودن دانسیته جریان شاخه‌های آندی و کاتدی نمونه 4 مشهود است که به معنی بیشتر بودن سینتیک واکنش‌های کاتدی و آندی در این نمونه می‌باشد. به علاوه کمتر بودن دانسیته جریان شاخه‌های آندی و کاتدی منحنی پلاریزاسیون نمونه 3 نشانگر کمتر بودن سینتیک واکنش‌های آندی و کاتدی در این نمونه می‌باشد. نتایج استخراج شده به قرار زیر است:

در جدول (6)، βa و βc به ترتیب شیب شاخه‌های آندی و کاتدی، Ecorr (SCE) پتانسیل خوردگی نمونه‌ها، icorr دانسیته جریان خوردگی و Rp مقاومت پلاریزاسیون است. مقدار Rp (مقاومت پلاریزاسیون) از رابطه زیر بدست می‌آید [23]. مطابق این رابطه مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌ها در شکل (8) نشان داده شده است.

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3031\ I_{corr}\ (\beta_a + \beta_c)}$$



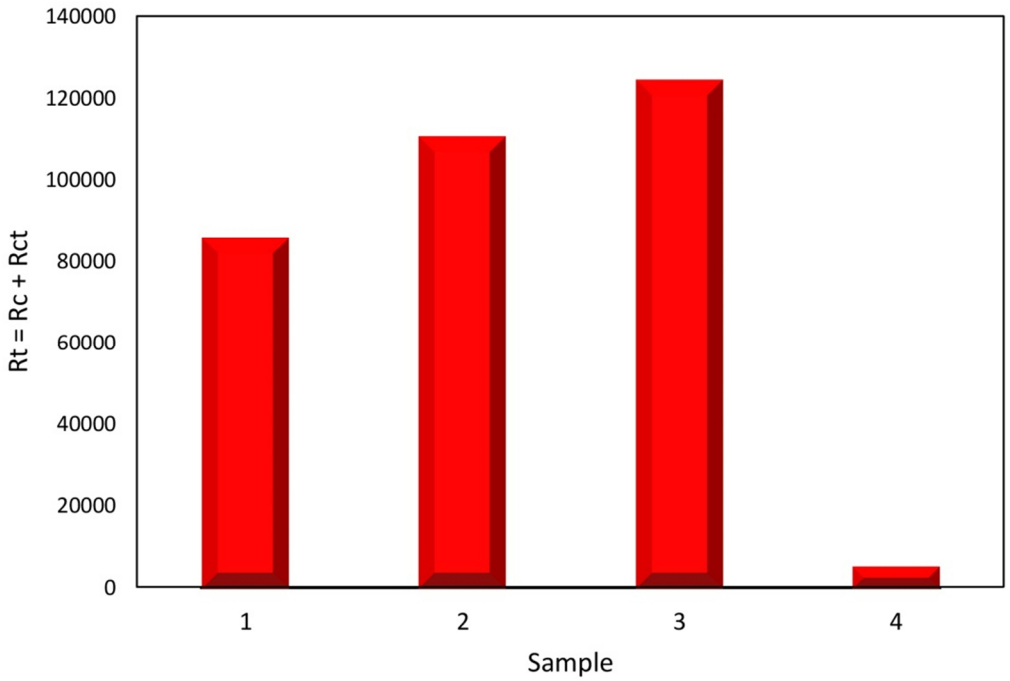
شکل5- مدار معادل نمودارهای دو ثابت زمانه

همانگونه که از شکل (8) نیز مشخص است، مقاومت پلاریزاسیون نمونه 3 از همه نمونه‌ها بیشتر و مقاومت نمونه 4 از بقیه کمتر است که این نتایج در تایید نتایج حاصل از آزمون امپدانس می‌باشد. همچنین با توجه به رابطه مستقیم سرعت خوردگی با چگالی جریان خوردگی، مطابق جدول (6)، نمونه 3 دارای کمترین و نمونه 4 دارای بیشترین سرعت خوردگی می‌باشد. با توجه به نتایج حاص از آزمون امپدانس و پلاریزاسیون نمونه 3 با پارامتر های جوشکاری Im= 68.57 ، (t_B=0.075) و (t_P = 0.03) دارای مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به سه نمونه دیگر بوده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 5- نتایج حاصل از آزمایش امپدانس

R_s ($ohm.cm^2$)	$Y0_c$ ($ohm^{-1}cm^{-2}$)	n_1	R_c ($ohm.cm^2$)	$Y0_{dl}$ ($ohm^{-1}cm^{-2}$)	n_2	R_{ct} ($ohm.cm^2$)	نمونه
8/83	$9/67\times10^{6-}$	0/92	689	$5/62\times10^{6-}$	0/81	85130	1
8/76	$8/57\times10^{-6}$	0/77	54940	$3/40\times10^{5-}$	0/78	55710	2
9/52	$5/87\times10^{6-}$	0/91	292	$6/31\times10^{6-}$	0/78	124100	3
8/37	$1/08\times10^{-5}$	0/74	986	$4/41\times10^{-6}$	1	4322	4



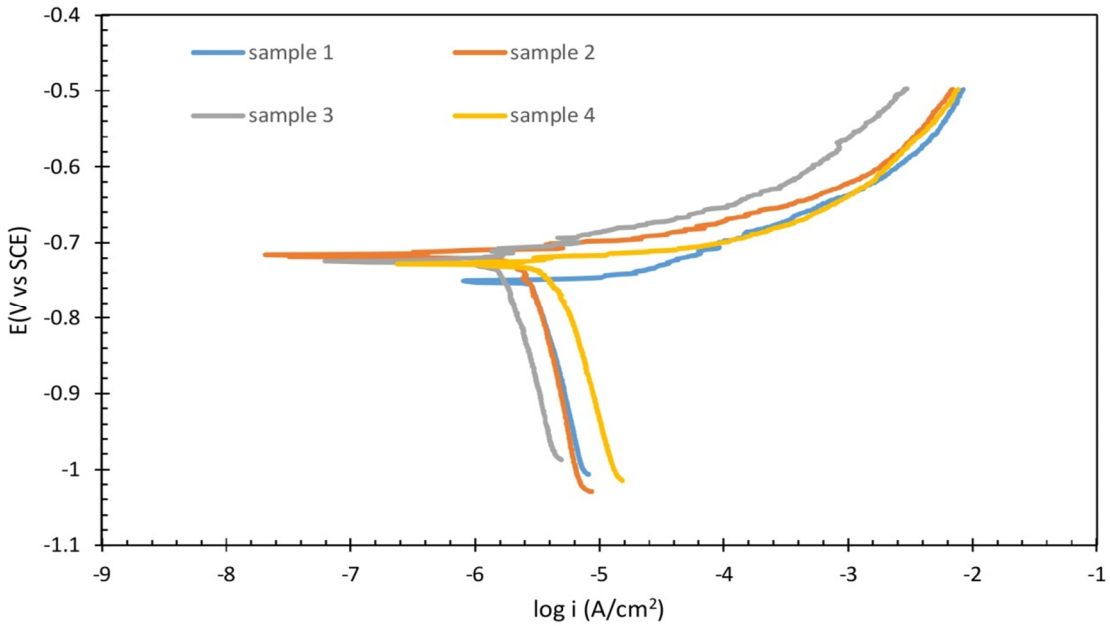
شکل6- نمودارهای مربوط به مقاومت کل (R_t) نمونه‌های مورد بررسی

3-2- شدت جریان و ریزساختار

در بررسی صورت گرفته روی پروفیل جوش نمونه ها مشاهده می شود نمونه 1 که از جوشکاری جریان مستقیم استفاده شده است دارای برآمدگی یکنواخت جوش می باشد. اما نمونه های دیگر که در آنها از روش جوشکاری حالت پالسی استفاده شده است گرده جوش حاصل از دکمه های جوش ایجاد شده بر اثر قطع و وصل شدن جریان در حالت پالسی می باشد. مشاهده می شود با کاهش زمان جریان پیک در نمونه 4 نسبت به نمونه 3 و 2 فاصله دکمه های جوش کمتر شده است. در ادامه جهت بررسی وجود ترک در ناحیه اتصال و حفرات، تست های غیرمخرب بازرسی چشمی بروی نمونه‌ها صورت گرفت که نمونه فاقد ترک و عیب بودند.

در ادامه بررسی های ریزساختاری از آزمون متالوگرافی نشان می‌دهد که تغییرات شدت جریان حتی در مقدار کم باعث ایجاد تغییر در اندازه دانه و همچنین مقدار حرارت ورودی به نمونه می‌شود، که تاثیر آن بر ریز ساختار در شکل (9) نشان داده شده است. با کاهش جریان اندازه دانه در مناطق جوش و منطقه متاثر از حرارت کاهش پیدا می‌کند. از طرفی در جوشکاری پالسی میزان حرارت ورودی به دلیل زمان کمتر اعمال جریان و همچنین خارج شدن حرارت هنگام زمان قطع پالس، کاهش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل7- منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های مورد بررسی

جدول6- نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون

β_a ($v.dec^{-1}$)	$-\beta_c$ ($v.dec^{-1}$)	E_{corr} SCE (V)	R_p ($Kohm.cm^2$)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	نمونه
0/016	0/616	-0/75	2/27	2/98	1
0/007	0/879	-0/72	1/02	2/94	2
0/013	0/612	-0/72	3/39	1/63	3
0/010	0/626	-0/73	0/93	4/59	4

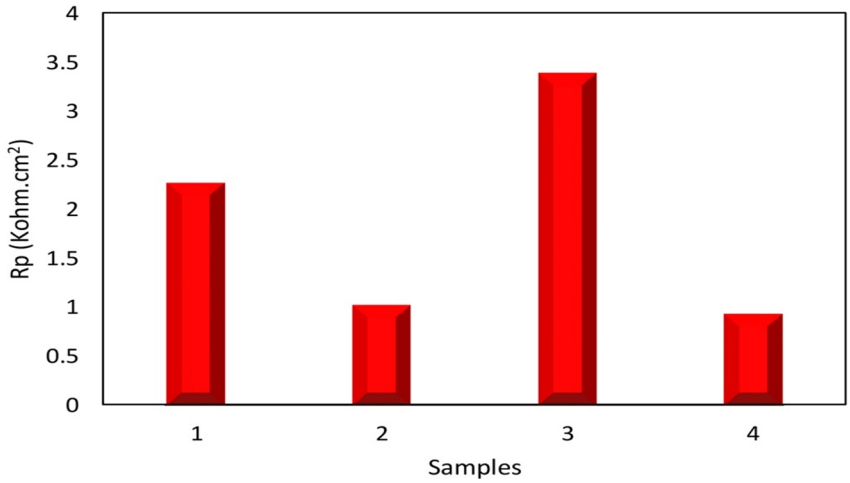
می‌یابد که باعث کاهش اندازه دانه قطعات جوشکاری به روش قوسی تنگستن - گاز پالسی نسبت به روش جریان مستقیم می‌گردد.

کاهش شدت جریان و حرارت ورودی باعث می‌شود که دانه‌ها در حین انجماد کمتر اجازه رشد داشته باشند و ساختار نهایی جوش ناشی از انجماد در منطقه جوش به سمت ریز شدن دندریت‌ها رود. اما در منطقه متاثر از حرارت بدلیل افزایش درجه حرارت و افزایش گرادیان حرارتی دندریت‌ها زمان بیشتری را برای رشد داشته و در نهایت در این منطقه منجر به رشد دانه می‌شوند که در شکل (10) افزایش اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت کاملا مشاهده می‌شود.

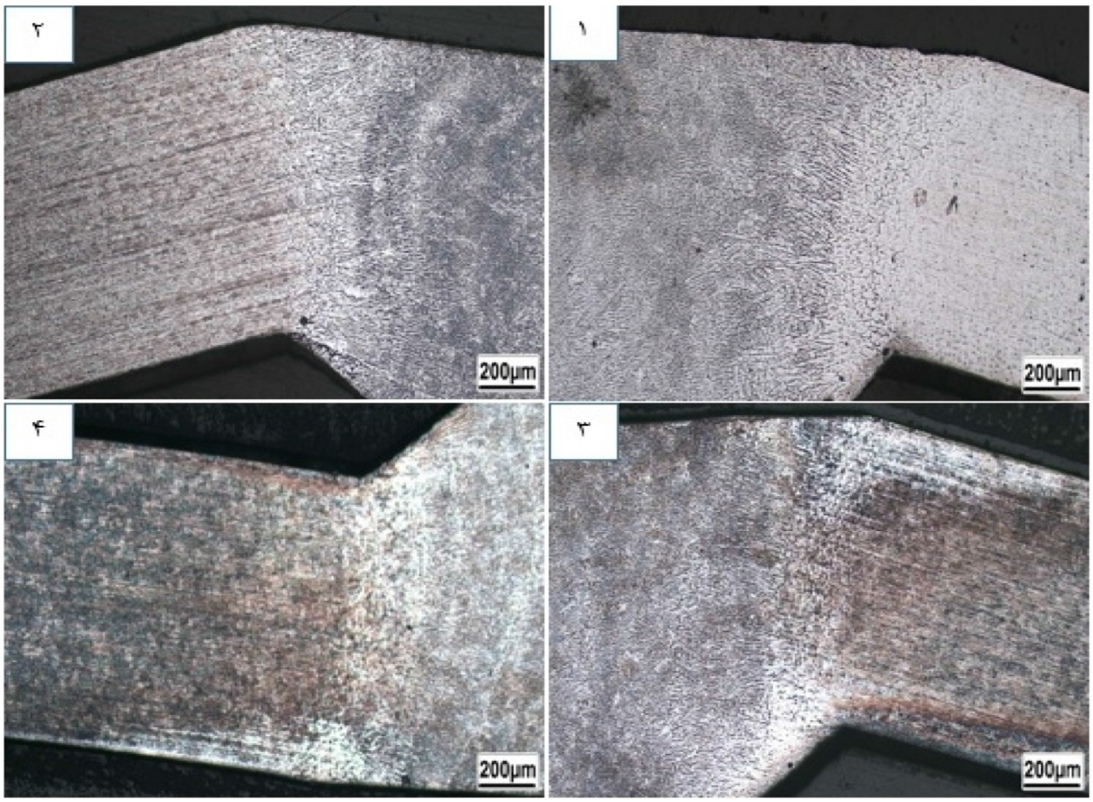
همانطور که در شکل (9) مشاهده می‌شود در نمونه‌های 2، 3 و 4 بدلیل تغییر فرآیند جوشکاری از جریان مستقیم به حالت جریان پالسی که باعث کاهش حرارت ورودی و سرعت سرد شدن بالاتر در این نمونه‌ها می‌شود، دانه‌بندی در ریزساختار نمونه‌ها ریزتر می‌شود و با کاهش اندازه دانه روبرو می‌شود و همانطور که گفته شد با حرکت به سمت منطقه متاثر از حرارت در هر یک از نمونه‌ها به دلیل افزایش حرارت ورودی در این مناطق و زمان کافی برای رشد دانه‌ها، ساختار درشت دانه‌تری در این مناطق مشاهده می‌شود.

در بررسی دانه بندی نمونه ها به صورت تنها مشاهده می‌شود که نمونه‌های جوشکاری شده به روش جوشکاری پالسی به دلیل زمان جریان ورودی کمتر ریزدانه‌تر از حالت جریان مستقیم می‌باشند. همچنین در میان نمونه های 2، 3 و 4 که به روش جوشکاری پالسی آماده شده‌اند. مشاهده می‌شود نمونه 4 با کمترین زمان جریان پیک دارای ریزدانگی بیشتر نسبت به نمونه 3 و همچنین نمونه 3 ریزدانگی بیشتری نسبت به نمونه 2 داراست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل8- نمودار تغییرات مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌های مورد بررسی



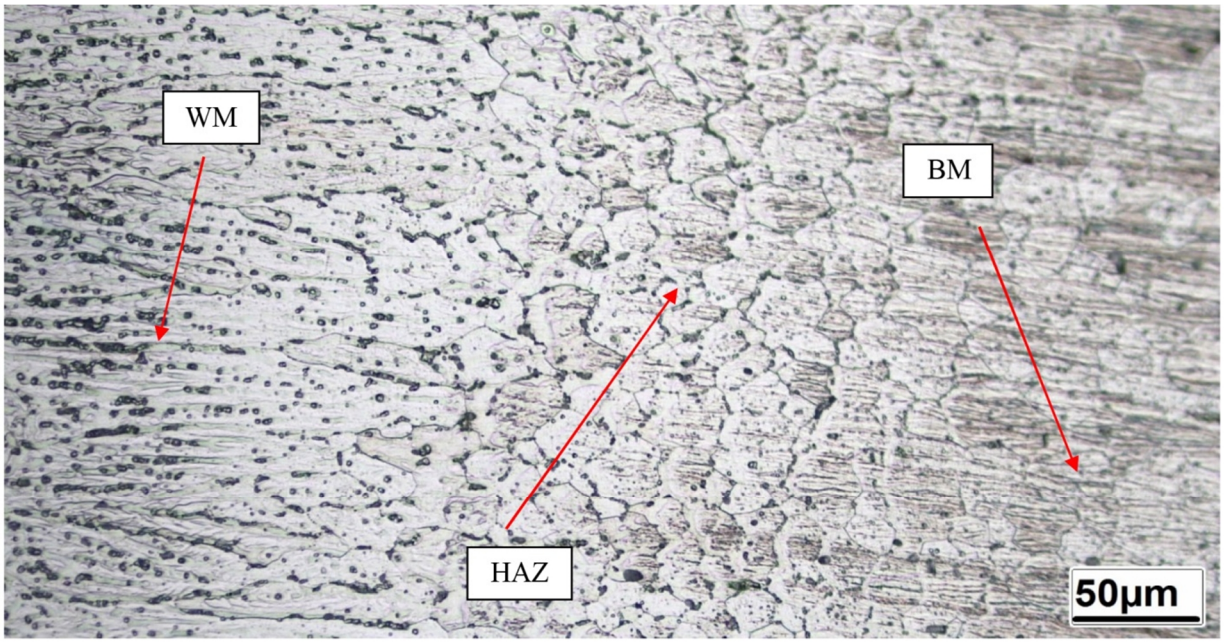
شکل 9- تصویر میکروسکوپی نوری نشان دهنده تاثیر تغییر جریان و حرارات ورودی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده

انتظار می‌رود همواره با کاهش زمان پیک و کاهش جدیان ورودی متناسب با آن کاهش حرارت ورودی اندازه دانه کاهش پیدا کند.

3-3- نتایج آزمایش کشش

در حین آزمایش کشش همه نمونه‌ها جوشکاری شده از ناحیه متأثر از حرارت که دارای ریزساختار درشت‌دانه‌تری نسبت به بقیه مناطق بود، شکسته شدند. در کلیه نمونه‌ها شکست به صورت مورب و با زاویه 30 – 60 درجه رخ داد، در این جوشکاری پارامترهای اولیه از قبیل: ولتاژ، ضخامت نمونه، طول جوش برای همه نمونه‌ها و همچنین پیک جریان بالایی و پایینی برای نمونه‌های جوشکاری پالسی ثابت بوده است. اما به علت

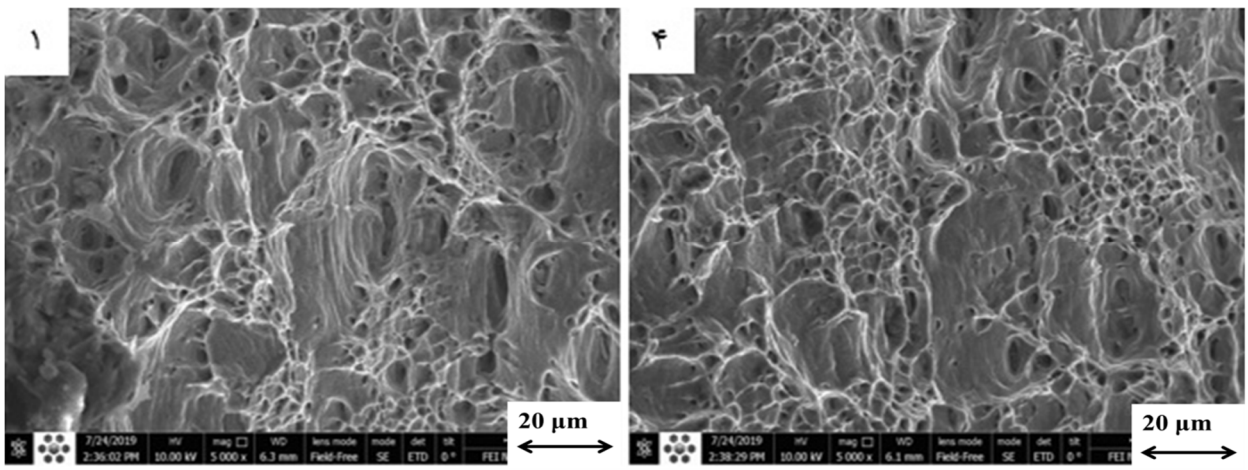
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 10- تصویر میکروسکوپی نوری نشان دهنده تاثیر تغییر جریان و حرارات ورودی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده

جدول7- نتایج حاصل از آزمایش کشش

نمونه	درصد ازدیاد طول	طول نهایی mm	طول اولیه mm	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مساحت (mm^2)	ضخامت (mm)	عرض (mm)
1	13/5	16/940	14/9	166/55	92/851	6/149	1/03	5/97
2	12/7	16/980	15/1	166/49	94/993	6/159	1/03	5/98
3	12/14	16/900	15/1	175/00	97/718	6/079	1/02	5/96
4	12/98	16/970	15/0	181/58	103/160	6/089	1/02	5/97



شکل11- شکست نگاری از سطح شکست نمونه در آزمون کشش

تفاوت زمان در جریان زمینه و بالایی، میزان جریان ورودی و متناسب با آن میزان حرارت ورودی متغیر بوده است.

جوش‌های پالسی نسبت به غیر پالسی ریزساختار ریزتری دارند و همچنین با کاهش جـریـان ورودی انـدازه دانه کاهش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

و استحکام افزایش می‌یابد. مشخصات نمونه‌های کشش ایجاد شده و نتایج حاصل از آزمایش کشش در جدول (7) قابل مشاهده است.

همانطور که در جدول (7) دیده می‌شود نمونه 4 نسبت به سه نمونه دیگر استحکام بالاتری را از خود نشان می‌دهد و نمونه 1 دارای کمترین استحکام تسلیم می‌باشد،که دلیل آن کاهش اندازه دانه در ریزساختار نمونه 4 به علت سرعت سرمایش بیشتر از بقیه نمونه‌ها و همچنین حرارت ورودی کمتر می‌باشد.

شکل (11) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. از آنجایی که در هر دو حالت جوشکاری پالسی و متناوب نمونه‌ها از قسمت منطقه متأثر از حرارات شکسته شدند، در نتیجه سطح مقطع شکست یکی از نمونه‌های جوشکاری پالسی (نمونه 4) و سطح مقطع شکست نمونه جوشکاری در حالت متناوب (نمونه 1) مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود این سطح شکست مشخصه‌های شکست نرم را نشان می‌دهد، حفرات و دیمپل‌ها در ساختار به چشم می‌خورند و همچنین در این سطوح خطوط سیلان مشخص بوده و حالت پیوسته دارد. حضور دیمپل‌های درشت و حفرات قیفی شکل در سطح شکست، نشان می‌دهد که شکست کاملا بصورت نرم اتفاق افتاده است.

4- نتیجه‌گیری

- نمونه‌های جوشکاری شده در حالت پالسی به‌علت سرعت سرمایش بالاتر نسبت به حالت متناوب دارای استحکام بالاتری هستند.

- با کاهش زمان برقراری قوس در جریان پیک و جریان زمینه، میزان جریان ورودی کم می‌شود و متناسب با آن میزان حرارت ورودی نیز کاهش پیدا می‌کند و با کاهش اندازه دانه در ریزساختار موجب به افزایش استحکام می‌گردد.

- مشاهده می‌شود با تغییر حالت جوشکاری از متناوب به پالسی، مقاومت به خوردگی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد به شکلی که مقاومت به خوردگی در نمونه 2 بیشتر از 1 و در نمونه 3 بیشتر از 2 می‌باشد، اما این روند به صورت خطی نمی‌باشد، مشاهده می‌شود در نمونه 4 با کاهش زمان برقراری قوس در جریان پیک و زمینه، مقاومت به خوردگی به شدت کاهش پیدا می‌کند.

- همه نمونه‌ها از منطقه‌ی متاثر از حرارت شکسته شده‌اند و شکست‌نگاری از سطوح نمونه‌ها نشان می‌دهد شکست به صورت کاملا نرم رخ داده است.

منابع

[1] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys*. Woodhead publishing, 2002.

[2] N.R. Mandal, *Aluminium welding*. Woodhead publishing, 2001.

[3] J.J.A.I. Bray, Materials Park, OH, "ASM Handbook, vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", p. 29-61, 1990.

[4] H. Bakar and A.J.A.i. Handbook, Materials Park, Ohio, "Volume 3 Alloy Phase Diagrams", 1992.

[5] T. Anderson, *Welding Aluminum: Questions and Answers: a Practical Guide for Troubleshooting Aluminum Welding-related Problems*. American Welding Society, 2008.

[6] M.I. Khan, *Welding science and technology*. New Age International, 2007.

[7] T.S. Kumar, V. Balasubramanian, M.J.M. Sanavullah and design, "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy", vol. 28, no. 7, p. 2080-2092, 2007.

[8] M. Oraei, H. Mostaan and M.J.I.J.o.M.R. Rafiei, "The effect of Al2O3 reinforcement particles on the corrosion behavior of Al (Zn) solid solution matrix ,"vol. 109, no. 11, p. 1020-1026, 2018.

[9] D. Féron, *Corrosion behaviour and protection of copper and aluminium alloys in seawater*. Elsevier, 2007.

[10] E. Ghali, *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing*. John Wiley & Sons, 2010.

[11] R. Calcraft, M.A. Wahab, D. Viano, G. Schumann, R. Phillips and N.J.J.o.M.P.T. Ahmed, "The development of the welding procedures and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

fatigue of butt-welded structures of aluminium-AA5383", vol. 92, p. 60-65, 1999.
[12] S .Katsas, J. Nikolaou, G.J.M. Papadimitriou and design, "Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx aluminium alloys and their effect on the mechanical properties", vol. 27, no. 10, p. 968-975, 2006.
[13] N. Karunakaran and V.J.T.o.N.M.S.o.C. Balasubramanian, "Effect of pulsed current on temperature distribution, weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints", vol. 21, no. 2, p. 278-286, 2011.
[14] A. Kumar, S.J.M. Sundarrajan and Design, "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments", vol. 30, no. 4, p. 1288-1297, 2009.
[15] C. Weisman, *Welding handbook*. American Welding Society, 1976.
[16] P. Giridharan and N.J.T.I.J.o.A.M.T. Murugan, "Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets", vol. 40, no. 5-6, p. 478-489, 2009.
[17] A. O'Brien and C. Guzman, *Welding Handbook: Materials and Applications*. American Welding Society., 2011
[18] E.J.A.b.o.A.s.A. ASTM, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", 2001.
[19] J.R.J.A.o.b.e. Macdonald, Impedance spectroscopy, vol. 20, no. 3, p. 289-305, 1992.
[20] A. A. Javidparvar, R. Naderi, and B. Ramezanzadeh, "L-cysteine reduced/functionalized graphene oxide application as a smart/control release nanocarrier of sustainable cerium ions for epoxy coating anti-corrosion properties improvement," Journal of Hazardous Materials, vol. 389, p. 122135, May 2020.
[21] A. A. Javidparvar, R. Naderi, and B. Ramezanzadeh, "Manipulating graphene oxide nanocontainer with benzimidazole and cerium ions: Application in epoxy-based nanocomposite for active corrosion protection," *Corrosion Science*, p. 108379, 2019.
[22] T. Stimpfling *et al.*, "Amino Acid Interleaved Layered Double Hydroxides as Promising Hybrid Materials for AA2024 Corrosion Inhibition," *European Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 2016, no. 13–14, pp. 2006–2016, 2016.
[23] L. B. Boinovich *et al.*, "Corrosion resistance of composite coatings on low-carbon steel containing hydrophobic and superhydrophobic layers in combination with oxide sublayers," *Corrosion Science*, vol. 55, pp. 238–245, 2012.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]