E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



Microstructural engineering of crack-free and corrosion-resistant weld interfaces in gray cast iron surface repairs using IP-GMAW

V. Ziaei Laleh, H. Hamed Zargari*, S. Mahdavi, H. Rashedi
Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Received 17 February 2026 ; Accepted 12 May 2026

Abstract

Welding is one of the methods of surface repair of cast irons. In this study, surface repair of gray cast iron was first performed by gas metal arc welding method with ER70S-6 welding wire under inter-pulse current, heat input of 393 J/mm and dilution of 17%. Also, to compare the results, two samples were welded with ENi-CI and E6013 covered electrodes. Microstructural studies showed that the microstructure of the interface of the sample is composed of martensite with fine lathes and upper bainite. Despite the presence of cementite (Fe_3C) next to alpha iron (α-Fe) in the interface area, the formation of incomplete mixing zone with bainite lathes in the ferrite zone has led to increased toughness and prevented crack formation. The hardness of the ER70S-6 sample was similar to that of the E6013 sample at the interface, at about 809 Vickers, which is 334 Vickers higher than the hardness of the ENi-CI sample. The results of the open circuit potential and potentiodynamic polarization tests showed that the ER70-CI sample, with a corrosion potential and current of -653 mV and 6.8 μA/cm^2, had a higher polarization resistance and was more resistant to galvanic corrosion than the ENi-CI sample (-622 mV and 8.9 μA/cm^2).

Keywords: Gray cast iron, Pulsed Gas metal arc welding, Steel electrode ER70S-6, Surface repair, Galvanic corrosion.

*Corresponding Author: H. Hamed Zargari, hhamedzargari@sut.ac.ir.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



مهندسی ریزساختار فصل مشترک جوش مقاوم به ترک و خوردگی حین ترمیم سطحی چدن خاکستری با استفاده از جوشکاری IP-GMAW

وحید ضیائی لاله، حبیب حامدزرگری *، سهیل مهدوی، حجت راشدی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1404/11/28 ؛ پذیرش مقاله: 1405/02/22

چکیده

جوشکاری یکی از روش‌های تعمیر سطحی چدن‌ها می‌باشد. در این پژوهش تعمیر سطحی چدن خاکستری نخستین بار توسط روش جوشکاری قوس-فلز با سیم جوش ER70S-6 تحت جریان اینترپالسی، حرارت ورودی 393 J/mm و رقت 17 درصد انجام شده است. همچنین جهت مقایسه نتایج، دو مورد نمونه با الکترود روپوش‌دار ENi-CI و E6013 جوشکاری شد. مطالعات ریزساختاری نشان داد که ریزساختار فصل مشترک نمونه از مارتنزیت با تیغه‌های ظریف و بینیت بالایی تشکیل شده است. علی‌رغم وجود فاز کاربید آهن (Fe_3C) در کنار آهن آلفا (α-Fe) در ناحیه فصل مشترک، تشکیل ناحیه اختلاط ناقص با تیغه‌های بینیتی در زمینه فریتی منجر به افزایش چقرمگی و مانع از تشکیل ترک شده است. سختی نمونه ER70S-6 مشابه با نمونه E6013 در فصل مشترک در حدود 809 ویکرز به‌دست آمد که از سختی نمونه ENi-CI، 334 ویکرز بیشتر می‌باشد. نتایج آزمون‌های پتانسیل مدار باز و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان دادند که نمونه ER70-CI با پتانسیل و جریان خوردگی 653 mV- و 6/8 $\mu A/cm^2$ نسبت به نمونه ENi-CI (622 mV- و 8/9 $\mu A/cm^2$) مقاومت پلاریزاسیون بالایی داشته و در برابر خوردگی گالوانیک مقاوم‌تر است.

کلمات کلیدی: چدن خاکستری، جوشکاری سیم و قوس پالسی، الکترود فولادی ER70S-6، تعمیر قطعات چدنی، خوردگی گالوانیک.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: حبیب حامدزرگری، hhamedzargari@sut.ac.ir.

1- مقدمه

چدن یک آلیاژ آهن-کربن است که اغلب در قطعات صنعتی نظیر بدنه موتور، چرخ‌های طیار، خطوط لوله و تجهیزات کشاورزی استفاده می‌شود. از مزایای چدن‌ها می‌توان به نقطه ذوب پایین، سیالیت بالا، قابلیت ماشینکاری و قیمت پایین اشاره کرد [1]. شکستگی یا پارگی در قطعات صنعتی ساخته شده از چدن، یک پدیده رایج می‌باشد که نیازمند تعمیر فوری بوده تا چرخه تولید و مصرف متوقف نشود [2]. در این راستا جوشکاری قطعات چدنی به دلایل زیر اهمیت می‌یابد: (الف) تعمیر سطحی عیوب ریخته‌گری یا تراشکاری مانند حفرات گازی سطح قطعه و ترک‌های موضعی و (ب) تعمیر قطعات فرسوده و دچار سایش شده که تعویض آن از نظر اقتصادی مقروم به صرفه نبوده و یا دسترسی به فناوری تولید آن وجود ندارد [3]. با این وجود یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

از چدن‌ها، قابلیت ضعیف جوشکاری آن‌ها است [4]. جوش‌پذیری چدن‌ها به عوامل مختلفی از جمله نوع چدن، ترکیب شیمیایی چدن، ترکیب شیمیایی فلز پرکننده، ساختار زمینه اولیه و فرایند جوشکاری بستگی دارد [5].

در چدن خاکستری، میزان حلالیت بالای کربن (2/75 تا 4 درصد) در آستنیت، منجر به رسوب گرافیت‌ها به‌صورت لایه‌ای می‌شود. مقدار گرافیت‌های لایه‌ای موجود در زمینه چدن و توزیع آن‌ها نقش اساسی در خواص مکانیکی و کاربرد چدن تولید شده را دارد [6]. گوگرد، کربن، فسفر و نایوبیم عواملی هستند که احتمال ترک گرم را در قطعات جوشکاری شده، تقویت می‌کنند. همچنین نفوذ هیدروژن در کنار کربن معادل بالا از عوامل اصلی ترک سرد در چدن‌ها می‌باشند [7]. به طور کلی محتوای بالای کربن در چدن‌ها منجر به تشکیل فازهای سخت و شکننده، یعنی مارتنزیت و کاربیدها در ناحیه ذوب (FZ)، ذوب جزئی (PMZ) و متاثر از حرارت (HAZ) می‌شود. کاربید و مارتنزیت که هر دو سخت و شکننده هستند، برای شکل‌پذیری، چقرمگی و قابلیت ماشینکاری جوش مضر بوده و همچنین ممکن است باعث ترک خوردگی در اتصال شوند [5]. به منظور بهبود جوش پذیری، راهکارهایی برای پیشگیری از ایجاد ترک مانند پیش گرم و پس‌گرم کردن، فرایندهای آماده سازی و تمیزکاری سطحی پیشنهاد شده است [7،8]. پیش‌گرم کردن قطعه چدنی قبل از جوشکاری، جهت کاهش شیب دمایی، کنترل دمای بین پاسی، کاهش تنش‌های انقباضی و انبساطی، تشکیل کاربید در فلز جوش و تشکیل مارتنزیت در ناحیه HAZ انجام می‌شود [9].

چدن خاکستری ذاتا شکننده است و اغلب نمی‌تواند در برابر تنش‌های ایجاد شده ناشی از سرمایش جوش، مقاومت کند. لایه‌های درشت گرافیت در چدن خاکستری منجر به تشکیل ترک و کاهش شکل‌پذیری آن می‌شوند [5]. یک روش رایج برای جوشکاری تعمیری چدن‌ها، استفاده از روش جوشکاری قوسی فلز پوشش دار (SMAW) است. این روش نسبتاً ارزان و آسان است. در این روش، معمولاً از فلز پرکننده فولاد کم کربن برای تعمیر نواحی آسیب‌دیده استفاده می‌شود. با این حال، در صورت استفاده از مواد پرکننده غیر هم جنس با فلز پایه (مانند الکترود نیکلی)، خطر خوردگی گالوانیکی افزایش یافته و جوشکاری باید در شرایط کنترل‌شده انجام شود [10]. انتخاب فلز پرکننده برای جوشکاری چدن‌ها با توجه به مشابهت خواص مکانیکی آن با چدن، بسیار مهم است. به‌دلیل غلظت بالای گرافیت در چدن‌ها و مشکلات فوق الذکر جوشکاری چدن‌ها، نیازمند در نظر گرفتن شرایط خاص فرایندی می‌باشد [2]. ترکیب شیمیایی الکترود مصرفی در جوشکاری چدن‌ها نقش مهمی دارد. متغیرهای مختلفی در انتخاب الکترود مورد نظر برای جوشکاری چدن‌ها دخیل هستند که عبارتند از: نوع چدن با نحوه توزیع گرافیت در آن، خواص مکانیکی مدنظر، قابلیت ماشینکاری، نوع روش جوشکاری، تطابق رنگ از نظر ظاهری با فلز پایه، مقاومت به خوردگی و مقرون‌به‌صرفه بودن [8]. به طورکلی سه نوع فلز پرکننده برای جوشکاری چدن‌ها وجود دارند که عبارتند از: فلز پرکننده فولاد کم کربن، فلز پرکننده پایه نیکل و نیکل-آهن.

در تعمیر سطحی چدن‌ها به روش جوشکاری، درصورتی که نیاز به ماشینکاری نباشد، می‌توان از الکترودهای فولادی کم کربن (E6013) و کم هیدروژن (E7018) استفاده کرد. الکترود پایه نیکلی بیش‌ترین کاربرد را در جوشکاری چدن‌ها داشته و با توجه به حد حلالیت بالای کربن هنگامی که نیکل به واسطه فلز پایه رقیق شود، کربن اضافی آن حین انجماد پس زده شده و گرافیت تشکیل شده و فلز جوش نیکلی باقی می‌ماند. ذکر این نکته ضروری است که انبساط حجمی حین تشکیل گرافیت با انقباض ناشی از انجماد جبران می‌شود [5]. الکترودهای فولادی ارزان‌ترین و الکترودهای نیکلی گران‌ترین الکترود می‌باشند. از نظر خواص مکانیکی الکترودهای نیکلی نسبت به الکترودهای فولادی ضعیف هستند ولی چقرمگی بالایی دارند که از ایجاد و گسترش ترک جلوگیری کرده و با تشکیل پیوند بین نیکل با کربن باعث عدم تشکیل کاربید آهن می‌شود. اگر قطعه چدنی مورد جوشکاری شده در کابردهای تنش بالا استفاده می‌شود، بهتر است از الکترودی که ترکیب شیمیایی و خواص نزدیک به فلز پایه را دارد، استفاده شود [11]. جوشکاری چدن با الکترود

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

فولادی باعث ایجاد مشکلات متالورژیکی جوش می‌شود که عبارتند از: (الف) در طول انجماد ناحیه جوشکاری شده، فولاد بیش‌تر از چدن خاکستری منقبض می‌شود؛ بنابراین، تنش‌های کششی ایجاد شده در FZ می‌تواند آن را مستعد ترک خوردگی ناشی از انقباض کند و (ب) علی‌رغم رقیق شدن الکترود فولادی با چدن پرکربن، میزان کربن FZ برای تشکیل محصول سخت و شکننده در FZ کافی است. این امر مقاومت به ضربه‌ی قطعه جوش داده شده را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ناتوانی FZ در تسلیم و رفع تنش‌های جوشکاری می‌تواند منجر به ترک خوردگی در منطقه متاثر از حرارت چدن مجاور شود. بنابراین، استفاده از الکترودهای فولادی باید به مواردی محدود شود که اتصال تحت خمش قرار نمی‌گیرد. به‌دلیل سختی بالا در نواحی FZ و HAZ، پیش‌گرمایش و عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) مورد نیاز است. پیش‌گرمایش با کاهش سرعت خنک شدن، منجر به جلوگیری از تشکیل ریزساختار سخت و ترد در نواحی FZ و HAZ می‌شود. دمای پیش گرمایش معمولاً در محدوده 300 تا 600 درجه سانتی‌گراد است [5].

پورانوری [5] در پژوهشی روی ریزساختار جوش چدن خاکستری با الکترود نیکلی طبق شرایط جوشکاری با جریان اسمی 120 A تحت قطبیت معکوس (DCEP)، ضخامت الکترود 4 mm و با سرعت جوشکاری 100 mm/min نشان داد که بدون عملیات پیش گرمایش می‌توان صرفا با انجام عملیات PWHT از تشکیل فازهای سخت و شکننده در نواحی HAZ و PMZ جلوگیری کرد.

موسویان و همکاران [12] به بررسی جوشکاری چدن خاکستری با ساخت الکترود توپودری فولادی پرداخته‌اند. بدین منظور چندین الکترود توپودری با ترکیب‌های مختلف ساخته شده و اثر آن بر روی جوش در شرایط یکسان، برای رسیدن به ترکیب بهینه بررسی شد. نمونه‌ها در سه حالت بدون پیش‌گرم، پیش‌گرم شده در دمای 350 درجه سانتی‌گراد بدون آنیل بعد از جوشکاری و با عملیات آنیل بعد از جوشکاری تهیه شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عملیات آنیل پس از جوشکاری باعث بهبود ریزساختار و نتایج سختی می‌شود و از میزان تردی و شکنندگی ناحیه جوش می‌کاهد.

انارکی و همکاران [13] طی مطالعه‌ای روی جوشکاری چدن خاکستری با الکترود نیکلی نشان دادند که افزایش دمای پیش‌گرم از 300 به 600 درجه سانتی‌گراد در مدت زمان 30 دقیقه، سبب کاهش میزان تشکیل کاربید در فلز جوش شده و از طرفی میزان تشکیل مارتزیت در اطراف منطقه جوش را نیز کاهش می‌دهد. این مورد در پیشگیری از بروز ترک سرد بسیار موثر است. از طرفی گرافیت‌های ناحیه HAZ را از نوع D به E تبدیل می‌کند و ریزساختاری بهتر با گرافیت‌های ریز به همراه سختی و استحکام بالا ارائه می‌دهد.

شایان و همکاران [14] به بررسی ریزساختار و جوش پذیری چدن خاکستری با سه الکترود ENi-CI، ENiFe-CI و E7018 در چهار حالت جوشکاری (نمونه 1 با الکترود ENi-CI، نمونه 2 با الکترود ENiFe-CI، نمونه 3 با پاس پرکننده E7018 و با آسترکشی الکترود ENi-CI و نمونه 4 با پاس پرکننده الکترود E7018 و با آسترکشی الکترود ENiFe-CI) پرداختند و مشاهده کردند که جوشکاری با الکترود ENiFe-CI در هر دو حالت منجر به ایجاد آخال و حفره شده درحالی‌که بهترین حالت جوشکاری استفاده از پاس‌های پرکننده با الکترود E7018 و آسترکشی با الکترود ENi-CI می‌باشد که به‌دلیل ریزساختار بینیتی، سختی بالایی نیز دارد.

این پژوهش برای نخستین بار با بهینه سازی ریزساختار لایه نفوذی جوش نمونه چدن خاکستری توسط روش جوشکاری قوس-فلز با گاز محافظ تحت جریان اینترپالسی (IP-GMAW) با سیم جوش ER70S-6 انجام شده است. این کار با هدف جلوگیری از تشکیل ترک در نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده با الکترود فولادی E6013، کاهش هزینه‌های جوشکاری با الکترود ENi-CI، عملیات حرارتی پیش‌گرم و پس‌گرم انجام شد. مطالعات ریزساختاری نمونه‌های جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری (OM) و الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. همچنین از آزمون ریزسختی جهت مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌ها و از آزمون پتانسیل مدار باز

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

(OCP) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP) برای مطالعه خواص خوردگی گالوانیک نمونه‌ها استفاده شد.

2- مواد و روش پژوهش

در این مطالعه نمونه‌های چدن خاکستری در ابعاد 30 در 60 میلی‌متر مربع با ضخامت 10 میلی‌متر تهیه و جهت تمیزکاری و از بین بردن آلودگی‌های سطحی از قبیل روغن و اکسید محیطی از سیم برس فولادی و شست و شو با استون استفاده شد. سپس با استفاده از ابزار الماسه با دور کنترل شده، عیوب مصنوعی در ابعاد 3 در 40 میلی متر مربع و به عمق 2 میلی‌متر روی نمونه‌ها ایجاد شد. جهت جوشکاری از الکترودهای ENi-CI، E6013 به قطر 3 میلی متر و سیم جوش ER70S-6 به قطر 1/2 میلی متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و الکترودها توسط دستگاه طیف سنجی نشر نوری مشخص و در جدول(1) ذکر شده است. همچنین از گاز آرگون صنعتی با خلوص 99% با نرخ 15 L/min به عنوان گاز محافظ در فرایند IP-GMAW استفاده شد.

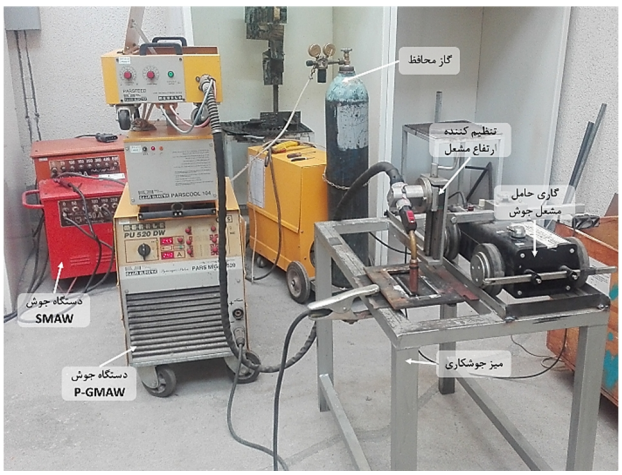
جدول1- ترکیب شیمیایی فلز پایه و الکترودهای مورد استفاده بر حسب درصد وزنی.

نمونه	فلز پایه	ENi-CI	E6013	ER70S-6
C	3/596	0/898	0/083	0/206
Si	1/186	0/695	0/324	0/205
Mn	0/498	0/597	0/357	0/709
Ni	-	≥92/000	-	-
P	0/095	0/000	0/133	0/015
S	0/051	0/000	0/133	0/018
Fe	مابقی	3/489	مابقی	مابقی

در این پژوهش مطابق شکل(1) از دستگاه جوش SMAW-350A ساخت شرکت الکترو ایران کالا برای جوشکاری با الکترود دستی استفاده شد. همچنین از دستگاه جوش سینرژیک GMAW مدل MERKLE PU520 DW تولید شرکت گام الکتریک، با قابلیت تنظیم جریان اینترپالسی به‌عنوان منبع جوشکاری استفاده شد. جهت نگه‌داری و تنظیم ارتفاع مشعل جوشکاری، از گاری ساخت KARA PEG1 Tractor که قابلیت تنظیم سرعت حرکت در جهت X (روی ریل) و تنظیم ارتفاع مشعل در جهت Z را دارد، استفاده شد.

جهت تعمیر عیوب سطحی ایجاد شده در نمونه‌های چدن خاکستری از دو روش جوشکاری استفاده شده که شرایط و متغیرهای جوشکاری به شرح زیر است: در مرحله اول، جوشکاری به روش SMAW با استفاده از جریان ثابت با قطبیت مستقیم (DCEN) توسط الکترودهای E6013 و ENi-CI به صورت تک پاس تحت جریان ثابت 95 آمپر با سرعت جوشکاری تقریبا 2 mm/s در حالت تخت انجام شد (مطابق شکل2-ج و 2-د).

جهت مقایسه بین نتایج نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود E6013، ENi-CI به روش SMAW با نمونه جوشکاری شده با سیم جوش ER70S-6 به روش GMAW متغیرهای جوشکاری تقریبا ثابت و نزدیک به هم انتخاب شده و تعمیر سطحی توسط جوشکاری بدون انجام عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم انجام شد.



شکل1- نمای کلی از تجهیزات و دستگاه‌های جوش مورد استفاده در این پژوهش.

در مرحله دوم، جوشکاری با جریان اینترپالسی با سیم جوش فولادی ER70S-6 به صورت تک پاسی در حالت تخت انجام شد (مطابق شکل2- ه). در شکل(2-ز) نمونه‌ای از اعمال سیم جوش ER70S-6 بر قطعه صنعتی دارای عیب نشان داده شده،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

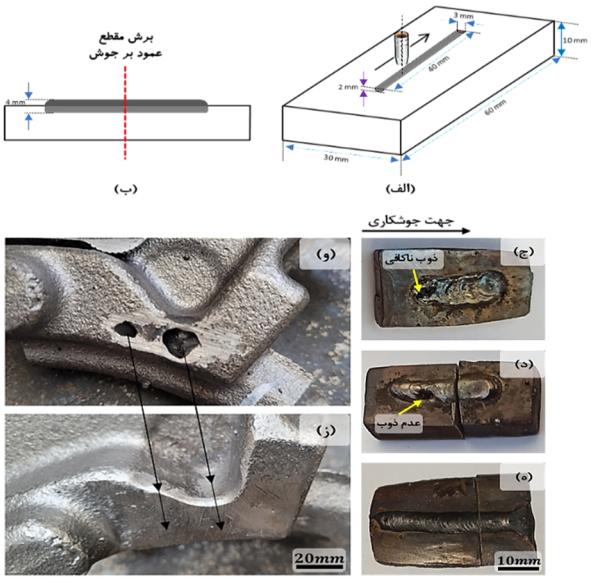
همچنین متغیرهای فرایند جوشکاری IP-GMAW در جدول(2)جدول ارائه شده است.

جدول2- متغیرهای ثابت در جوشکاری IP-GMAW.

متغیر	مقدار
جریان اسمی	95 A
جریان موثر پالسی	54 A
ولتاژ اسمی	20/8V
نرخ تغذیه سیم	4/1 m/min
فاصله مشعل از سطح قطعه	15 mm
سرعت جوشکاری	2 mm/s

2-1- بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی

نمونه‌ها پس از جوشکاری جهت بررسی ریزساختار حاصل به‌صورت عمود بر مقطع جوش، برش داده شدند (مطابق شکل2-ب). پس از طی مراحل متالوگرافی مطابق استاندارد ASTM E3 اعم از مانت سرد با رزین اپوکسی و هاردنر، سنباده زنی و پولیش، حکاکی نمونه‌ها داخل محلول نایتال 2 درصد در مدت زمان 5 ثانیه انجام شد و ریزساختار آن‌ها توسط OM مدل PMG3-OLYMPUS و SEM مدل MIRA3 FEG-SEM مجهز به فیلمان انتشار میدانی (FE) و آشکارساز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، استفاده شد.



شکل2-الف- طرحواره‌ای از آماده سازی نمونه‌های چدن خاکستری برای تعمیر سطحی به روش جوشکاری، ب- برش مقطع عمود بر جوش جهت بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی، نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده با الکترود: ج-ENi-CI، د-E6013 و ه، و، ز-ER70S-6.

جهت بررسی فازهای تشکیل شده در فصل مشترک اتصال بین فلز جوش با فلز پایه نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW، از پراش سنجی اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. این کار با تابش kα-Cu به طول موج 1/5418 Å، تحت جریان 30 mA، ولتاژ 40 kV، زاویه 2θ =10 - 110° با اندازه گام 0/05° و زمان 2s در هر گام توسط دستگاه ساخت Brucker مدل D8 Advance انجام شد. لازم به ذکر است با توجه به هدف این پژوهش، XRD صرفا از نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6 انجام شده و از بررسی فازی سایر نمونه‌ها صرف نظر شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون ریزسختی سنجی ویکرز مطابق استاندارد ASTM E384 استفاده شد. سختی سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه MDPEL-M400 در دمای محیط با اعمال نیروی 500 gf در مدت زمان 15 ثانیه از نواحی فلز پایه تا سطح جوش در چند نقطه اثر بر روی نمونه‌ها انجام شد.

2-2- بررسی رفتار خوردگی

جهت بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده با الکترود ENi-CI و سیم جوش ER70S-6 در محیط‌های کلریدی از آزمون OCP و PDP مطابق استاندارد ASTM-G71-81 استفاده شد. در این آزمون به‌دلیل مشکلات ترک خوردگی جوش حاصل از الکترود E6013، از بررسی مقاومت به خوردگی آن صرف نظر شد. برای انجام آزمون خوردگی 5 نمونه نام گذاری شده مطابق جدول(3) به عنوان الکترود کاری در ابعاد 10 در 10 در 10 میلی متر مکعب توسط وایرکات تهیه شد (مطابق شکل3- الف و3-ب).

جدول3- نام گذاری نمونه‌های مورد استفاده در آزمون خوردگی گالوانیک.

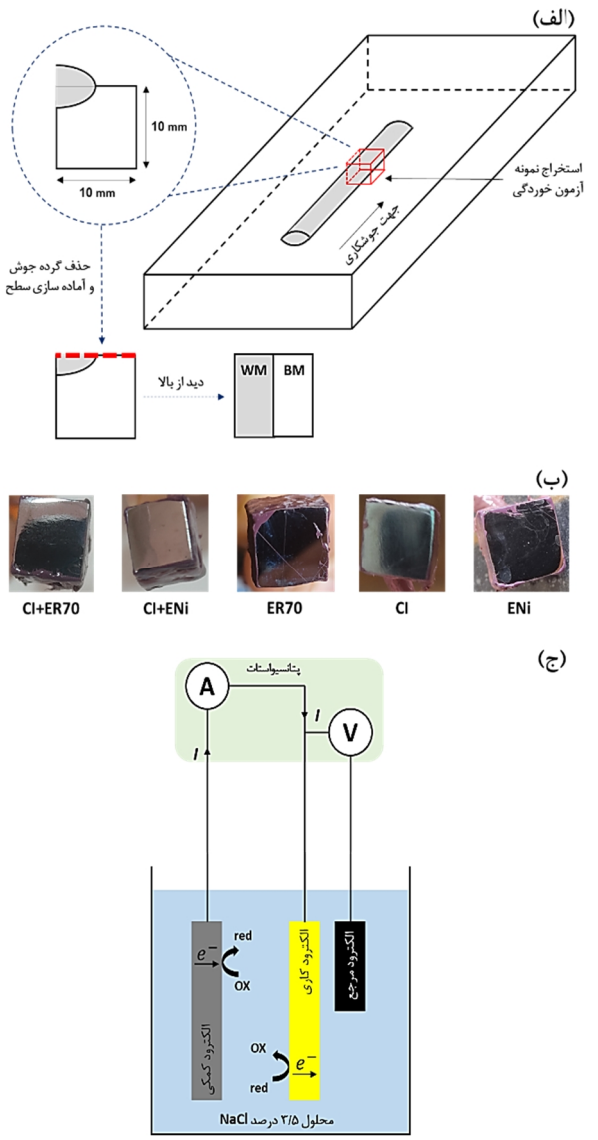
نمونه	نام گذاری
نمونه بالک نیکلی	ENi
نمونه چدن خاکستری (فلز پایه)	CI
نمونه بالک فولاد کم کربن	ER70
نمونه چدن خاکستری جوشکاری شده با الکترود نیکلی	ENi - CI
نمونه چدن خاکستری جوشکاری شده با سیم جوش فولاد کم کربن	ER70 - CI

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

لازم به ذکر است که نمونه‌های بالک ENi و ER70 در ابعاد ذکر شده به روش ساخت افزایشی تهیه شدند.

آزمون‌های خوردگی در یک سل (Cell) الکتروشیمیایی سه الکترودی شامل نمونه بعنوان الکترود کاری، الکترود مرجع Ag/AgCl و الکترود مقابل Pt با مساحت سطح یک سانتی‌متر مربع در محلول کلرید سدیم 3/5 درصد انجام شدند. شکل(3-ج) طرحواره‌ای از سل الکتروشیمیایی مورد استفاده برای آزمون‌های خوردگی را نشان می‌دهد.



شکل3-الف- موقعیت مکانی تهیه نمونه آزمون خوردگی از نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده، ب- نمونه‌های مورد استفاده در آزمون خوردگی گالوانیک و ج- طرحواره‌ای از سل آزمون خوردگی گالوانیک برای اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی.

از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات WonATech Zive SP2 برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها استفاده شد.در آزمون OCP، پتانسیل نمونه‌ها به‌صورت غوطه‌ور در محلول در مدت زمان 20 دقیقه و در هر ثانیه یک بار توسط دستگاه پتانسیواستات نسبت به الکترود مرجع اندازه‌گیری و ثبت شد. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده پتانسیل 350- تا 800+ میلی ولت نسبت به OCP با نرخ روبش یک میلی ولت بر ثانیه انجام شد. از روش برون یابی تافل برای بدست آوردن چگالی جریان و پتانسیل خوردگی استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سطح ظاهری جوش‌ها

شکل(2-ج و 2-ه) نمونه‌های بهینه‌سازی شده چدن خاکستری جوشکاری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در نمونه شکل(2-ج) که با الکترود ENi-CI به روش SMAW جوشکاری شده است، در ابتدای خط جوش عیب کمبود ذوب وجود دارد که ناشی از دشواری تشکیل قوس اولیه می‌باشد.

در نمونه شکل(2-د) که با الکترود E6013 به روش SMAW جوشکاری شده است، عیب عدم ذوب وجود دارد که ناشی از افزایش سرعت جوشکاری یا انحراف قوس در آن ناحیه می‌باشد. در نمونه شکل(2-ه) که با سیم جوش ER70S-6 به روش IP-GMAW جوشکاری شده است، عیب واضحی دیده نشد و به لحاظ بازرسی چشمی از نظر تکرارپذیری نسبت به سایر نمونه‌ها ترجیح داده می‌شود.

شکل(2-و) نمونه‌ای از قطعه چدن خاکستری با عیب حفرات انقباضی را نشان می‌دهد که در اثر عیوب احتمالی ذوب و ریخته گری ایجاد شده است. شکل(2-ز) عیب برطرف شده توسط روش جوشکاری IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6 طی چند پاس متوالی را نشان می‌دهد که پس از سنگ زنی سطح جوش، قطعه تعمیر شده از نظر ظاهری و تفاوت رنگ کیفیت مطلوبی داشته و انتظار می‌رود مصون از خوردگی گالوانیک باشد.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

3-2- محاسبه حرارت ورودی و رقت جوش

میزان حرارت ورودی (HI) در واحد طول جوش با استفاده از رابطه (1) محاسبه شده است:

$$HI(J/mm) = \eta \frac{V \times I}{TS(mm/s)} \quad (1)$$

میزان HI به نمونه‌های جوشکاری شده در روش SMAW و IP-GMAW به ترتیب در حدود 691 و 393 ژول بر میلی‌متر می‌باشد. مطابق منابع بازدهی حرارتی فرایند SMAW در حدود 70 درصد و بازدهی حرارتی فرایند GMAW پالسی، با توجه به نحوه انتقال قطره مذاب در حالت کروی با ترکیب گاز محافظ CO_2 + %95Ar 5% توسط کالری سنج نیتروژن مایع به میزان 68 درصد اندازه‌گیری شده است [15]. با توجه به اینکه در این پژوهش از گاز خالص آرگون استفاده شده است و حالت انتقال قطرات مذاب در جریان اینترپالسی به صورت کروی می‌باشد، بازدهی حرارتی فرایند 70 درصد در نظر گرفته شده است. شکل(4) طرحواره‌ای از نمونه چدن خاکستری تعمیر شده سطحی به روش جوشکاری را نشان می‌دهد که میزان رقت (D) جوش با استفاده از رابطه (2) محاسبه شده است [16]:

$$\%D = \left[\frac{B}{A + B + C}\right] \times 100 \quad (2)$$



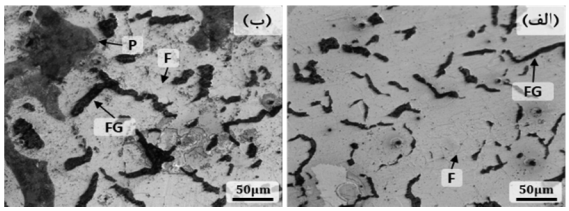
شکل4- طرحواره‌ای از نواحی مختلف نمونه‌های جوشکاری شده جهت محاسبه رقت.

میزان رقت نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده به روش SMAW با الکترود ENi-CI و E6013 به ترتیب برابر 31 و 33 درصد می‌باشند. همچنین رقت نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6، 17 درصد محاسبه شد. لازم به ذکر است که در محاسبه رقت جوش‌ها مساحت ناحیه عیب مصنوعی ایجاد شده (ناحیه A)، در نظر گرفته شده است. میزان پایین بودن درصد رقت نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده به روش SMAW، به دلیل میزان حرارت ورودی پایین (393 نسبت به 691 ژول بر میلی‌متر) و کنترل شده به خط جوش در جریان اینترپالسی می‌باشد.

3-3- بررسی تصاویر ریزساختاری

3-3-1- ریزساختار فلز پایه

شکل(5) تصاویر مکیروسکوپی نوری از ریزساختار چدن خاکستری به عنوان فلز پایه را نشان می‌دهد. نوع گرافیت‌های لایه‌ای، ابعاد، ضخامت و اندازه آن‌ها در تعیین خواص مکانیکی قطعه چدن خاکستری اثرگذار است. چرا که انتهای تیز لایه‌های گرافیتی محل مناسبی برای تمرکز تنش و جوانه‌زنی ترک می‌باشند. کاهش ضخامت لایه‌های گرافیتی منجر به افزایش ازدیاد طول می‌شود [17]. با توجه به نسبت سطح به حجم (سطح ویژه) لایه‌های گرافیتی چدن خاکستری نسبت به گرافیت‌های کروی چدن نشکن، میزان انحلال کربن از گرافیت‌های لایه‌ای در زمینه آستنیتی در دماهای بالاتر بیش‌تر می‌باشد. در نتیجه تغییرات ریزساختاری و کاهش ضخامت لایه‌های گرافیتی و ایجاد تنوع لایه‌های گرافیتی در چدن خاکستری بیش‌تر می‌باشد. در این پژوهش مورفولوژی گرافیت‌های ورقه‌ای چدن خاکستری طبق استاندارد ASTM A247 از نوع A می‌باشد که در اثر تفاوت در سرعت تبرید، قابلیت تبدیل به مورفولوژی‌های مختلف B-C-D-E می‌باشد [18].



شکل5- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه.

ساختار فلز پایه شامل ریزساختار، اندازه گرافیت‌ها، فازهای تشکیل شده و درصد آن‌ها در جدول(4) ارائه شده است.

جدول 4- ساختار چدن خاکستری به عنوان فلز پایه.

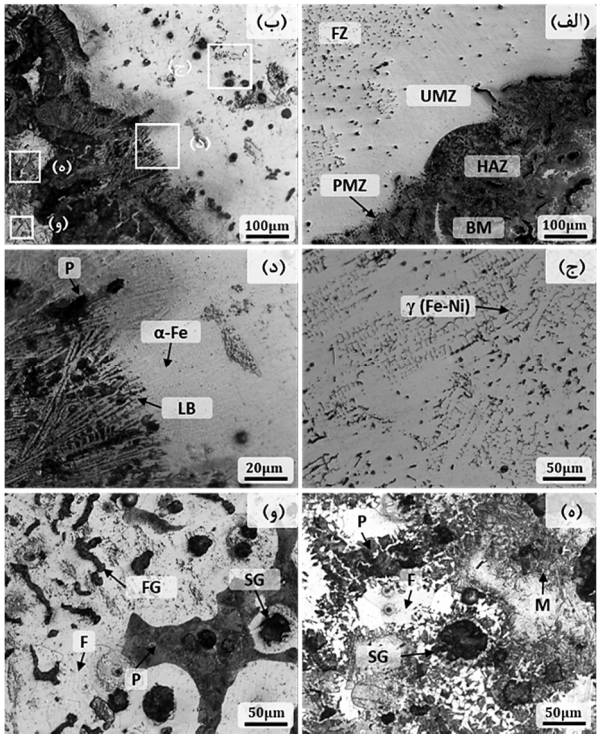
متغیر	مقدار
ریزساختار	فریتی- پرلیتی
نوع گرافیت‌ها	ورقه‌ای
اندازه گرافیت‌ها	60-30 میکرومتر
درصد فازهای تشکیل شده	F (%80) + P (%20)

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

3-3-2- ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده

شکل(6) ریزساختار نمونه چدن جوشکاری شده با الکترود ENi-CI به روش SMAW را نشان می‌دهد. در نواحی مرزی با توجه به بالابودن نرخ انتقال حرارت در چدن‌ها ریزساختارهای مختلفی قابل مشاهده می‌باشد (شکل6- الف و 6-ب). نواحی مختلف شکل(6-ب) با بزرگنمایی‌های متفاوت در تصاویر (6-ج، 6-د، 6-ه، 6-و) نشان داده شده است. به‌طوری‌که در منطقه HAZ به سمت فلز جوش با توجه به نرخ سرمایش پایین منجر به دفع کربن از آستنیت (Y) شده و ساختار سمنتیت (C) به‌صورت محلول جامد بین نشین در آهن آلفا (α-Fe) رشد کرده است و در فلز پایه به‌طور موضعی فریت (α) اطراف گرافیت‌ها تشکیل شده است (شکل6-ه، 6-و). مرز مجاور نواحی تشکیل شده فریت در ساختار، در ناحیه PMZ لایه‌های لدبوریت (LB) پرلیتی تشکیل شده‌اند (شکل6-د). همچنین با توجه به نمودار فازی Fe-Ni (مطابق شکل7) در ناحیه PMZ و ناحیه اختلاط ناقص (UMZ) با توجه به میزان درصد جزئی انحلال Ni در Fe، ریزساختار آن ناحیه از α-Fe تشکیل شده است. وجود لایه‌هایی از لدبوریت در مرز بین فلز جوش و فلز پایه منجر به افزایش سختی آن نواحی شده و احتمال بروز ترک را افزایش خواهد داد. مطابق شکل(6-الف و 6-ب) جوشکاری با استفاده از الکترود ENi-CI منجر به جلوگیری از تشکیل فاز ترد مارتنزیت (M) و کاربیدهای شکننده در ناحیه FZ می‌شود. ناحیه جوش FZ ساختار آستنیتی- فریتی همراه با گره‌های گرافیتی را نشان می‌دهد. این ناحیه با توجه به ساختار تشکیل شده، نسبتا شکل‌پذیر بوده و چقرمگی مناسبی دارد. همچنین ساختار آستنیتی مقاومت بالاتری در برابر انبساط ناشی از تنش‌های حرارتی داشته و با توجه به انبساط حرارتی پایین نیکل و تحت فشار قرار دادن ناحیه HAZ توسط چدن به عنوان فلز پایه، خطر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد [18]. لذا نمونه جوشکاری شده با استفاده از الکترود ENi-CI جهت رفع مشکلات ناحیه FZ نیازی به عملیات پیش‌گرم، پس‌گرم، کنترل رقت جوش و چرخه‌های حرارتی ندارد.



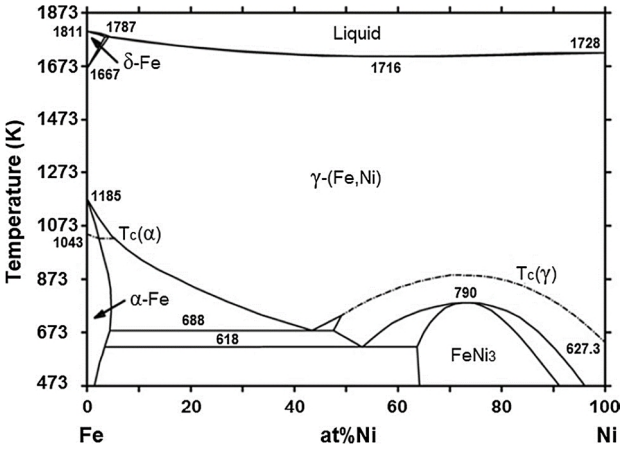
شکل6- تصاویر میکروسکوپی نوری از نواحی مختلف چدن خاکستری جوشکاری شده به روش SMAW با الکترود ENi-CI: الف و ب- فصل مشترک FZ و BM، ج- FZ، د- UMZ و HAZ و ه، و- BM.

با توجه به میزان بالای عنصر Ni در ناحیه فلز جوش و نمودار فازی Fe-Ni (شکل7)، ریزساختار ناحیه جوش از نوع آستنیت آهن-نیکل بوده که به‌صورت سلولی-دندریتی در خلاف جهت انتقال حرارت به سمت مرکز جوش رشد کرده‌اند (شکل6-ج). جوش حاصل از الکترود ENi-CI از لحاظ متالورژیکی و خواص مکانیکی از کیفیت لازم برخوردار بوده اما استفاده از آن در ابعاد صنعتی هزینه‌بر می‌باشد.

شکل(6-ه، 6-و) ریزساختار چدن خاکستری نزدیک به ناحیه HAZ را نشان می‌دهد که از لایه‌های گرافیت لایه‌ای (FG) به همراه درصد کمی از گرفیت‌های کروی (SG) تشکیل شده است. وجود گرافیت‌های کروی به صورت محدود در ریزساختار چدن خاکستری ناشی از وجود فروسیلیکو منیزیم به صورت موضعی در فلز پایه (قبل از جوشکاری) می‌باشد. لایه‌های پرلیت (P) در زمینه فریت تشکیل شده و در برخی نواحی به‌دلیل نرخ سرمایش بالای چدن، تیغه‌های ظریف مارتنزیت نیز تشکیل شده‌اند.

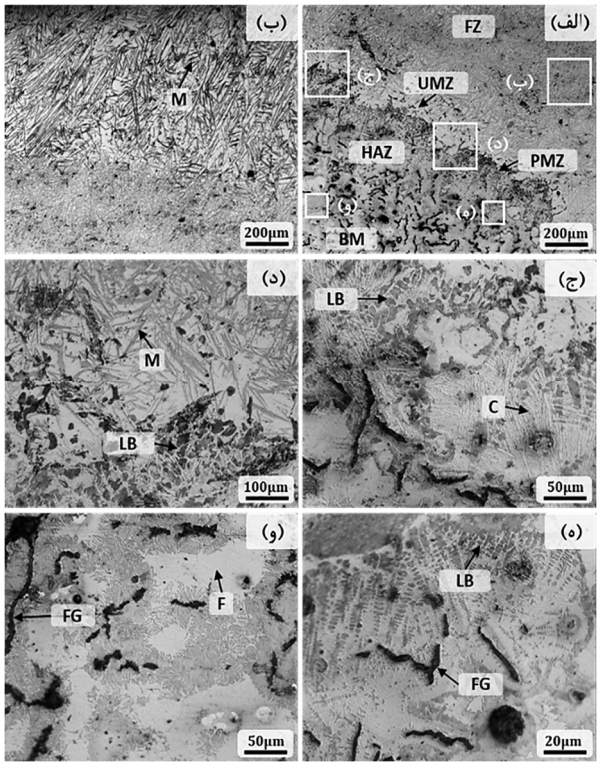
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]



شکل7- نمودار فازی Fe-Ni [19].

شکل(8) ریزساختار نمونه چدن جوشکاری شده با الکترود E6013 به روش SMAW را نشان می‌دهد. نواحی مختلف شکل(8-الف) با بزرگنمایی‌های متفاوت در تصاویر شکل(8-ب، 8-ج، 8-د، 8-ه، 8-و) نشان داده شده است. در ناحیه HAZ به سمت فلز، لایه‌های لدبوریت تشکیل شده‌اند (شکل8-ه). در ناحیه UMZ و FZ به‌دلیل نرخ سرمایش بالا در چدن زمینه، تیغه‌های ریز مارتنزیت بشقابی در زمینه محتمل آستنیتی جوانه زده و این تیغه‌ها در ناحیه فلز جوش رشد کرده و بزرگ‌تر شده‌اند (شکل8-ج). این نمونه جهت جلوگیری از تشکیل کاربید نیازمند کاهش نرخ سرمایش توسط عملیات حرارتی پیش‌گرم می‌باشد. انجام عملیات PWHT منجر به تمپر شدن مارتنزیت در ناحیه FZ و HAZ و همچنین انحلال و کروی شدن کاربیدهای سوزنی در ناحیه PMZ و HAZ شده و در نهایت منجر به کاهش سختی ناحیه اتصال می‌شود. لازم به ذکر است که نرخ سرمایش پایین صرفا نمی‌تواند از تشکیل فازهای ترد کاربیدی و مارتنزیت در حین انجماد جلوگیری کند و ریزساختار فلز جوش علاوه بر تاثیر نرخ سرمایش به ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و فلز پایه وابسته است. با توجه به درصد وزنی بالای کربن در فلز پایه و بر اثر رقت در حین جوشکاری، احتمال تشکیل مارتنزیت به همراه آستنیت باقیمانده در نواحی نزدیک PMZ محتمل است. با توجه به ساختار ترد جوش حاصل از این الکترود، این جوش از نواحی مرزی و سطحی مستعد ترک خوردگی می‌باشد. وقتی ترکی در ناحیه ترد تشکیل شود، با توجه به عدم تغییر شکل پلاستیک ماده، مقاومتی در برابر رشد ترک صورت نگرفته و ترک به راحتی اشاعه پیدا کرده و در نهایت منجر به شکست قطعه می‌شود. جهت جلوگیری از این اتفاق نیازمند پیش‌گرم و عملیات حرارتی پس از جوشکاری است که انجام این فرایند در ابعاد صنعتی مستلزم صرف زمان بیش‌تر و هزینه عملیات بالا می‌باشد.

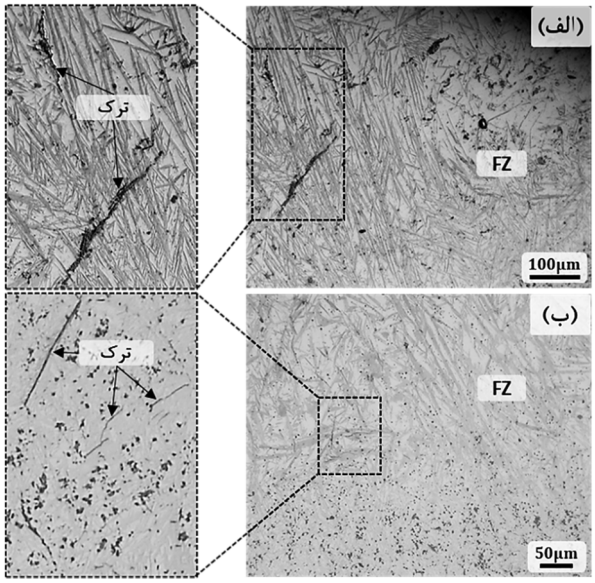


شکل8- تصاویر میکروسکوپی نوری از نواحی مختلف چدن خاکستری جوشکاری شده به روش SMAW با الکترود E6013: الف- فصل مشترک بین FZ و BM، ب- FZ، ج- UMZ د- HAZ، ه- HAZ و BM و و- BM.

شکل(9) تصویر میکروسکوپی نوری از ترک‌های تشکیل شده در فلز جوش را نشان می‌دهد که این ترک‌ها می‌توانند در اثر بارگذاری نیرو تحت سرویس اشاعه پیدا کرده و منجر به شکست شوند. با توجه به اهداف این پژوهش، استفاده از جریان اینترپالسی با حرارت ورودی پایین و کنترل شده در چرخه‌های متوالی پالسی به عنوان جایگزین عملیات حرارتی پیش‌گرم و پس‌گرم جهت کاهش نرخ سرمایش توسط دستگاه جوش GMAW استفاده شد [20].

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

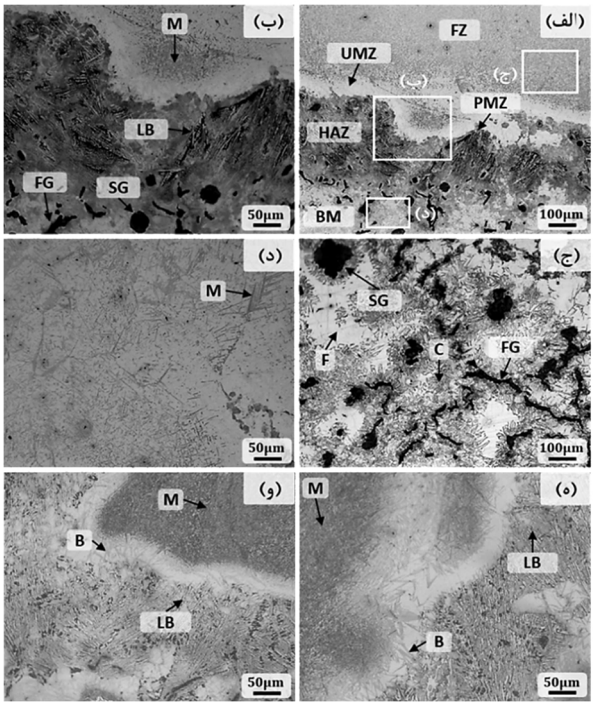
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]



شکل9- تصویر میکروسکوپی نوری از ترک‌های موجود در بخش فلز جوش چدن خاکستری جوشکاری شده به روش SMAW با الکترود E6013.

شکل10- شکل(10) ریزساختار نمونه چدن جوشکاری شده با سیم جوش ER70S-6 ه روش IP-GMAW را نشان می‌دهد. شکل(10-الف، 10-ه، 10-و) تصاویر ریزساختاری از ناحیه اتصال در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان داده و شکل(10-ب، 10-ج و 10-د) تصاویر بزرگنمایی شده از نواحی مشخص شده (کادر سفید) از تصویر شکل(10-الف) را نشان می‌دهند. ریزساختار حاصل در ناحیه HAZ به‌دلیل نرخ سرمایش بالای حاصل از جریان اینترپالسی که حرارت ورودی را در فواصل زمانی مشخص و کنترل شده به قطعه حین جوشکاری وارد می‌کند، منجر به تشکیل لایه‌های پرلیتی و سمنتیت (ساختار لدبوریتی) شده است . با توجه به این که هر چقدر حرارت ورودی کم‌تر باشد، نرخ سرمایش افزایش می‌یابد در ناحیه فلز جوش به‌دلیل حرارت ورودی کنترل شده پایین و نرخ سرمایش بالا، ریزساختار مارتنزیتی با تیغه‌های ظریف تشکیل شده است (شکل10-ج، 10-ه، 10-و).

تشکیل مارتنزیت ظریف از آستنیت، منجر به افزایش سختی نسبت به ناحیه جوش با الکترود ENi-CI شده و احتمال تشکیل و رشد ظترک را در فلز جوش را نسبت به نمونه ENi-CI افزایش می‌دهد. ریزساختار ناحیه UMZ یا فصل مشترک بین فلز جوش و فلز پایه (نوار سفید رنگ) متشکل از تیغه‌های بینیت (B) در زمینه محتمل آستنیت باقی مانده می‌باشند(شکل10-الف، 10-ب، 10-ه، 10-و).



شکل10- تصاویر میکروسکوپی نوری از بخش‌های مختلف چدن خاکستری جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6: (الف) فصل مشترک بین FZ و BM، (ب) HAZ، (ج) FZ، (د) BM و (ه، و) FZ، UMZ و HAZ.

بینیت تشکیل شده در ناحیه UMZ احتمالا از نوع بینیت بالایی بوده و با توجه به چقرمگی بالای آن نسبت به فاز سخت و ترد مارتنزیت، علاوه بر افزایش سختی و استحکام فصل مشترک، منجر به جلوگیری از ایجاد ترک می‌شود [21]. این ناحیه محل مناسبی برای تجمع برخی از فازها و ترکیبات با دمای نقطه ذوب کم‌تر است. جهت بررسی بیش‌تر ناحیه UMZ، از آنالیز توزیع غلظت SEM و پراش سنجی اشعه ایکس استفاده شد و نتایج بررسی‌ها در ادامه مورد بحث قرار گرفته‌اند. شکل(10-د) نیز ریزساختار چدن خاکستری نزدیک به ناحیه HAZ را نشان می‌دهد که متشکل از گرافیت‌های لایه‌ای، کروی و فریت می‌باشد. جدول(5) ریزساختار، اندازه گرافیت‌ها و درصد فازهای تشکیل شده در نواحی HAZ، PMZ، UMZ و WM نمونه‌های چدن خاکستری جوشکاری شده را ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

جدول 5- جزئیات ساختار نواحی مختلف جوش نمونه‌های چدن خاکستری.

متغیر	نمونه	HAZ	PMZ	UMZ	WM
ریزساختار	ENi-CI	LB	LB + αFe	αFe	ϒFe -Ni
	E6013	LB	LB + M	M	M
	ER70S-6	LB	LB + B	B	M
نوع گرافیت‌ها	ENi-CI	ورقه‌ای + کروی	ورقه‌ای + کروی	-	-
	E6013	ورقه‌ای	ورقه‌ای	-	-
	ER70S-6	ورقه‌ای	ورقه‌ای	-	-
اندازه گرافیت‌ها	ENi-CI	60-30 میکرومتر	10-5 میکرومتر	-	-
	E6013	75-50 میکرومتر	10-5 میکرومتر	-	-
	ER70S-6	100-75 میکرومتر	10-5 میکرومتر	-	-
درصد فازهای تشکیل شده	ENi-CI	αF (50%) + P (50%)	αF (80%) + P (20%)	αF (80%)	ϒFe-Ni (100%)
	E6013	F (50%) + P (50%)	F (50%) + P (20) + M (30%)	F (50%) + M (50%)	F (30%) + M (70%)
	ER70S-6	F (50%) + P (50%)	F (50%) + P (20) + B (30%)	F (50) + B (35%) + M (15%)	F (30%) + M (70%)

جهت بررسی بیشتر فصل مشترک بین فلز جوش و فلز پایه به لحاظ عنصری از نقشه‌های دو بعدی توزیع غلظت عناصر و اسکن خطی EDS استفاده شد. شکل(11) نقشه دو بعدی توزیع غلظت عناصر (Si، P، S، Mn، Cu و Fe) به‌صورت نیمه کمی و همچنین با اسکن خطی آنالیز EDS در 10 نقطه ناحیه HAZ جوش (شکل 11- الف) حاصل از سیم جوش ER70S-6 را نشان می‌دهد. غنی‌ترین عناصر توزیع شده به‌طور یکنواخت در این ناحیه Fe و Si می‌باشند. مطابق شکل 11- (ج و د) اسکن خطی EDS از ناحیه فلز جوش (نقطه 1) تا فلز پایه (نقطه 10) در 10 نقطه نشان می‌دهد که میزان عنصر Si افزایش یافته است. غلظت این عنصر در فلز پایه (نقطه 7 و 8) در بالاترین مقدار خود می‌باشند. با توجه به درصد بالای عنصر Mn در سیم جوش ER70S-6 مطابق جدول(1)، غلظت آن از فلز جوش به فلز پایه روند کاهشی دارد. از طرفی غلظت عنصر Fe در فلز پایه به‌دلیل افزایش میزان درصد وزنی سایر عناصر، روند نسبتا کاهشی دارد. غلظت سایر عناصر فوق زیر یک درصد وزنی می‌باشند.

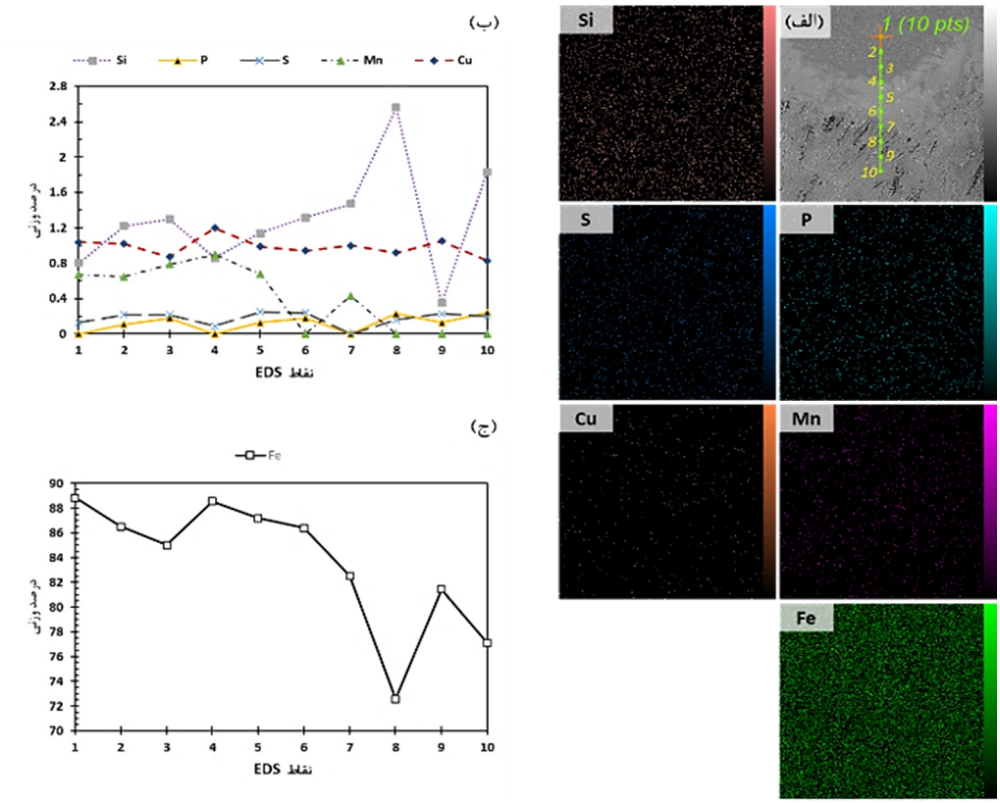
برای مقایسه بهتر درصد وزنی عناصر اسکن خطی EDS، نمودار درصد وزنی عنصر Fe جداگانه رسم شده است.

3-4- بررسی فازی

شکل12-شکل(12) نمودار پراش سنجی اشعه ایکس ناحیه UMZ جوش حاصل از سیم جوش ER70S-6 را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این ناحیه از دو فاز آهن آلفا (Fe-α) و کاربید (Fe_3C) تشکیل شده است. فاز Fe_3C یک فاز ترد و شکننده با ساختار کریستالی ارتورومبیک بوده که منجر به کاهش چقرمگی ماده و افت خواص مکانیکی آن می‌شود. این فاز در زوایای 26/5 و 43/1 درجه در صفحات کریستالی (211) و (112) به‌صورت پیک‌های ضعیف با شدت پایین مشاهده شدند. فاز Fe-α با ساختار کریستالی BCC در زوایای 44/7، 65، 82/3 و 99 درجه و در صفحات کریستالی (110)، (200)، (211) و (220) مشاهده شدند که شدت پیک‌ها نسبت به فاز Fe_3C قوی‌تر می‌باشند. بیش‌ترین شدت پیک فاز Fe-α در زاویه 45 درجه بوده و فاز غالب در مورد بررسی، Fe-α

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

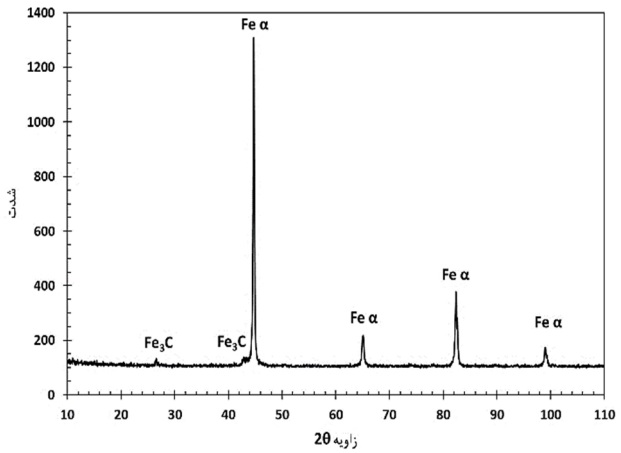


شکل 11- الف- مکان نمایی اسکن خطی آنالیز EDS از فصل مشترک فلز جوش تا فلز پایه، ب- نقشه توزیع میزان عناصر و ج و د- منحنی تغییرات درصد وزنی عناصر در نقاط مختلف در مرز اتصال نمونه چدن خاکستری جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6.

می‌باشد. هر کدام از پیک‌های مشاهده شده مربوط به فازهای تشکیل شده می‌باشند که توسط نرم افزار X-Pert High Score تطبیق و مقایسه شدند. با توجه به ماهیت فازهای تشکیل شده و ساختار کریستالی آن‌ها، انتظار می‌رود سختی نمونه‌های جوشکاری شده بالاتر باشد. همچنین تشکیل فاز بینیت و مارتنزیت در ناحیه UMZ با توجه به مطالعات ریزساختاری از عوامل موثر بر بالاتر بودن سختی می‌باشد. نتیجه آزمون XRD نشان داد که لایه سفید رنگ تشکیل شده در ناحیه UMZ مطابق شکل10-الف)، فاز آستنیت باقی‌مانده محتمل نیست. جهت بررسی و تشخیص دقیق فازهای موجود این ناحیه، نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته‌ای است که در مطالعات بعدی بررسی خواهد شد.

3-5- نتایج ریزسختی سنجی

ریزسختی سنجی از هر سه نمونه جوشکاری شده با الکترودهای مختلف، به‌صورت خطی از ناحیه فلز پایه (BM) تا سطح گرده جوش (WC) در 8 نقطه اثر (مطابق شکل13-الف) انجام شده و جهت مقایسه بهتر میانگین نتایج هر ناحیه به‌صورت نمودارهای ستونی در شکل(13-ب) نشان داده شده است.

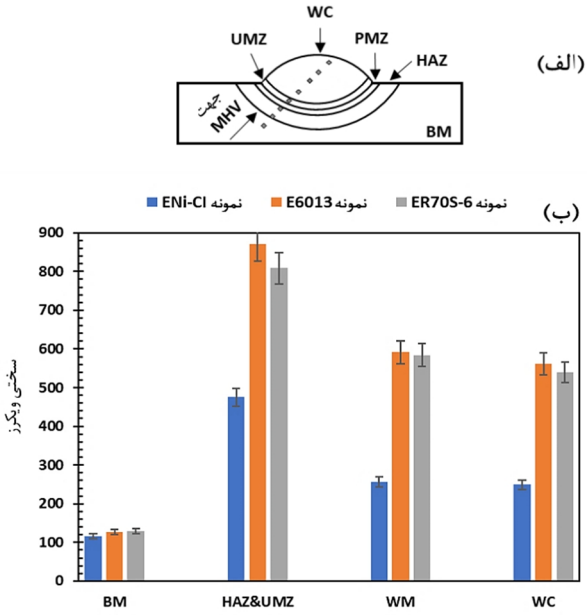


شکل12- نمودار XRD از فصل مشترک بین فلز پایه و فلز جوش نمونه چدن خاکستری جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

با توجه به نتایج سختی سنجی مشاهده می‌شود که سختی نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6013 و ER70S-6 به‌دلیل ریزساختار مارتنزیت بشقابی شک ل، وجود فاز ترد و شکننده Fe_3C طبق آنالیز XRD در نواحی HAZ، UMZ، FZ و WC سختی بالایی دارد و میانگین سختی آن‌ها به ترتیب در حدود 534 و 512 ویکرز می‌باشد. در حالی که میانگین سختی جوش حاصل از الکترود ENi-CI برابر 278 ویکرز می‌باشد. با توجه به مشابهت ریزساختاری سختی جوش حاصل از سیم جوش ER70S-6 در نواحی مختلف اختلاف کمی با سختی جوش حاصل از الکترود E6013 نشان داد.



شکل13- الف-طرحواره‌ای از موقعیت مکانی ریزسختی سنجی از نواحی مختلف نمونه‌های جوشکاری شده و ب- نمودار ریزسختی ویکرز مربوط به نواحی مختلف نمونه‌های چدنی جوشکاری شده.

3-6- بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها

3-6-1-نتایج آزمون اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز (OCP)

شکل(14-الف) منحنی‌های پتانسیل مدار باز نمونه‌ها در مدت زمان غوطه‌وری 20 دقیقه در محلول 3/5 درصد NaCl را نشان می‌دهد. جهت انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، ابتدا بایستی الکترود در محلول الکترولیت به یک حالت نسبتا پایدار برسد. برای بررسی این پایداری و واکنش‌های انجام شده در سطح الکترود، از آزمون OCP استفاده می‌شود. هر چقدر مقدار پتانسیل مدار باز منفی‌تر باشد، ΔG آن واکنش در جهت اکسیداسیون فلز منفی تر بوده و به لحاظ ترمودینامیکی، تمایل فلز جهت خورده شدن در محلول الکترولیت افزایش می‌یابد [22].

با توجه به شکل(14-الف)، پتانسیل مدار باز نمونه‌های CI، ER70، ENi-CI و ER70-CI در پایان آزمون (در حالت تعادل) نزدیک به هم بوده و در محدوده 541/1- تا 584/1- میلی ولت می‌باشند، در حالی که میزان پتانسیل خوردگی نمونه ENi برابر 341/2- میلی ولت بوده و مثبت تر از سایر نمونه‌ها است.

نمونه با کمترین تمایل ترمودینامیکی به خوردگی غیر فعال ترین نمونه می‌باشد که نمونه ENi در این پژوهش غیرفعال ترین نمونه شناسایی شد. نیروی محرکه لازم برای خوردگی گالوانیک، اختلاف پتانسیل مدار باز خوردگی بین دو فلز می‌باشد. با توجه به اختلاف قابل توجه پتانسیل نمونه ENi با نمونه CI، هرگونه اتصال الکتریکی بین این نمونه‌ها در محلول خورنده می‌تواند باعث خوردگی گالوانیک قابل توجهی شود. لذا این نوع خوردگی در نمونه ENi-CI جوشکاری شده قابل توجه بوده و CI به عنوان آند خورده خواهد شد. در حالیکه اختلاف پتانسیل مدار باز بین نمونه‌های ER70 و CI بسیار ناچیز بوده و خوردگی گالوانیک در زوج ER70-CI محتمل نیست.با آغاز آزمون OCP پتانسیل نمونه‌ها غالبا با گذشت زمان به سمت مقادیر منفی‌تر جابجا شده است. با قرار گیری نمونه‌ها داخل محلول NaCl، لایه اکسید اولیه موجود در سطح نمونه‌ها به دلیل حمله یون‌های خورنده حذف شده و لذا پتانسیل نمونه‌ها به سمت مقادیر فعال‌تر جابجا می‌شود. پس از رسیدن به حالت تعادل جدید بین واکنش‌های اکسایش و کاهش، میزان پتانسیل نمونه‌ها با گذشت زمان روند ثابتی را تا انتهای آزمون طی می‌کند.

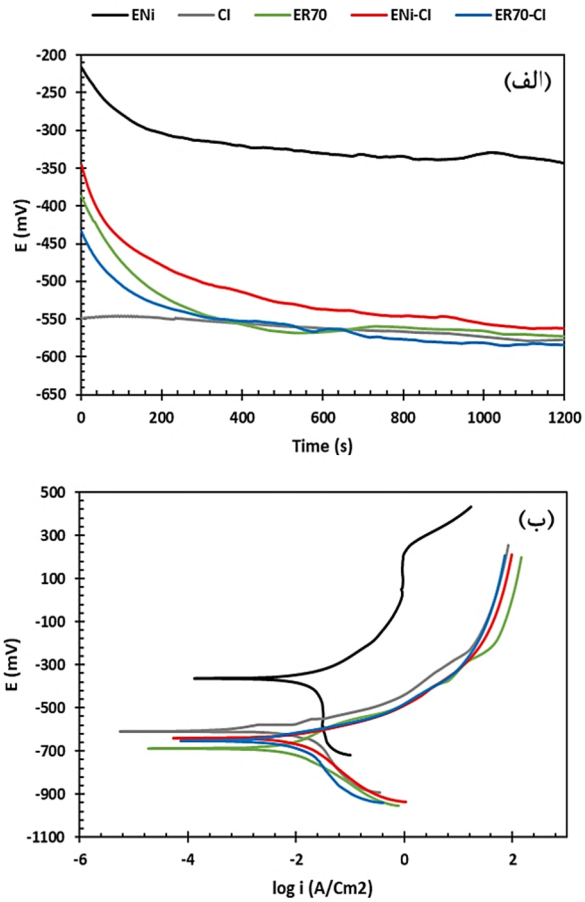
3-6-2-نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP)

منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌ها در محلول 3/5 درصد NaCl در شکل(14-ب) نشان داده شده است. مقایسه شاخه آندی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

نمودارهای پلاریزاسیون نشان دهنده رفتار رویین شدن برای ENi و انحلال فعال در سایر نمونه‌ها است، که احتمالا به دلیل تشکیل یک لایه نسبتا محافظ (با توجه به چگالی جریان لایه پسیو) در سطح نیکل در محلول کلرید سدیم در محدوده باریکی از پتانسیل است. جهت بدست آوردن متغیرهای الکتروشیمیایی نمونه‌ها از روش برون‌یابی تافلی استفاده شد.

چگالی جریان خوردگی هر نمونه از تقاطع مماس‌های شاخه کاتدی و آندی آن نمونه به‌دست می‌آید. چگالی جریان خوردگی (icorr)، پتانسیل خوردگی (Ecorr)، شیب تافل آندی (β_a) و شیب تافل کاتدی (β_c) حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌ها در جدول(6) ذکر شده است.



شکل14- منحنی آزمون‌های خوردگی نمونه‌های غوطه‌ور در محلول 3/5 درصد NaCl: الف- OCP و ب- PDP.

نمونه ENi بیش‌ترین (نجیب‌ترین) مقدار Ecorr را در بین نمونه‌ها دارد و مقدار پتانسیل خوردگی آن به میزان قابل توجهی بالاتر از سایر نمونه‌ها است. علیرغم اینکه نمونه ER70 کم‌ترین (فعال‌ترین) پتانسیل خوردگی را بین تمامی نمونه‌ها دارد، ولی پتانسیل خوردگی آن نزدیک به پتانسیل خوردگی نمونه‌های CI، ER70-CI و ENi-CI می‌باشد، که این نزدیکی پتانسیل در تطابق با نتایج آزمون پتانسیل مدار باز می‌باشد.

جدول6- نتایج حاصل از نمودارهای آزمون پلاریزاسیون نمونه‌ها

نمونه‌ها	ENi	CI	ER70	ENi-CI	ER70-CI
β_a (mV/decade)	130	70	120	65	60
β_c (mV/decade)	-200	-195	-135	-150	-150
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	1/2	8/2	6/3	8/9	6/8
E_{corr} (mV)	-363	-640	-668	-622	-653

مقایسه چگالی جریان‌های خوردگی نمونه‌ها در جدول(6) نشان می‌دهد که نمونه ENi کمترین چگالی جریان خوردگی را در میان تمامی نمونه‌ها دارد، که به معنی نرخ خوردگی کمتر این نمونه در محیط کلرید سدیم 3/5 درصد می‌باشد.

چگالی جریان خوردگی سایر نمونه‌ها اختلاف قابل توجهی با یکدیگر نداشته و به‌مراتب بالاتر از چگالی جریان خوردگی نمونه ENi هستند. با توجه به اینکه نیمی از سطح در دسترس نمونه ENi-CI از نیکل و نیم دیگر آن از چدن تشکیل شده است، میزان چگالی جریان خوردگی این نمونه اختلاف قابل توجهی با چگالی جریان خوردگی نمونه نیکل داشته و نزدیک به چگالی جریان خوردگی نمونه چدنی (با سطح $1\ cm^2$) است، می‌توان گفت که نیمه چدنی نمونه ENi-CI (با سطح $0/5\ cm^2$) با شدت بیشتری نسبت به نمونه چدنی خورده می‌شود تا چگالی جریان خوردگی برابری با نمونه چدنی با سطح $1\ cm^2$ تولید شود، که می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل پیل گالوانیک در نمونه ENi-CI باشد.

4- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر است:

- رقت نمونه‌های جوشکاری شده ارتباط مستقیمی با حرارت ورودی در واحد طول جوش دارد. بنابراین نمونه‌های جوشکاری شده تحت فرایند SMAW با حرارت ورودی J/mm

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

691 رقت آن‌ها در حدود 32 درصد می‌باشند. در حالیکه نمونه جوشکاری شده با فرایند IP-GMAW با حرارت ورودی J/mm 393 رقت آن در حدود 17 درصد می‌باشد. دلیل این موضوع اعمال حرارت ورودی پایین و کنترل شده در پالس‌های برنامه ریزی شده توسط دستگاه جوش IP-GMAW می‌باشد.

- ریزساختار حاصل از تعمیر سطحی چدن خاکستری به روش IP-GMAW با استفاده از سیم جوش ER70S-6، بدون تشکیل ترک و غالبا از تیغه‌های ریز مارتنزیت تشکیل شده است که نسبت به ریزساختار حاصل از نمونه جوشکاری شده با الکترود E6013 چقرمگی بالاتری دارد.

- آنالیز XRD از ناحیه UMZ نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW با سیم جوش ER70S-6، تشکیل فاز ترد کاربید (Fe_3C) در کنار آهن آلفا (Fe-α) را نشان داد. همچنین تشکیل لایه‌ای از تیغه‌های بینیت در ناحیه UMZ (لایه سفید میانی) نمونه جوشکاری شده به روش IP-GMAW با استفاده از سیم جوش ER70S-6، علاوه بر افزایش سختی و چقرمگی این ناحیه، نقش مهمی در جلوگیری از ایجاد و رشد ترک دارد.

- نتایج ریزسختی ویکرز حاصل از هر سه نمونه نشان می‌دهد که نواحی HAZ و UMZ به‌دلیل وجود ساختار لدبوریت، سمنیت سوزنی و بینیت، سختی بالاتری نسبت به فلز پایه و فلز جوش دارد. همچنین بیشترین میزان سختی در حدود 870 ویکرز مربوط به نمونه جوشکاری شده با الکترود E6013 و کمترین میزان آن 475 ویکرز مربوط به نمونه ENi-CI در ناحیه فصل مشترک جوش می‌باشد. در حالیکه نمونه جوشکاری شده با سیم جوش ER70S-6 (809 ویکرز) بدون تشکیل ترک در ریزساختار، خواص مکانیکی مشابهی با نمونه E6013 دارد.

- نتایج خوردگی نشان داد که پتانسیل خوردگی نمونه ENi (363 mV -) نسبت به تمامی نمونه‌ها مثبت‌تر بوده و این نمونه رفتار نجیب‌تری از خود نشان می‌دهد.

- مقایسه نتایج خوردگی گالوانیک نمونه‌های جوشکاری شده نشان داد که پتانسیل خوردگی هر چهار نمونه به‌جز ENi تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. با این وجود نمونه ER70-CI با پتانسیل خوردگی 653 mV- نسبت به نمونه ENi-CI (622 mV-) مقاومت پلاریزاسیون بالاتری دارد. همچنین نمونه ER70-CI با جریان خوردگی $6/8\ \mu A/cm^2$ نسبت به نمونه ENi-CI ($8/9\ \mu A/cm^2$) نرخ خوردگی کمتری داشته و در برابر خوردگی گالوانیک مقاوم‌تر است.

- تعمیر سطحی چدن خاکستری به روش IP-GMAW توسط سیم جوش ER70S-6، به‌عنوان یک روش جایگزین و مناسب با مزیت در تسریع انجام کار، هزینه پایین، بدون نیاز به عملیات پیش‌گرم، پس‌گرم و مقاوم به خوردگی گالوانیک نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکترود ENi-CI معرفی شد.

منابع

1- M. Ebrahimnia, F.M. Ghaini, S. Gholizade, and M. Salari. 2012. Effect of cooling rate and powder characteristics on the soundness of heat affected zone in powder welding of ductile cast iron. *Materials & Design* 33: 551–556.

2- W. Wijoyo, M. Mujahid, A. Nurhidayat, E. Surjadi, and I. Saefuloh. 2021. The effect of current strength on tensile strength and impact toughness of cast iron welded joints. *Jurnal Sains dan Teknologi* 17(2): 125.

3- A. Kokabi. 2013. *Welding Technology*. 9th ed. Azadeh Publications. Tehran-Iran (in Farsi).

4- V. Muralidharan, and V. Sugumaran. 2013. Rough set based rule learning and fuzzy classification of wavelet features for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump. *Measurement* 46(9): 3057–3063.

5- M. Pouranvari. 2010. On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design* 31(7): 3253–3258.

6- D.E. Krause. 1969. Gray Iron-A Unique Engineering Material. *ASTM Special Technical Publications* (STP455-EB): 3–28.

7- D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu, and G.R. Edwards. 1983. Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering. *American Society for Metals* 6.

8- R. Kumar Bhatnagar, and G. Gupta. 2016. A Review on Weldability of Cast Iron. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 7(5).

9- AWS. 1997. Welding Handbook: Materials and Applications - Part 1. 8th ed. Miami: American Welding Society. p. 7.

10- A. Sadeghi, A. Moloodi, M. Golestanipour, and M.M. Shahri. 2017. An investigation of abrasive wear and corrosion behavior of surface repair of gray cast iron by SMAW. *Journal of Materials Research and Technology* 6(1): 90–95.

11- A. Kokabi, B. Bidakhti, and H.J. Awal. 2014. *Welding Technology: Metallurgy*. Vol. 2. 3rd ed. Sharif University of Technology Scientific Publications. Tehran-Iran (in Farsi).

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]

productivity additive manufacturing. *Additive manufacturing*. 73: 1–15.
17-W. Wang, T. Jing, Y. Gao, G. Qiao, and X. Zhao. 2007. Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. *Journal* of Materials *Processing Technology*. 182(1–3): 593–597.
18- R. Elliott. 1988. Cast Iron Technology. University of Manchester Press. England.
19- O.A. Cortez, and F. Jose. 2014. Fe-Ni Alloy Synthesis Based on Nitrates Thermal Decomposition Followed by H_2 Reduction. *Metallurgical and Materials Transactions B* 45: 2033–2039.
20- H. Hamed Zargari, and V. Ziaei Laleh. 2025. Wire Arc Additive Manufactured Radial Thin Wall: Fabrication Strategy, Macroscopic Defect Control, Microstructure, and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance* 34: 6708–6718.
21- H. Bhadeshia. 2001. Bainite in steels: Transformation, Microstructure and Properties. 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge.
22- A. Farhadian, S. Assar Kashani, A. Rahimi, E. E. Oguzie, A.A Javidparvar, S. C. Nwanonenyi, S. Yousefzadeh, M.R. Nabid. 2021. Modified hydroxyethyl cellulose as a highly efficient eco-friendly inhibitor for suppression of mild steel corrosion in a 15% HCl solution at elevated temperatures. *Journal of Molecular Liquids* 338: 116607.
12- S. A. Moussavian, M. Mossibi and A. M. Kokabi. Fabrication of powder metallurgy electrodes for ductile iron welding using the MMAW process. 2008. *Second International Conference and Eighth National Conference on Manufacturing and Production Engineering*. University of Science and Technology. Tehran-Iran. (in Farsi).
13- M. Anaraki Todashki, H. Sabet, R. Tehouri and A. Anbarzadeh. Effect of SMAW preheat temperature on structural changes in the weld zone of ductile iron. 2023. *10th International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Metallurgy*. International Organization for Academic Studies. Tbilisi. Georgia. (in Farsi).
14- M. Shayan, M. Askari Peykani, M. Shamanian, M. Taherian, A. Abdolvand, K. Baharloui and M. Taheri. 2009. Microstructure investigation and weldability analysis of gray cast iron. *10th National Welding and Inspection Conference of the Iranian Welding and Non-Destructive Testing Association*. Tehran-Iran. (in Farsi).
15- B. C. Mcintosh, J. Chapuis, and P. Mendez. 2016. Effect of Ar-CO2 gas blends on droplet temperature in GMAW. *Welding Journal*. 95(8): 273–279.
16- C. Wang, J. Wang, J. Bento, J. Ding, G. Pardal, G. Chen, J. Qin, W. Suder , S. Williams. 2023. A novel cold wire gas metal arc (CW-GMA) process for high

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.16]