

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی چقرمگی ضربه و خواص مکانیکی فلزجوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش SMAW با الکترودهای پوشش سلولزی و روتیلی

### مقاله پژوهشی

نوید شجاعی<sup>۱</sup>، حامد ثابت<sup>۲\*</sup>، بنفشه کاربخش راوری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی (جوشکاری)، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

h-sabet@kiaou.ac.ir \*

#### چکیده

در تحقیق حاضر اتصال فولاد ST37 با الکترودهای E6010 و E6013 به روش SMAW انجام شد. پس از تهیه نمونه، بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شد و جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمون‌های ضربه، کشش، خمش و میکروسختی انجام گردید. نتایج نشان داد، که با کاهش زمان و افزایش سرعت سرد شدن، ریزساختار فریت و ویدمن اشتاتن و فریت ظریف در منطقه فلزجوش نمونه E6013 به ریزساختار فریت سوزنی و فریت ریز هم محور (با متوسط اندازه دانه کمتر) در منطقه فلزجوش نمونه E6010 تبدیل شده است. همچنین، نمونه E6010 دارای قطر میانگین و کسر حجمی آخال کمتر (۲/۳٪) نسبت به نمونه E6013 (۳/۶٪) می‌باشد. علاوه بر این، انرژی ضربه نمونه E6010 پس از فرآیند جوشکاری در دمای محیط برابر ۸۷ و در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد برابر ۲۵/۵ ژول است، در صورتی که نمونه E6013 به ترتیب برابر ۶۱ و ۱۷/۵ ژول می‌باشد. همچنین، انرژی ضربه نمونه E6010 پس از گذشت ۵۶۲ روز از فرآیند جوشکاری در دمای محیط برابر ۸۳ و در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد برابر ۱۸/۵ ژول است، در صورتی که نمونه E6013 به ترتیب برابر ۵۱ و ۸ ژول می‌باشد. نتایج آزمون کشش نشان داد، نمونه E6010 و E6013 دارای استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی تقریباً یکسانی در منطقه فلزجوش می‌باشند. نتایج آزمون خمش نشان داد، دو نمونه جوشکاری شده به دلیل یکسان بودن استحکام تسلیم ناشی از نوع ساختار و اندازه دانه‌های تشکیل شده، دارای انعطاف پذیری و نرمی یکسانی می‌باشند. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد، میانگین سختی دو نمونه تفاوتی با یکدیگر ندارند و این مقدار در مقطع فلزجوش نمونه‌های E6010 و E6013 به طور میانگین، به ترتیب برابر ۱۴۸ و ۱۵۰ HV می‌باشد.

#### اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

#### کلید واژگان:

فولاد ساده کربنی  
جوشکاری قوس الکتریکی  
با الکتروود دستی  
ریزساختار  
فلزجوش  
چقرمگی ضربه.

### Investigation of Impact Toughness and Mechanical Properties of the Plain Carbon Steel Weld Metal Fabricated By SMAW with Cellulose and Rutile Coated Electrodes

Navid Shojaei<sup>1</sup>, Hamed Sabet<sup>2\*</sup>, Banafsheh Karbakhsh Ravari<sup>3</sup>

1- MSc student of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Associate prof. of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

3- Assistant prof. of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

\* h-sabet@kiaou.ac.ir

#### Article Information

Original Research Paper

Doi:

#### Keywords:

Lead

Composite

Polyaniline

Orange Peel

Adsorption.

#### Abstract

In the current research, ST37 Steel was Joined with E6010 and E6013 Electrodes by SMAW. After samples preparation, the evolution of Microstructure was carried out by OM and SEM in addition the Impact, Tensile, Bending and Microhardness tests were performed. The results shows that by decreasing time and increasing Cooling Rate, the Microstructure of Weld Metal that Welded with E6013 Electrode from Widmannstatten and Fine Ferrite has changed to Acicular and Fine Coaxial ferrite with lower average Grain size of Weld Metal using E6010 Electrode. Also, Welded sample with E6010 Electrode shows smaller mean diameter and volume fraction of Inclusions (2.3%) compared to Weld Metal using E6013 Electrode (3.6%). Additionally, Impact Energy of specimen E6010 After the Welding process was changed from 87 to 25.5J with changing Temperature from 25 to -30°C meanwhile, Impact Energy of sample that welded with E6013 was changed from 61 to 17.5J. Also, Impact Energy of specimen E6010 After 562 days of the Welding process was changed from 83 to 18.5J with changing Temperature from 25 to -30°C meanwhile, Impact Energy of sample that Welded with E6013 was changed from 51 to 8J. The results of Tensile test shows that both samples that Welded with E6010 and E6013 Electrodes have same Yield Strength and Ultimate Tensile Strength in Weld Zone. The result of Bending test shows that both samples have equal Ductility and Flexibility. The results of Microhardness test shows that the average of Hardness for both samples is same and the quantity of Hardness are 148 and 150 HV for Welded sample with E6010 and E6013 Electrodes, respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Navid Shojaei, Hamed Sabet, Banafsheh Karbakhsh Ravari, Investigation of Impact Toughness and Mechanical Properties of the Plain Carbon Steel Weld Metal Fabricated By SMAW with Cellulose and Rutile Coated Electrodes, New Process in Material Engineering, 2021, 15(4), 59-80.



## ۱- مقدمه

فولادهای ساده کربنی یکی از پرکاربردترین مواد فلزی هستند و کربن، اصلترین عنصر آلیاژی سازنده آنها است. قطعاتی که از این فلزات توسط فرآیند جوشکاری تولید می‌شوند در بسیاری از صنایع نظیر نفت و پتروشیمی، صنعت حمل و نقل زمینی، صنایع شیمیایی و صنعت ساختمان بکار می‌روند [۱-۲]. معمولاً می‌توان از تمامی فرآیندهای جوشکاری بخصوص روش‌های جوشکاری به کمک انرژی الکتریکی (جوشکاری ذوبی) برای اتصال این نوع فولادها استفاده نمود [۳]. اصولاً در فولادهای ساده کربنی با افزایش درصد کربن خواصی از قبیل چقرمگی ضربه و قابلیت جوش پذیری کاهش و در مقابل سختی و استحکام کششی افزایش می‌یابد [۴]. خواص مکانیکی فلز جوش فولادهای ساده کربنی به ریزساختار میکروسکوپی فلز جوش بستگی دارد. شدت تمرکز حرارت و سرعت سرد شدن در روش‌های مختلف جوشکاری فولادهای ساده کربنی متفاوت است و بر ریزساختار میکروسکوپی فلز جوش تاثیر گذار می‌باشد [۵-۶]. جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی (SMAW)، یکی از پرکاربردترین روش جوشکاری بوده و الکتروود آن از نوع مصرفی (ذوب شونده) و پوشش دار می‌باشد. با تغییر نوع الکتروود، جریان (مستقیم یا متناوب) و بسته به مهارت جوشکار، این فرآیند برای انواع فولادها و در تمام موقعیت‌ها قابل استفاده می‌باشد [۷-۸]. در اکثر روش‌ها، بخصوص روش الکتروود دستی، کیفیت متالورژیکی جوش نیز متاثر از حرارت ورودی جوشکاری، ترکیب شیمیایی فلز جوش، عناصر آلیاژی و قابلیت جوش پذیری می‌باشد [۹-۳]. الکترودهایی که در جوشکاری فولادهای ساده کربنی به کار برده می‌شوند، دارای عناصر مختلفی در پوشش خود می‌باشند که نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این عناصر شامل مواد معدنی نظیر اکسید تیتانیوم (رتیل)، اکسید آهن، کربنات‌های مختلف، مواد اکسیژن زدا، سیلیکات‌ها، پودر آهن و در برخی موارد عناصر آلیاژی هستند [۱۰]. دو الکتروود پر کاربرد در صنعت را می‌توان، الکترودهای

E6010 و E6013 نام برد. روپوش الکترودهای E6010 (سلولزی) از جنس اکسید تیتانیوم (روتیل) و مقداری سلولز است. از این الکترودها در جوشکاری خطوط لوله انتقال نفت و گاز و سایر سیالات استفاده می‌شوند. حجم سرباره آن‌ها کم بوده و به راحتی از روی کار کنده می‌شوند. به دلیل وجود هیدروژن در ترکیبات روکش (سلولز)، حرارت بالایی ایجاد شده و عمق نفوذ جوش افزایش می‌یابد. جوش حاصل از این نوع الکترودها دارای خواص مکانیکی خوبی بوده است و دانه بندی فلز جوش که از این نوع الکتروود حاصل می‌شود، بسیار ظریف و تقریباً عاری از اکسیژن است [۱۱]. روپوش الکترودهای E6013 (روتیلی-پتاسیم دار) عمدتاً از ماده تشکیل دهنده اکسید تیتانیوم (روتیل) می‌باشد که باعث آرام‌تر شدن قوس می‌گردد. جوشکاری با این نوع الکتروود در هر حالتی و با هر جریانی امکان پذیر است و ظاهر جوش مناسبی حاصل می‌شود. به همین دلیل بیشترین کاربرد را در بین انواع الکترودها دارد [۱۲]. تاثیر انرژی جوشکاری (حرارت ورودی) و نرخ سرد شدن بر ریزساختار فلز جوش و اندازه دانه‌های فلز جوش تاثیر بسزایی در خواص ضربه پذیری، انعطاف پذیری و استحکام کششی دارد [۴]. نرخ سرد شدن در جوشکاری به عوامل مختلفی از قبیل میزان حرارت ورودی، خواص فیزیکی و ضخامت فلز پایه بستگی دارد. از نقطه نظر متالورژیکی و تغییرات ساختاری موثر (بر خواص مکانیکی و ضربه پذیری جوش فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ)، در فاصله نزول درجه حرارت از ۸۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتیگراد از اهمیت خاصی برخوردار بوده و معمولاً تنها نرخ (سرعت یا زمان) سرد شدن در این فاصله در نظر گرفته شده و به اختصار  $\Delta t_{8/5}$  نشان داده می‌شود [۱۰]. با افزایش مدت زمان سرد شدن (کاهش نرخ سرد شدن) ساختار فلز جوش از فریت ویدمن اشتاتن و فریت مرز دانه‌ای به فریت سوزنی تبدیل می‌شود [۱۳-۱۴]. با توجه به اهمیت ساختار میکروسکوپی، بالاترین میزان چقرمگی ضربه فقط در ریزساختار نامنظم فریت سوزنی بدست می‌آید [۱۳]. بعضی از عناصر آلیاژی بر روی خواص مکانیکی فلز جوش

تأثیرگذار می‌باشند و منجر به ایجاد ترکیبات غیرفلزی (اکسیدی) در فلزجوش شده و خواص چقرمگی ضربه فلزجوش را کاهش می‌دهند. این عناصر شامل منگنز، سیلیسیم و آلومینیوم می‌باشند که در نقش عناصر اکسیژن زدا عمل می‌کنند [۹]. عناصر اصلی که بر روی کسر حجمی آخال موثر می‌باشند گوگرد و اکسیژن هستند. مکانیزم تأثیرگذاری عیوب جوش شامل حفره‌ها و آخال سرباره‌های جامانده از پاس‌های قبلی موجب تمرکز تنش و محل شروع ترک در نزدیکی این عیوب در حین آزمون ضربه می‌شوند که این امر خواص ضربه پذیری ماده را کاهش می‌دهد [۱۵]. آخال‌های موجود در منطقه فلزجوش، از یک جهت می‌توانند محل جوانه‌زنی فریت سوزنی باشند که این خاصیت، منجر به افزایش چقرمگی ضربه می‌شود. از جهتی دیگر، می‌توانند محل شروع شکست (نرم یا ترد) باشند که در این حالت برای خواص مکانیکی بخصوص چقرمگی ضربه مضر هستند [۱۳]. آخال‌های میکروسکوپی عمدتاً محل جوانه‌زنی فریت سوزنی می‌باشند و خواص چقرمگی ضربه را بهبود می‌بخشند [۱۵]. چقرمگی ضربه فلزجوش با الکتروود E6010 در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد بیشتر از ۲۷ ژول و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر ۸۰ ژول گزارش شده است، همچنین چقرمگی ضربه‌ای فلزجوش با الکتروود E6013 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر بیش از ۶۰ ژول گزارش شده است [۱۶]. کاسوما و همکاران [۱۷] اعلام نمودند که شدت جریان جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی با الکتروود E6013، تأثیر قابل توجهی بر چقرمگی ضربه فلزجوش در فولاد کم آلیاژ دارد. آنها گزارش دادند که با افزایش شدت جریان جوشکاری (و در نتیجه افزایش حرارت ورودی) مقاومت در برابر چقرمگی ضربه فلزجوش کاهش می‌یابد. طلائی و همکاران [۱۸] اثر جریان جوشکاری، ولتاژ قوس، سرعت جوشکاری و قطر الکتروود را بر روی خواص مکانیکی ورق‌های فولاد ساده کربنی کم کربن جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی با الکتروود دستی با الکتروود کم هیدروژن E7018 را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد،

افزایش ولتاژ و جریان جوشکاری منجر به افزایش حرارت ورودی و در نتیجه سختی و استحکام کششی فلزجوش افزایش و چقرمگی ضربه فلزجوش کاهش می‌یابد. شی و همکاران [۱۹] مستقیماً تأثیر حرارت ورودی بر چقرمگی ضربه را در مناطق مجاور جوش فولاد ساده کربنی کم کربن بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه شده و در نتیجه کاهش چقرمگی ضربه در این منطقه می‌شود. بدود و همکارش [۲۰] اثر پارامترهای جوشکاری بر روی خواص مکانیکی فولاد کم کربن (ضخامت ۱۰ میلیمتر) جوشکاری شده به روش جوشکاری اکسی استیلن و جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی با الکتروود E6013 را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، با افزایش حرارت ورودی، چقرمگی ضربه افزایش و در مقابل، استحکام کششی و سختی کاهش یافت. پرادانا و همکاران [۲۱] توزیع سختی و انرژی ضربه فولاد ST37 جوشکاری شده توسط الکتروود E7016 با جریان‌های مختلف به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، با افزایش حرارت ورودی، چقرمگی ضربه کاهش و در مقابل، سختی به واسطه غنی سازی کربن، افزایش یافت. به دلیل گزارشات ارائه شده در صنعت، مبنی بر انرژی ضربه بهتر الکتروود روتیلی E6013 نسبت به الکتروود سلولزی E6010 در دمای محیط (بر خلاف نتایج گزارش شده توسط سازندگان الکتروود [۱۶])، این تحقیق انجام گردید تا بررسی علمی بر روی این موضوع و سایر خواص مکانیکی (کشش، خمش و سختی) فلزجوش حاصل از این الکتروودها جهت بر طرف نمودن ابهامات و اختلاف نظرات به وجود آمده در صنعت با گزارشات ارائه شده انجام گیرد. همچنین، در این پژوهش مقدار انرژی ضربه در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد برای دو نمونه و مقدار انرژی ضربه پس از گذشت ۵۶۲ روز از فرآیند جوشکاری در دو بازه دمایی محاسبه گردید تا اطلاعات دقیق تری نسبت به سایر تحقیقات به عمل آمده، کسب شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق فولادی ST37 با ضخامت ۱۲ میلیمتر استفاده شد. جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش را که به روش اسپکتروسکوپی نشر نوری (کوانتومتری) انجام شده است، ارائه می‌دهد. برای انجام تحقیق، نمونه‌هایی با ابعاد ۳۰۰×۱۰۰ میلیمتر توسط وایرکات بریده و ناحیه اتصال ورق‌ها، مطابق استاندارد AWS A5.1-A5.1M [۲۲]، به کمک فرآیند ماشین کاری، آماده سازی شده و سپس پشت‌بند فلزی (از جنس فولاد ST37) مابین ورق‌ها متصل شد. شرایط طرح اتصال در شکل (۱) ارائه شده است. جوشکاری مطابق با شرایط و پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) انجام شد. پس از فرآیند جوشکاری صحت و سلامت جوش‌ها توسط آزمون رادیوگرافی طبق استاندارد ASME SECTION V Article 2&22 [۲۳]، ASTM E94/E94M-17 [۲۴] و شرایط مندرج در جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفته شدند. همچنین جهت تخمین انرژی جوشکاری (حرارت ورودی) و تعیین زمان سرد شدن بعد از جوشکاری از معادلات (۱) و (۲) استفاده شد [۱۰]:

$$Q_w = K \cdot Q_a = K \cdot 60 \cdot V \cdot A / S \quad (\text{Joul} / \text{mm}) \quad (1)$$

که در آن  $Q_w$  انرژی جوشکاری یا حرارت ورودی بر حسب  $Q_a$  گرمای جوشکاری،  $V$  اختلاف پتانسیل بر حسب ولت ( $v$ )،  $A$  شدت جریان جوشکاری بر حسب آمپر ( $A$ )،  $S$  سرعت پیشروی جوشکاری بر حسب  $\text{mm}/\text{min}$  و  $K$  راندمان قوس الکتریکی می‌باشد که برابر ۰/۸۵ ( $k$ ) است. همچنین با استفاده از معادله (۲)، زمان عبور از ۸۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد یا زمان سرد شدن  $\Delta t_{8/5}$  تعیین گردید [۲۵]:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{Q_w}{2\pi\lambda} \left[ \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right] \quad (2)$$

که در آن  $T_0$  درجه حرارت فلز پایه قبل از جوشکاری (دمای پیشگرم، دمای بین پاسی) بر حسب درجه سانتیگراد و  $\lambda$  ضریب انتقال حرارت (هدایت حرارتی) بر حسب  $\text{cal} /$

$\text{cm}^2 \cdot \text{s} / \text{C}$  است که برابر ۰/۱۲ می‌باشد. لازم به توضیح است که زمان عبور از ۸۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد ( $\Delta t_{8/5}$ ) و سرعت سرد شدن، با توجه به شرایط جوشکاری در جدول (۲) محاسبه شد و حل معادلات به کمک نرم افزار Excel با اعمال تبدیل واحدها صورت گرفت و بر روی دیاگرام CCT فلز جوش فولاد ساده کربنی، نرخ سرد شدن مشخص گردید.

در ادامه نمونه‌هایی جهت بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی و انجام آزمون‌های کشش، خمش، میکروسختی و ضربه مطابق شکل (۲) تهیه شدند (اعداد مندرج بر حسب میلیمتر می‌باشد). پس از نمونه برداری از قطعه مطابق استاندارد ASTM E3-11 [۲۶] و آماده‌سازی نمونه‌ها به کمک فرآیند سنباده‌زنی و پولیش، ریزساختار نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E883-11 [۲۷]، توسط میکروسکوپ نوری مدل Meiji بعد از حکاکی به مدت ۵ ثانیه با محلول نایتال ۴٪ در نواحی مشخص شده مطابق شکل (۳) مورد مطالعه قرار گرفته شدند و متوسط اندازه دانه‌های تشکیل شده با استفاده از نرم افزار آماری Image J محاسبه گردیدند. برای بررسی دقیق‌تر سطح ناحیه اتصال و فازها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل AIS2300C Seron teach مجهز به سیستم آنالیز EDS تحت ولتاژ کاری 30KV استفاده شد. همچنین جهت بررسی توزیع عناصر آلیاژی از آنالیز نقشه عنصری (Map) استفاده شد. در نهایت، جهت بررسی دقیق‌تر سطح ناحیه اتصال و شکست نگاری نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شرایط و موقعیت نمونه‌برداری نمونه‌های آزمون خواص مکانیکی، به ترتیب در جدول (۴) و شکل (۲) نشان داده شده است.

آزمون‌های ضربه و کشش طبق استاندارد AWS B4.0 [۲۸] توسط دستگاه GOTECH با مدل‌های به ترتیب GT-7052-D30 (300 J) و AL-7000-LA30 (30tonne) انجام گرفت و نمونه آزمون خمش U طبق استاندارد AWS B4.0 [۲۸] توسط دستگاه خمش سه نقطه‌ای انجام شد و در نهایت

نتایج هر آزمون به صورت میانگین گزارش شد. همچنین، خاصیت شیمیایی روکش الکترودها، با توجه به درجه قلیائی بودن آن‌ها به کمک معادله (۳) تعیین شد که در جدول (۵) لحاظ شده است [۱۰].

(۳)

$$B = \frac{\text{ترکیبات خنثی} + \text{ترکیبات قلیائی}}{\text{ترکیبات اسیدی}}$$

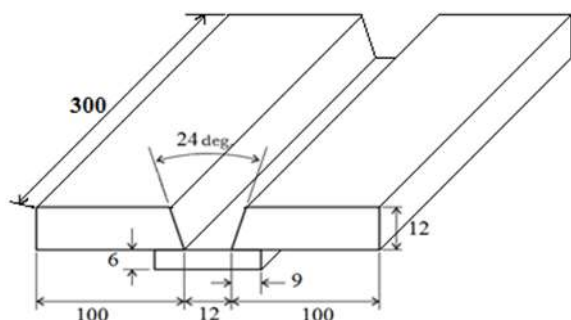
$$= \frac{CaO + MgO + CaF_2 + K_2O + Na_2O + 1/2 (MnO + FeO)}{SiO_2 + 1/2 (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

تعیین مقدار سختی ناحیه فلز جوش توسط آزمون میکروسختی تحت بار ۲۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه بر اساس استاندارد ASTM E-384-05a [۲۹] توسط دستگاه مدل HVS-1000 انجام گرفت. این آزمون در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی مقطع فلز جوش (به صورت عرضی از مقطع جوش) برای هر دو نمونه جوشکاری شده انجام گرفته است، که به ترتیب برای هر بخش، تعداد ۱۶، ۱۴ و ۱۱ نقطه سختی سنجی شده است و متوسط نتایج آن گزارش شد. لازم به ذکر است، فاصله‌ی بین

نقاط سختی سنجی شده ۰/۵ میلیمتر می‌باشد. همچنین، فاصله‌ی بخش فوقانی تا سطح جوش و بخش تحتانی تا ریشه جوش برابر ۲ میلیمتر و بخش میانی در مرکز مقطع جوش در فاصله ۵/۵ میلیمتر تا سطح جوش می‌باشد.

جدول (۱): درصد (وزنی) عناصر موجود در فلز پایه.

عناصر شیمیایی	%Fe	%C	%Si	%P	%S	%Mn
فلز پایه	۹۸/۷۴۰	۰/۰۷۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۵۲۰



شکل (۱): طرح اتصال و ابعاد طبق استاندارد AWS A5.1-2012.

جدول (۲): شرایط و پارامترهای جوشکاری.

انرژی جوشکاری (حرارت ورودی) (KJ/mm)	سرعت پیشروی (mm/min)	ولتاژ جوشکاری (V)	جریان جوشکاری (A)	دمای بین پاسی (°C)	تعداد پاس جوش (حالت پاس جوش)	قطبیت دستگاه	وضعیت جوشکاری	قطر الکترود (mm)	شرکت سازنده الکترود	کد الکترود	نوع الکترود
۱/۰۶ - ۱/۱۴	۱۰۰	۲۰	۱۰۴ الی ۱۱۲	۱۱۰ الی ۱۵۰	۱۱ (خطی)	DCEP	تخت	۳/۲۵	شرکت صنعتی آما	1047P	E6010
۱/۱۱ - ۱/۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۲۰ الی ۱۳۰	۱۱۰ الی ۱۵۰	۱۱ (خطی)	DCEN	تخت	۳/۲۵	شرکت صنعتی آما	2000	E6013

جدول (۳): شرایط آزمون رادیوگرافی نمونه‌های جوشکاری شده.

سایز فیلم (cm)	ضخامت قطعه در محل جوش (mm)	دانسیته فیلم $kg/m^3$	فاصله منبع تابش تا فیلم (mm)	زمان تابش اشعه (برای هر قطعه)	ولتاژ تصویر برداری (KV)	توان اشعه X (KW)	نوع فیلم
۱۰×۳۲	۲۰	۳/۵ - ۲/۵	۷۰۰	۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه	۱۶۰	۱۶۰	FOMADOXR7-D7



جدول (۵): خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فلزجوش خالص در این پژوهش [۱۶].

ترکیب شیمیایی							نمونه
درجه قلیائی	کربن	اکسیژن	منگنز	سیلیسیم	گوگرد	فسفر	E6010
۱/۲	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۵	۰/۱۵	<۰/۰۲	<۰/۰۲	
خواص مکانیکی							
استحکام کششی (n/mm <sup>2</sup> )	استحکام تسلیم (n/mm <sup>2</sup> )	ازدیاد طول A5 (%)	مقاومت به ضربه (J) ISO - V				
			+۲۰ درجه سانتیگراد		-۳۰ درجه سانتیگراد		
>۴۲۰	>۳۶۰	>۲۲	۸۰		>۲۷		
ترکیب شیمیایی							نمونه
درجه قلیائی	کربن	اکسیژن	منگنز	سیلیسیم	گوگرد	فسفر	E6013
درصد وزنی %	۰/۵۵	۰/۰۸	۰/۵۰	۰/۴۰	<۰/۰۲	<۰/۰۲	
خواص مکانیکی							
استحکام کششی (n/mm <sup>2</sup> )	استحکام تسلیم (n/mm <sup>2</sup> )	ازدیاد طول A5 (%)	مقاومت به ضربه (J) ISO - V				
			+۲۰ درجه سانتیگراد				
>۴۲۰	>۳۶۰	>۲۲	>۶۰				

شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، صحت و سلامت جوش ها مورد تایید می باشند.

### ۳- نتایج و بحث

تصاویر فیلم رادیوگرافی فلزجوش نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج آزمون رادیوگرافی در جدول (۶) ارائه



(الف)



(ب)

شکل (۴): تصاویر فیلم رادیوگرافی از فلزجوش نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود: الف) نمونه E6010، ب) نمونه E6013.

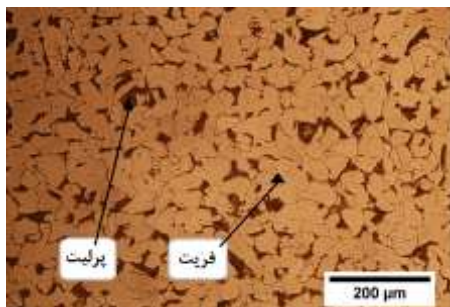
جدول (۶): نتایج آزمون رادیوگرافی نمونه‌های جوشکاری شده.

نمونه	Weld NO. (cm)	FFD (cm)	حساسیت (%)	تکنیک	تراکم	اندازه عیوب و سطح شدت	نوع عیب و محل / موقعیت (cm)	نتیجه
E6010	۰ - ۳۰	۸۰	۲-۱	SWSI <sup>۱</sup>	۴-۲	حداکثر قطر یا طول کمتر از ۱/۲ میلی‌متر	تخلخل: ۱۶	مجاز
E6013	۰ - ۳۰	۸۰	۲-۱	SWSI	۴-۲	حداکثر قطر یا طول کمتر از ۰/۸ میلی‌متر	تخلخل: ۱۸ - ۱۹	مجاز



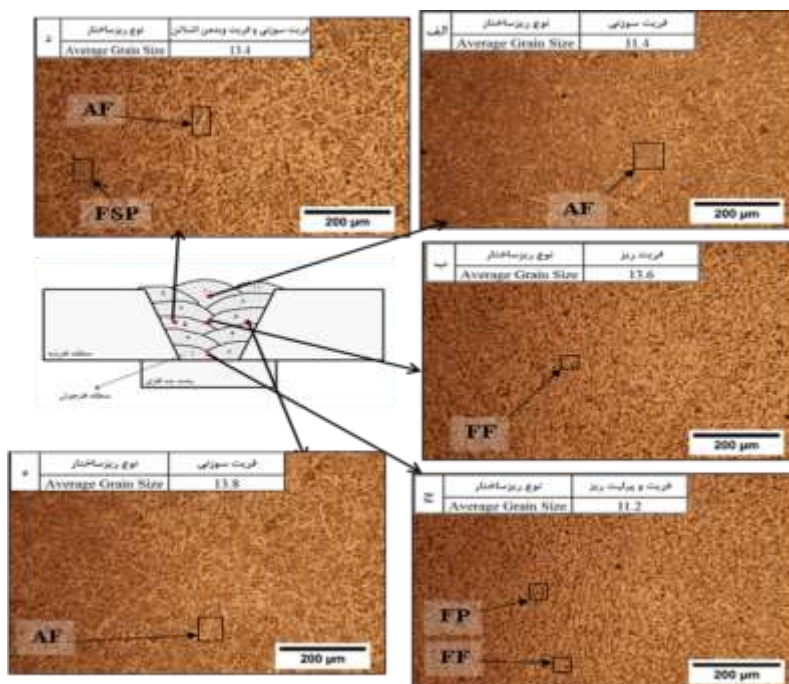
ریز با متوسط اندازه دانه ۱۳/۶ میکرومتر و در پاس ریشه دارای ساختار فریت و پرلیت ریز با متوسط اندازه دانه ۱۱/۲ میکرومتر می‌باشد. در شکل (۷)، مشاهده می‌شود که ریزساختار میکروسکوپی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 در پاس دهم (رویه)، فریت خشن ویدمن اشتاتن با متوسط اندازه دانه ۶۰/۴ میکرومتر، در پاس پنجم ریزساختار فریت ظریف با متوسط اندازه دانه ۱۵/۹ میکرومتر، در پاس ششم ریزساختار فریت ظریف با متوسط اندازه دانه ۱۷/۳ میکرومتر، در مرز بین پاس شش و پنج ریزساختار فریت ظریف با متوسط اندازه دانه ۱۳/۶ میکرومتر و در پاس ریشه ریزساختار فریت ظریف با متوسط اندازه دانه ۱۳/۳ میکرومتر تشکیل شده است. با توجه به شرایط حرارت ورودی یکسان و تشکیل ریزساختارها و اندازه دانه‌ها، می‌توان تفاوت در چقرمگی ضربه نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 را نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 انتظار داشت [۳۰].

با توجه به محاسبات زمان سرد شدن دو نمونه در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد  $\Delta t_{8/5}$  مطابق جدول (۷) و انطباق با دیاگرام CCT فلز جوش فولاد ساده کربنی (شکل (۸))، می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش سرعت سرد شدن (یا کاهش زمان سرد شدن) نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 به میزان جزئی نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 موجب افزایش کسر حجمی فازهای مناسب‌تر (از جمله فریت سوزنی) در منطقه فلز جوش شده است که موجب چقرمگی ضربه و استحکام مکانیکی مطلوب‌تری می‌شود [۱۰-۳۱].

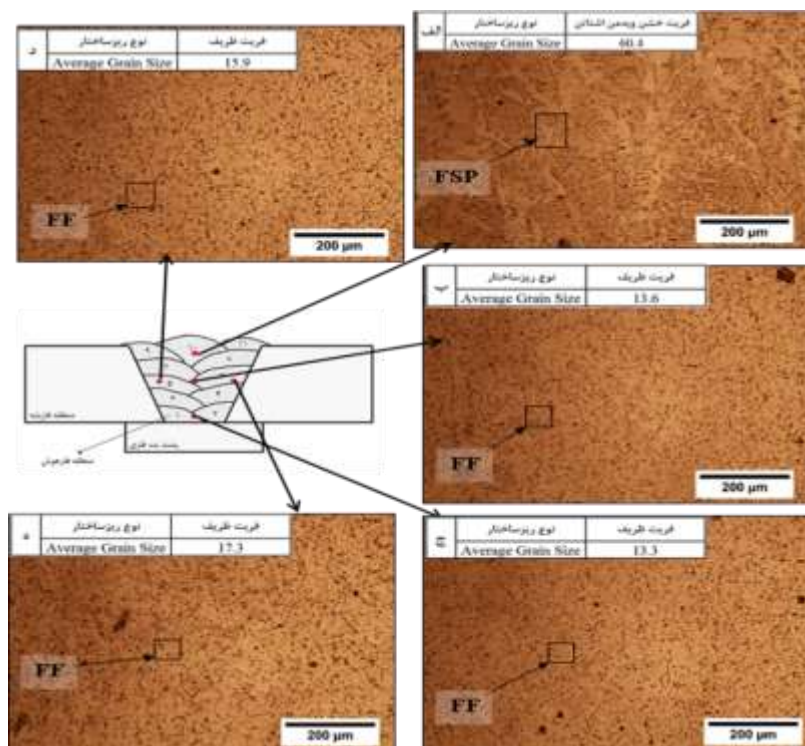


شکل (۵): تصویر میکروسکوپی فولاد ST37 با متوسط اندازه دانه ۴۳ میکرون (درصد فریت و پرلیت به ترتیب برابر ۶۰ و ۴۰ می‌باشد).

شکل (۵) ریزساختار فلز پایه (فولاد ST37) را نشان می‌دهد. ریزساختارهای فلز پایه شامل فریت و پرلیت می‌باشد که میانگین متوسط اندازه دانه در شش نقطه مختلف برابر ۴۲/۸۲ میکرومتر است. شکل (۶) و (۷) به ترتیب، تصویر ریزساختار منطقه فلز جوش در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی (پاس‌های مشخص شده مطابق شکل (۳)) به همراه نوع ریزساختار و متوسط اندازه دانه نمونه‌های جوشکاری شده با فلز پرکننده E6010 و E6013 را نشان می‌دهد. شایان ذکر است، نقاط کروی شکل تیره رنگ، آخال ناشی از عملیات جوشکاری می‌باشد. همانگونه که در تصویر میکروسکوپ نوری شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، با تغییر نوع فلز پرکننده در مناطق فلز جوش دو نمونه، نوع فاز و میزان فازهای تشکیل دهنده نیز تغییر می‌کنند. ساختار فریتی و پرلیتی این مناطق در دو نوع الکتروود مصرفی از لحاظ نوع فریت تشکیل دهنده (جزء ریزساختار) مشابه یکدیگر نبوده و عدم یکنواختی در ریزساختار در بخش‌های مختلف، قابل مشاهده می‌باشد، که این امر ناشی از تفاوت در حرارت ورودی جوشکاری (جدول (۲)) و جنس پوشش الکتروودها است [۱۰]. از تصاویر متالوگرافی ارائه شده در شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان استنباط نمود که در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013، با کاهش زمان سرد شدن (افزایش سرعت سرد شدن)، ریزساختار از فریت ویدمن اشتاتن در پاس‌های رویه و فریت ظریف در پاس‌های ریشه و میانی، به فریت سوزنی و فریت ریزهم محور در پاس‌های رویه و پاس‌های میانی و فریت/پرلیت ریز در پاس ریشه در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 تبدیل شده است. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، ریزساختار میکروسکوپی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 در پاس دهم (رویه)، فریت سوزنی با متوسط اندازه دانه ۱۱/۴ میکرومتر، در پاس پنجم ریزساختار فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن با متوسط اندازه دانه ۱۳/۴ میکرومتر، در پاس ششم ریزساختار فریت سوزنی با متوسط اندازه دانه ۱۳/۸ میکرومتر، در مرز بین پاس شش و پنج دارای ساختار فریت



شکل (۶): تصاویر میکروسکوپی نوری از منطقه فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکترود E6010. (AF: فریت سوزنی، FF: فریت ریز، FP: پرلیت ریز، FSP: فریت ویدمن اشتانتن).



شکل (۷): تصاویر میکروسکوپی نوری از منطقه فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکترود E6013. (FF: فریت ظریف، FSP: فریت خشن ویدمن اشتانتن).

بیشتری را در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 می توان پیش بینی نمود. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود، توزیع آخال ها کاملاً اتفاقی بوده است و متوسط قطر آخال های تشکیل شده در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 کمتر می باشد که ناشی از مقدار اکسیژن کمتر در فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010، مطابق شکل (۱۰) و (۱۱) می باشد [۳۳]. غالباً هر چه شعاع میانگین آخال ها کوچکتر باشد، چقرمگی ضربه افزایش می یابد. در مقابل، هر چه اندازه ی آخال بزرگتر باشد، تمرکز تنش در فصل مشترک آن با زمینه بیشتر است و نتیجه جوانه زنی و رشد حفره تسهیل می شود [۱۵].



(الف)



(ب)

شکل (۹): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از منطقه فلز جوش و آخال های نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده: الف) E6010، ب) E6013

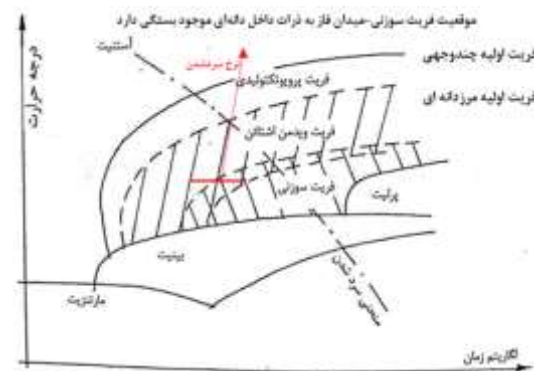
شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب، تصاویر تجزیه و تحلیل عنصری آخال ها به کمک طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) در

جدول (۷): زمان و سرعت سرد شدن محاسبه شده برای نمونه های جوشکاری شده.

نمونه	زمان سرد شدن ( $t_{8/5}$ ) (s)	سرعت سرد شدن $\frac{c^0}{s}$
E6010	۱۴/۵ - ۱۴/۶	۲۰/۶۹ - ۲۰/۵۵
E6013	۱۵ - ۱۵/۲	۲۰ - ۱۹/۹۴

جدول (۸): نوع و کسر حجمی آخال در منطقه فلز جوش نمونه های جوشکاری شده.

نمونه	نوع آخال	رده (کلاس)	میانگین کسر حجمی آخال (%)
E6010	اکسیدی گلبولار Type D	۱	۲/۳
E6013	اکسیدی گلبولار Type D	۱	۳/۶



شکل (۸): نمودار شماتیکی CCT برای فولاد ST37 [10].

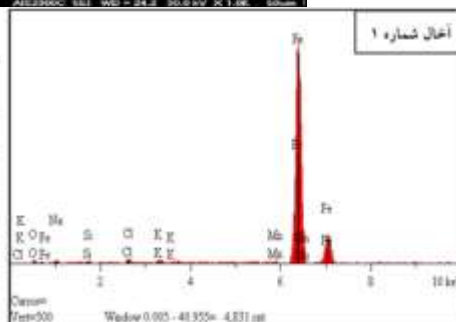
شکل (۹)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM) از منطقه فلز جوش و جدول (۸)، نوع آخال ها بر اساس استاندارد ASTM E45-05 [32] و میانگین کسر حجمی آخال نمونه های جوشکاری شده با الکتروودهای E6010 و E6013 را نشان می دهد. با توجه به استاندارد نامبرده، می توان بیان کرد مورفولوژی آخال های تشکیل شده در دو نمونه جوشکاری شده از نوع اکسیدی گلبولار (کروی) Type D می باشد. همچنین بر اساس ضخامت یا قطر آخال با توجه به استاندارد نامبرده، این نوع آخال ها در کلاس ۱ (Heavy) قرار می گیرند، که این طبقه بندی طبق عرض آخال می باشد. کسر حجمی آخال ها در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 برابر ۲/۳ درصد و نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 برابر ۳/۶ درصد تعیین شد که در این صورت خواص چقرمگی ضربه

شده با الکتروود E6013 بیشتر باشد. مورفولوژی آخالها در هر دو نمونه جوشکاری شده به شکل کروی و یا مدور بوده است و با وجود تفاوت در نوع جنس پوشش الکتروودها تغییری در مورفولوژی آنها به وجود نیامده است و تغییر قانونمندی در مشخصه‌های ظاهری آخالها دیده نمی‌شود. شکل (۱۲) و (۱۳) به ترتیب، تصاویر نقشه توزیع عناصر آلیاژی فلزجوش نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است توزیع عناصر آلیاژی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 بصورت یکنواخت در زمینه و آخالها بوده ولی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 (شکل (۱۳)) تجمع و توزیع عناصر آلیاژی سیلیسیم، منگنز و تیتانیوم در اطراف آخالها مشهودتر است.

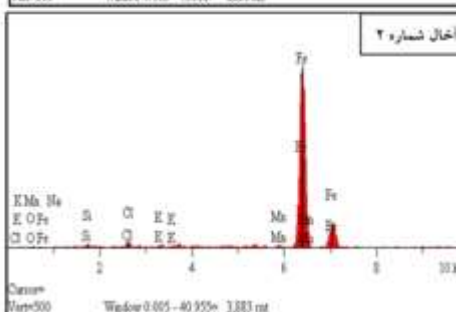
نمونه‌های جوشکاری شده با فلز پرکننده E6010 و E6013 را نشان می‌دهد. با توجه به شکلها و نتایج آنالیز عنصری، اکسیدی بودن ماهیت این آخالها تایید می‌شود. از آنجایی که آخالهای تشکیل شده در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 مطابق شکل (۱۱)، دارای درصد بیشتری اکسیژن نسبت به آخالهای موجود در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 می‌باشد (آخالهای نمونه E6010 دارای ۳/۷۰-۲/۱۸ درصد وزنی اکسیژن و آخالهای نمونه E6013 دارای ۳۶/۳۵-۸۲/۹ درصد وزنی اکسیژن می‌باشد)، لذا کسر حجمی آخالهای اکسیدی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 بیشتر از نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 می‌باشد. در نتیجه، با توجه به مقدار کسر حجمی و قطر میانگین آخالها، پیش‌بینی می‌شود که چقرمگی ضربه نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 نسبت به نمونه جوشکاری



EL	Line	Atomic %	Conc.	Units
O	Ka	10.402	3.702	wt.%
Na	Ka	15.972	8.168	wt.%
Si	Ka	2.499	1.561	wt.%
Cl	Ka	2.477	1.953	wt.%
K	Ka	1.754	1.526	wt.%
Mn	Ka	0.657	0.803	wt.%
Fe	Ka	66.238	82.286	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



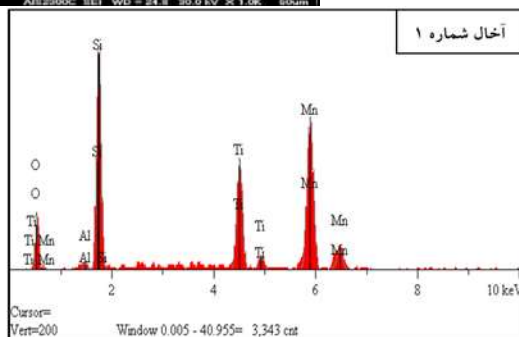
EL	Line	Atomic %	Conc.	Units
O	Ka	6.674	2.188	wt.%
Na	Ka	6.737	3.175	wt.%
Si	Ka	4.179	2.406	wt.%
Cl	Ka	3.678	2.672	wt.%
K	Ka	1.580	1.266	wt.%
Mn	Ka	1.199	1.350	wt.%
Fe	Ka	75.954	86.943	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



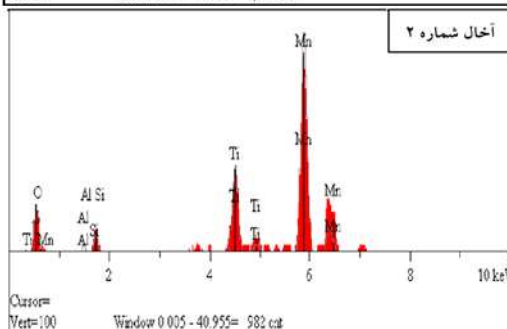
شکل (۱۰): تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 به همراه آنالیز عنصری از آخال نشان داده شده در تصویر.



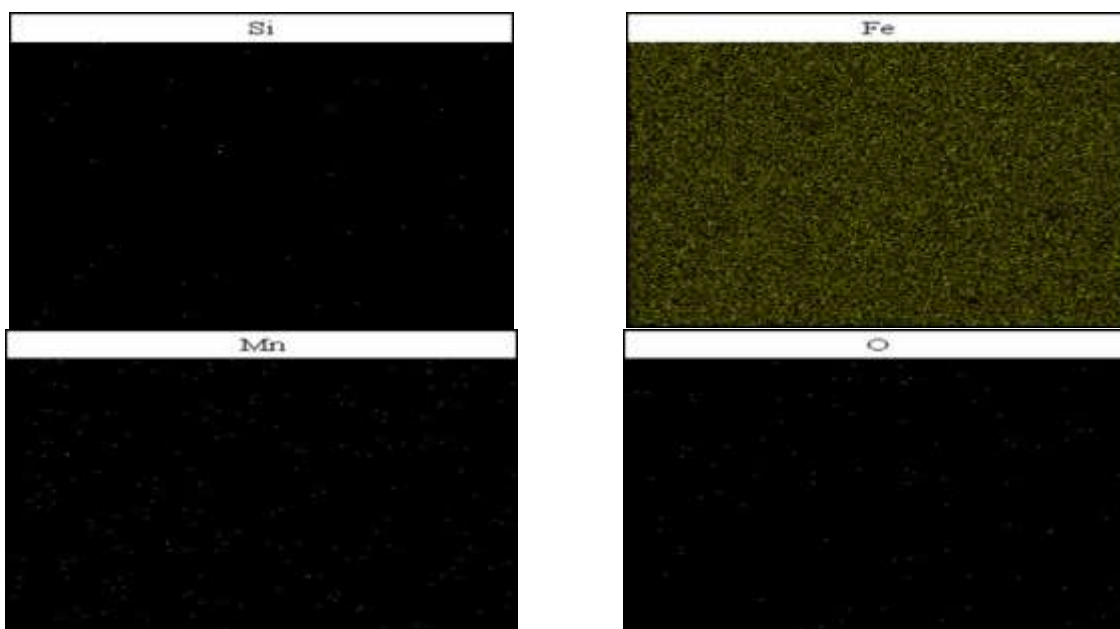
Elt.	Line	Atomic %	Conc	Units
O	Ka	56.356	35.368	wt.%
Al	Ka	1.295	1.371	wt.%
Si	Ka	24.894	27.425	wt.%
Ti	Ka	6.439	12.099	wt.%
Mn	Ka	11.016	23.738	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



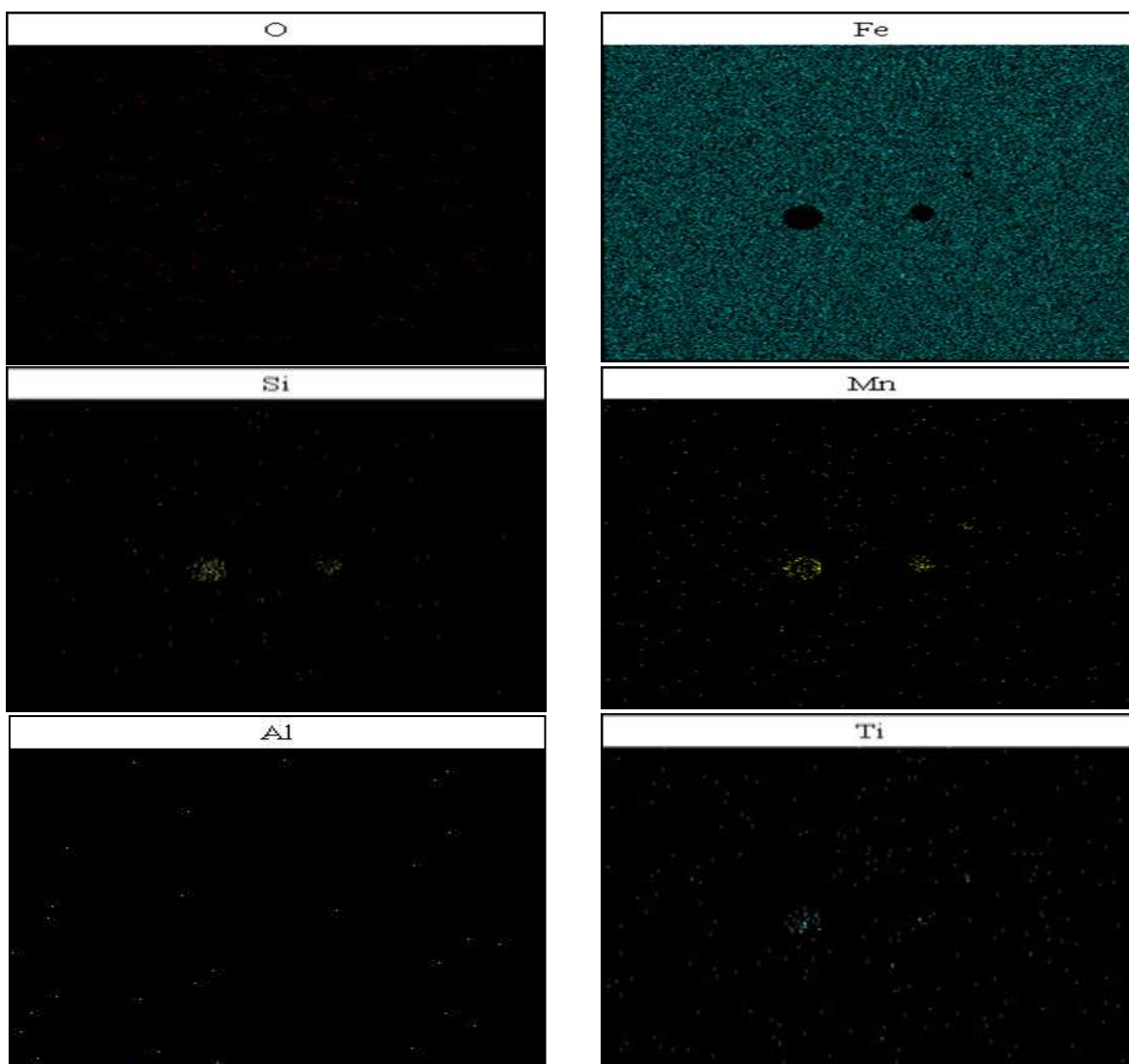
Elt.	Line	Atomic %	Conc	Units
O	Ka	24.634	9.822	wt.%
Al	Ka	4.922	3.310	wt.%
Si	Ka	10.467	7.326	wt.%
Ti	Ka	14.651	17.488	wt.%
Mn	Ka	45.326	62.054	wt.%
		100.000	100.000	wt.%



شکل (۱۱): تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 به همراه آنالیز عنصری از آخال نشان داده شده در تصویر.



شکل (۱۲): تصاویر آنالیز شده از موقعیت و تجمع عناصر موجود در تصاویر میکروسکوپی برای نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 در ناحیه فلز جوش.



شکل (۱۳): تصاویر آنالیز شده از موقعیت و تجمع عناصر موجود در تصاویر میکروسکوپی برای نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 در ناحیه فلز جوش و آخال‌ها.

می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۴) (نتایج آزمون پس از فرآیند جوشکاری)، کمترین چقرمگی ضربه مربوط به فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد و بیشترین چقرمگی ضربه مربوط به فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 در دمای محیط می‌باشد. تفاوت در مقدار انرژی (چقرمگی) ضربه دو نمونه جوشکاری شده، وابسته به نوع ریزساختار تشکیل شده، متوسط اندازه دانه‌ها، میانگین قطر آخال، کسر حجمی آخال می‌باشد که تمامی این عوامل موجب افزایش انرژی (چقرمگی) ضربه نمونه جوشکاری شده با

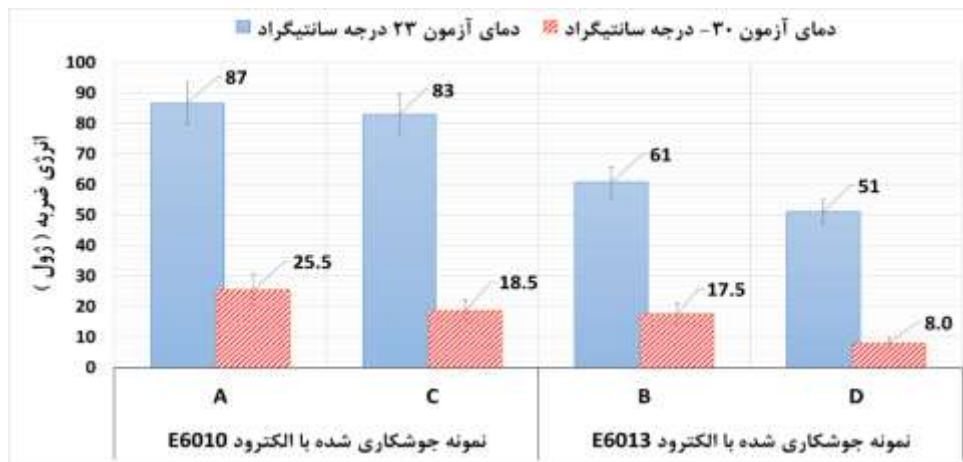
میزان انرژی ضربه فلز جوش (چقرمگی ضربه) نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای E6010 و E6013 در جدول (۹) و شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون ضربه (نتایج آزمون پس از فرآیند جوشکاری) مشخص می‌گردد که نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010، دارای متوسط انرژی ضربه ۸۷ ژول در دمای محیط و ۲۵/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد می‌باشد و نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 که دارای متوسط انرژی ضربه ۶۱ ژول در دمای محیط و ۱۷/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد بوده است، چقرمگی ضربه بیشتری را دارا

الکتروود E6010 نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 در هر دو دمای آزمون (دمای محیط و ۳۰- درجه سانتیگراد) شده است [۳۴]. با توجه به جدول (۹) و شکل (۱۴)، نتایج آزمون ضربه پس از گذشت ۵۶۲ روز از فرآیند جوشکاری نشان دهنده آن است که نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010، دارای متوسط انرژی ضربه ۸۳ ژول در دمای محیط و ۱۸/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد می باشد و در مقابل، نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013، دارای متوسط انرژی ضربه ۵۱ ژول در دمای محیط و ۸ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد بوده است. کاهش مقدار انرژی ضربه دو نمونه جوشکاری شده به مقدار ناچیز پس از گذشت ۵۶۲ روز، حاکی از نفوذ هیدروژن اتمی به واسطه پوشش الکتروودها در منطقه فلز جوش بوده است که می تواند به نواحی با تمرکز تنش بالا منتقل و منجر به کاهش انعطاف پذیری، کاهش استحکام شکست، تشکیل و انتشار عیوب سطحی و داخلی مانند ترک های هیدروژنی (HIC)، ایجاد عیوب ماکروسکوپی به دلیل به دام افتادن در فصل مشترک ها و در نهایت سبب شکست شود [۳۵]. با توجه به شکل (۱۴)، می توان مشاهده کرد که نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 دارای افت بیشتر انرژی ضربه (حدود ۵۰٪) نسبت به نمونه جوشکاری شده

با الکتروود E6010 (حدود ۳۰٪) می باشد که دلیل این اتفاق به درجه قلیایی بودن (B) پوشش الکتروود باز می گردد. لازم به ذکر است که چنانچه B از ۱ کمتر باشد، پوشش الکتروود از نوع اسیدی بوده و برای بالاتر از ۱ از نوع قلیایی خواهد بود [۱۰]. با توجه به محاسبات انجام شده، الکتروودهای روتیلی (E6013) دارای ۰/۵۵ درجه قلیائیت که نشان دهنده خاصیت اسیدی و در مقابل، الکتروودهای سلولزی (E6010) دارای ۱/۲ درجه قلیائیت که نشان دهنده خاصیت خنثی می باشند. در نتیجه می توان استنباط نمود که دلیل افت بیشتر انرژی ضربه نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013، افزایش جذب هیدروژن نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 می باشد. همچنین، با توجه به بیشتر بودن کسر حجمی آخال (مطابق جدول (۸)) در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 (با توجه به خاصیت اسیدی و خنثی بودن پوشش الکتروود) و تشکیل ساختار ویدمن اشتاتن در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 و در نهایت، تشکیل ساختاری ترد تر، افت به وجود آمده قابل توجیح می باشد [۱۰].

جدول (۹): نتایج آزمون شارپی نمونه های جوشکاری شده.

نمونه	نتایج آزمون پس از فرآیند جوشکاری								
	نتایج آزمون پس از گذشت ۵۶۲ روز از فرآیند جوشکاری		نتایج آزمون پس از فرآیند جوشکاری						
	انرژی ضربه (J)		انرژی ضربه (J)						
انجام شده	۳۰- درجه سانتیگراد	دمای محیط (۲۳ درجه سانتیگراد)	۳۰- درجه سانتیگراد	دمای محیط (۲۳ درجه سانتیگراد)	۳۰- درجه سانتیگراد				
E6010	۱۷	۲۰	۷۹	۸۷	۱۶	۳۵	۷۶	۹۸	۸۶
E6013	۷	۹	۵۰	۵۲	۱۵	۲۰	۶۲	۷۰	۵۰

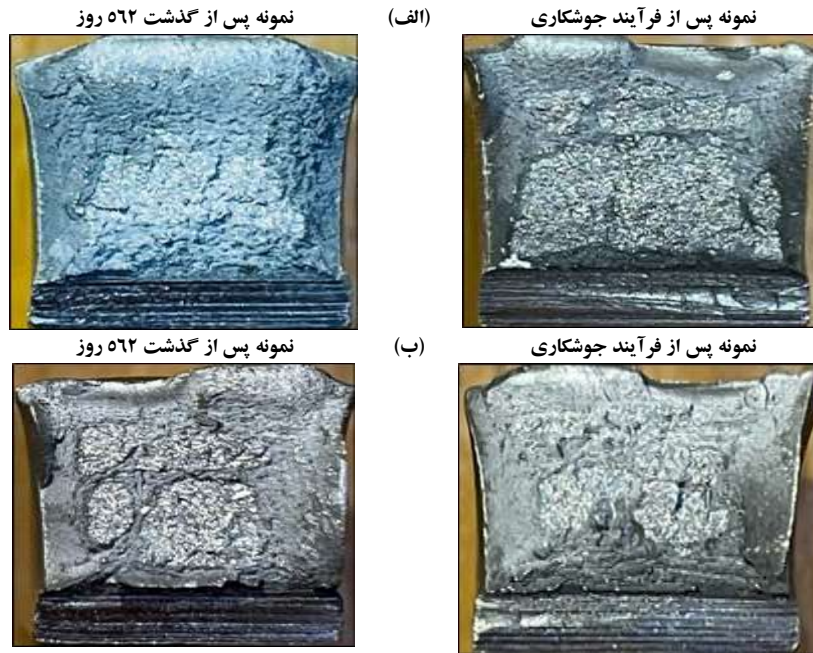


شکل (۱۴): میانگین نتایج آزمون شاری نمونه‌های جوشکاری شده (نمودار A و B: نمونه آزمون پس از فرآیند جوشکاری، نمودار C و D: نمونه آزمون پس از گذشت ۵۶۲ روز).

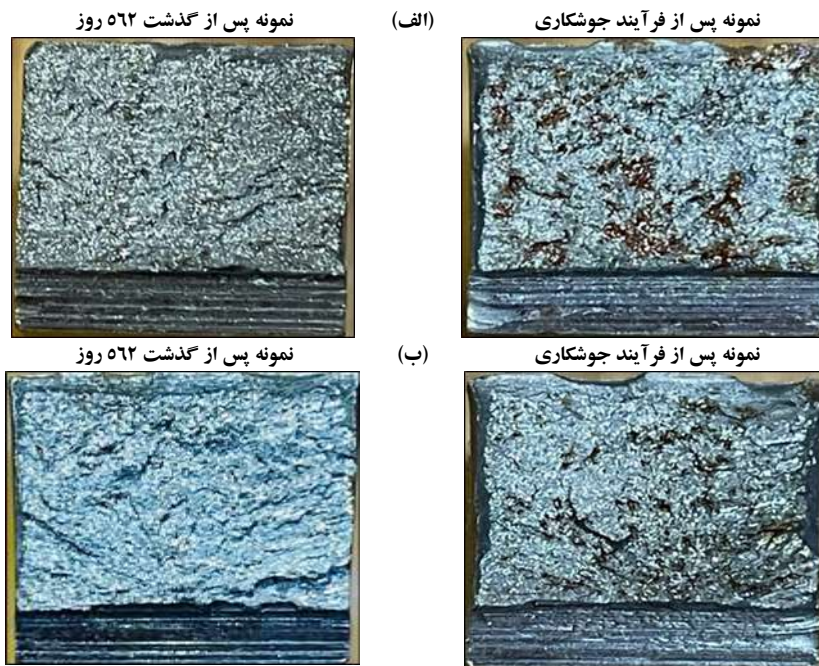
پرداخته شد و نتایج بدست آمده بدین صورت می‌باشد که درصد شکست نرم نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 (پس از فرآیند جوشکاری) در دمای محیط و دمای ۳۰- درجه سانتیگراد به ترتیب برابر ۶۰٪ و ۱۰٪ می‌باشد. در مقابل، درصد شکست نرم نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 در دمای محیط و دمای ۳۰- درجه سانتیگراد به ترتیب برابر ۶۸٪ و ۶٪ بوده است. در نتیجه همانطور که بیان شد، نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 در دمای محیط دارای درصد بیشتری شکست نرم نسبت به شکست ترد می‌باشد. همچنین، شرایط شکست در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد، حاکی از یک شکست ترد در هر دو نمونه می‌باشد. بطور کلی، می‌توان بیان نمود که دو نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 دارای شرایط یکسانی در مورفولوژی سطح شکست نمونه‌ها نسبت به یکدیگر در دماهای مشابه می‌باشند و چنین شرایطی موجب ایجاد خواص کمی و کیفی در منطقه فلزجوش به صورت یکسان می‌شود [۳۷].

در شکل (۱۵) و (۱۶)، تصاویر مقطع شکست نمونه‌های آزمون ضربه نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۷) و (۱۸) به ترتیب، تصاویر میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه پس از فرآیند جوشکاری در دمای محیط و ۳۰- درجه سانتیگراد برای نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۷-الف) و شکل (۱۸-الف)، می‌توان مشاهده نمود که مورفولوژی سطح شکست تقریباً ناهموار، سطحی روشن و کدر، دارای لبه‌های برشی، مسیرهای رودخانه‌ای (شکست نرم) و مسیر اشاعه ترک در سطح شکست و ریزحفرات می‌باشد که این موضوع بیانگر درصد بیشتر شکست نرم نسبت به شکست ترد می‌باشد [۳۷-۳۶]. لازم به ذکر است که هرگاه مقطع شکسته شده نمونه‌ها به صورت لب به لب به یکدیگر چسبانده شود، قطعه به حالت اولیه باز می‌گردد که این موضوع نشانگر یک شکست ترد در هر دو نمونه می‌باشد [۳۶]. نمونه‌های آزمون ضربه هر دو نمونه در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد (شکل ۱۷-ب) و شکل (۱۸-ب)، سطوح شکست روشن‌تر، رشد ترک مرزدانه‌ای و شکست بین دانه‌ای مشاهده می‌شود که نشان دهنده سطح شکست ترد تری نسبت به دمای محیط می‌باشد. در این راستا، مطابق استاندارد ASTM E23-16b [۳۸] به بررسی و تعیین سطح شکست برشی (شکست نرم) نمونه‌های آزمون ضربه

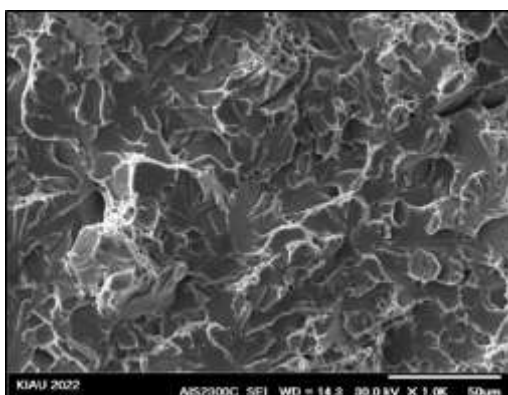




شکل (۱۵): نمونه‌های آزمون ضربه در دمای محیط با الف: الکتروود E6013 و ب: الکتروود E6010.

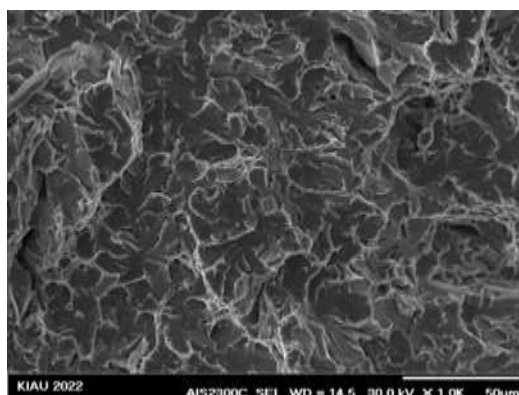


شکل (۱۶): نمونه‌های آزمون ضربه در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد با الف: الکتروود E6013 و ب: الکتروود E6010.

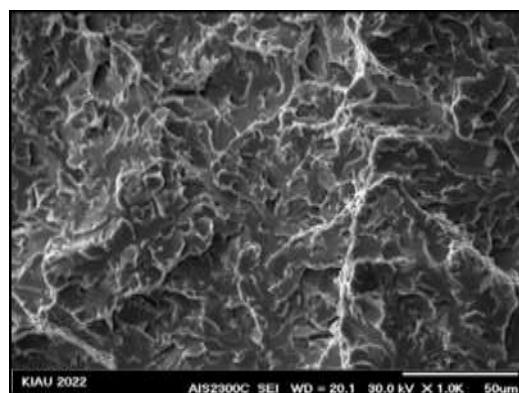


(ب)

شکل (۱۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013: الف) دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و ب) دمای ۳۰- درجه سانتیگراد.



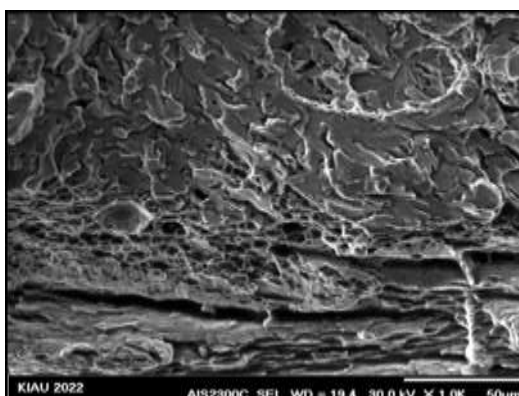
(الف)



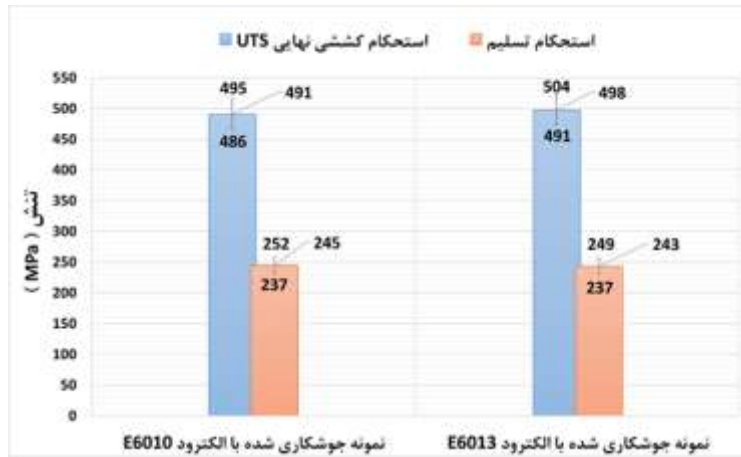
(ب)

شکل (۱۷): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010: الف) دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و ب) دمای ۳۰- درجه سانتیگراد.

نتایج آزمایش کشش مربوط به فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده توسط الکتروودهای E6010 و E6013 در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده در نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 تقریباً مشابه یکدیگر هستند. بدین صورت که، نمونه جوشکاری شده با الکتروودهای E6010 و E6013 به ترتیب دارای میانگین استحکام تسلیم (۲۴۵MPa و ۲۴۳MPa) و استحکام کشش نهایی (۴۹۱MPa و ۴۹۸MPa) می‌باشد. در حالت کلی اختلاف جزئی در میزان استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم را می‌توان به نوع ریزساختار، اندازه دانه‌ها و کسر حجمی آخال‌ها مرتبط دانست [۱۰]. با توجه به نوع ریزساختار در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013، می‌توان بیان کرد که تشکیل فاز فریت ویدمن اشتاتن و فریت ظریف در منطقه فلزجوش موجب افزایش جزئی استحکام کششی نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 شده است و در مقابل، متوسط اندازه دانه کمتر و تشکیل فاز فریت سوزنی و فریت ریز هم محور در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 موجب افزایش جزئی استحکام تسلیم نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 شده است.



(الف)



شکل (۱۹): نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده.

حد مجاز استاندارد AWS D1.1/D1.1M [۴۰]، نمونه مورد تایید می‌باشد. بروز ترک می‌تواند ناشی از پارامترهای جوشکاری و دانه‌های ریز و سوزنی در مقطع جوش باشد که در هنگام اعمال تنش، دچار حداکثر تغییر شکل شده و رشد ترک در آن رخ داده است [۳].



(الف)



(ب)

شکل (۲۰): تصاویر نمونه‌های آزمون خمش جوشکاری شده با الکتروودهای: الف) E6010، ب) E6013.

تصاویر نمونه‌های آزمون خمش در شکل (۲۰) نشان داده شده است و نتایج آزمایش مربوط به فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده توسط الکتروودهای E6010 و E6013 در جدول (۱۰) ارائه شده است. با توجه به استاندارد ASTM E290-09 [۳۹]، نتایج آزمون خمش در جهت بررسی خواص انعطاف پذیری، ارزیابی مواد با توانایی مقاومت در برابر ترک یا سایر بی‌نظمی‌های سطحی در طول یک خم مداوم صورت می‌گیرد. در این تحقیق ضخامت و عرض نمونه به ترتیب برابر ۳۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر و زاویه خمش ۱۸۰ درجه می‌باشد. خمش، موجب اعمال تنش در منطقه فلز جوش می‌شود. پاسخ به این تنش، ایجاد کرنش می‌باشد و درجه این کرنش بستگی به استحکام تسلیم دارد. همانطور که قبلاً ذکر شد، استحکام تسلیم در دو نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 به واسطه نوع ساختار تشکیل شده، اندازه دانه و کسر حجمی آخال‌ها در ناحیه فلز جوش تقریباً یکسان می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که دو نمونه جوشکاری شده به دلیل استحکام تسلیم یکسان و مقدار زاویه خمش نهایی (مطابق جدول (۱۰)) دارای انعطاف پذیری و نرمی یکسانی می‌باشند. دیگر نتیجه بدست آمده از آزمون خمش، جوش‌هایی با نفوذ ریشه مناسب و نبود عیب عدم نفوذ در پاس ریشه می‌باشد. در نتایج بدست آمده، ترکی به طول ۰/۵ میلی‌متر در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 مشاهده شد که با توجه به

جدول (۱۰): نتایج آزمون خمش نمونه‌های جوشکاری شده.

نمونه	مقطع نمونه (ضخامت)	نوع مقطع آزمون	محل نمونه برداری	قطر ماندریل (mm)	زاویه خمش نهایی	توضیحات	حد مجاز استاندارد AWS D1.1/D1.1M(2020) (mm)	نتیجه آزمون
E6010	کامل	تخت	ریشه	۳۸/۱	۶۲	ترکی به طول ۰/۵ میلی متر در جوش مشاهده شده است.	Max. 3	قابل قبول
E6013	کامل	تخت	ریشه	۳۸/۱	۶۴	هیچگونه عیبی مشاهده نشده است.	-	قابل قبول

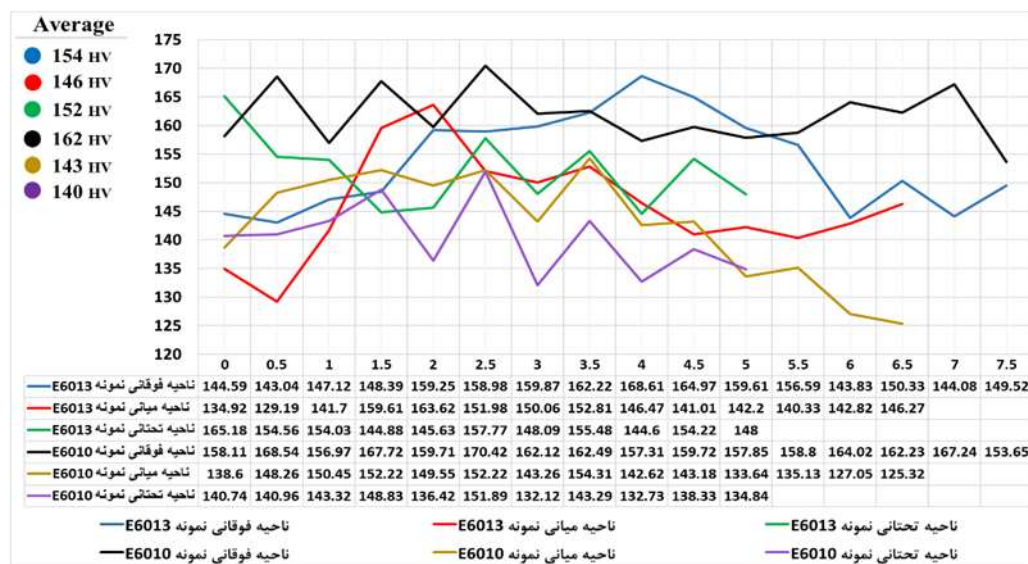
پروفیل تغییرات میکروسختی سنجی منطقه فلز جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای E6010 و E6013 در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی در شکل (۲۱) نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی مقدار میکروسختی بر حسب HV و محور افقی، فاصله بین نقاط سختی سنجی شده را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. نتایج آزمون میکروسختی سنجی نشان می‌دهد که میانگین مقدار سختی در مقطع فلز جوش نمونه‌های E6010 و E6013 به طور میانگین، به ترتیب برابر ۱۴۸ و ۱۵۰ HV می‌باشد. به عبارتی، میانگین مقدار سختی در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6010 به ترتیب برابر ۱۶۲، ۱۴۳ و ۱۴۰ HV می‌باشد. در مقابل، مقدار سختی نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6013 در سه ناحیه گفته شده به ترتیب برابر ۱۵۴، ۱۴۶ و ۱۵۲ HV می‌باشد که تفاوت در مقدار سختی در هر دو نمونه (نواحی مختلف) را می‌توان ناشی از نوع ساختار تشکیل شده و متوسط اندازه دانه‌ها (مطابق شکل‌های (۶) و (۷)) دانست. همانطور که در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده در راستای نمایش تغییرات سختی برای این فولاد و فلز جوش در این دامنه تعریف شده است. مقادیر سختی اندازه گیری شده در نواحی مختلف هر دو نمونه دارای پراکندگی می‌باشند که دلیل این پراکندگی را می‌توان عدم یکنواختی ریزساختار تشکیل شده با متوسط اندازه دانه‌های متفاوت در بخش‌های مختلف ریزساختار عنوان نمود. میزان سختی در هر دو نمونه با نزدیک شدن به مرز جوش در ناحیه اتصال و سپس مرکز فلز جوش بیشتر می‌شود که می‌توان آن را

به وجود آخال‌ها، همگن بودن ساختار، متوسط اندازه دانه و ریزساختار تشکیل شده نسبت داد [۹]. با توجه به رابطه مستقیم سختی با استحکام نهایی، نتایج بدست آمده بیانگر استحکام معادل بالاتر در فلز جوش نسبت به فلز پایه می‌باشند و لازم به ذکر است، در منطقه فلز جوش، مناطق تمپر شده ناشی از پاس‌های بعد، سختی نسبت به قسمت سطح فوقانی جوش به میزان قابل ملاحظه‌ای پایین تر دیده می‌شود [۹].

مشاهده و بررسی نتایج بدست آمده در منطقه فلز جوش بیانگر آن است که، سختی نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6013، در قسمت‌های فوقانی، میانی و تحتانی فلز جوش تفاوت چندانی نسبت به نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6010 ندارد و تفاوت ناچیز در مقدار سختی نمونه‌ها ناشی از نوع ریزساختار و متوسط اندازه دانه‌ها می‌باشد. با این وجود، مقدار سختی در ناحیه فوقانی دو نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6010 و E6013 به ترتیب برابر ۱۶۲ و ۱۵۴ HV بدست آمده است. دلیل افزایش سختی در نمونه E6010، متوسط اندازه دانه‌های بسیار کوچکتر نسبت به نمونه E6013 می‌باشد. مقدار سختی در ناحیه میانی دو نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6010 و E6013 به ترتیب برابر ۱۴۳ و ۱۴۶ HV می‌باشد که نوع ریزساختار تشکیل شده در این ناحیه (فریت ریز و فریت ظریف) با توجه به متوسط اندازه دانه برابر (۱۳/۶ میکرومتر) موجب سختی به نسبت یکسان شده است. همچنین، مقدار سختی در ناحیه تحتانی دو نمونه جوشکاری شده با الکترودهای E6010 و E6013 به ترتیب برابر ۱۴۰ و ۱۵۲ HV می‌باشد. دلیل افزایش سختی در نمونه E6013، نوع ریزساختار

متوسط اندازه دانه‌های کمتر دارای مقدار سختی به همان اندازه بالا می‌باشد. عموماً با افزایش استحکام و یا سختی به دلیل وجود فاز فریت ویدمن اشتاتن، قابلیت تغییر فرم پلاستیک ماده و در نتیجه چقرمگی ضربه در حین شکست کاهش می‌یابد [۱۰].

تشکیل شده (فریت ظریف) نسبت به نمونه E6010 (فریت و پرلیت ریز) می‌باشد که می‌توان کاهش سختی در نمونه E6010 را ناشی از تشکیل فاز پرلیت در این ناحیه دانست. به طور کلی، سختی فلز جوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013 به واسطه نوع ریزساختار، دارای مقدار سختی بالایی بوده و در مقابل، نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 به واسطه



شکل (۲۱): نتایج آزمون میکروسختی سنجی نمونه‌های جوشکاری شده در منطقه فلز جوش.

تشکیل شده در نمونه E6010 و متوسط اندازه دانه کمتر، موجب افزایش چقرمگی ضربه نمونه E6010 نسبت به نمونه E6013 می‌شود.

۲- زمان سرد شدن و سرعت سرد شدن به ترتیب برای نمونه E6010 برابر با ۱۴/۶-۱۴/۵ ثانیه و ۲۰/۶۹-۲۰/۵۵ درجه سانتیگراد بر ثانیه و نمونه E6013 برابر ۱۵/۲-۱۵/۱ ثانیه و ۱۹/۹۴-۲۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه می‌باشد. افزایش سرعت سرد شدن (یا کاهش زمان سرد شدن) نمونه E6010، موجب تشکیل ساختار ظریف تری در منطقه فلز جوش شده است که موجب افزایش چقرمگی ضربه می‌شود. لذا نمونه E6013، نتیجه عکس را نشان می‌دهد.

۳- مورفولوژی آخال‌ها در فلز جوش هر دو نمونه به شکل کروی و یا مدور بوده است. همچنین کسر حجمی آخال‌ها در

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، چقرمگی ضربه و خواص مکانیکی فلز جوش فولاد ST37 جوشکاری شده به روش SMAW با الکتروودهای E6010 و E6013 بررسی گردید با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش و بررسی‌های صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که انرژی ضربه دو الکتروود E6010 و E6013، با یکدیگر همسو بوده و تناقضی که توسط مصرف کنندگان الکتروود گزارش شده بود مشاهده نگردید. همچنین مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل قابل ارایه است:

۱- نتایج بررسی ریزساختار نشان داد، با کاهش زمان سرد شدن و افزایش سرعت سرد شدن، ساختار از فریت ویدمن اشتاتن و فریت ظریف (نمونه E6013) به فریت سوزنی و فریت ریز هم محور (E6010) تبدیل شده است. عواملی همچون نوع ساختار

اندازه دانه‌های تشکیل شده، دارای انعطاف پذیری و نرمی یکسانی می‌باشند.

۸- نتایج آزمون میکروسختی نشان داد، میانگین سختی دو نمونه تفاوت فاحشی با یکدیگر ندارند و این مقدار در فلز جوش نمونه‌های E6010 و E6013 به طور میانگین، به ترتیب برابر ۱۴۸ و ۱۵۰ HV می‌باشد که ناشی از نوع ساختار و اندازه دانه می‌باشد. به طوریکه نمونه E6013 به واسطه نوع ساختار، دارای مقدار سختی بالایی بوده و در مقابل، نمونه E6010 به واسطه متوسط اندازه دانه‌های کمتر دارای مقدار سختی به همان اندازه می‌باشد.

## ۶- مراجع

[1] J. Slania, B. Slazak & M. Fidali, "Application of fast Fourier transform (FFT) in the analysis of a welding current instantaneous values waveforms during welding with a covered electrode", Archives of Metallurgy and Materials, vol. 59, no. 2, pp. 569-573, 2014.

[2] O. S. Odebiyi, S. M. Adedayo, L. A. Tunji & M. O. Onuorah, "A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes", Cogent Engineering, vol. 6, no. 1, pp. 1-32, 2019.

[۳] ا. ح. کوکی و م. غزنوی، "تکنولوژی جوشکاری"، انتشارات علمی دانشگاه صنعت شریف، چاپ پنجم، ۱۳۹۶.

[4] D. Dwivedi, K. Lepkova & T. Becker, "Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods", Royal Society Chemistr (RSC Advances)/CrossMark, vol. 7, no. 8, pp. 4580-4610, 2017.

[5] D. Sumardiyanto & S. E. Susilowati, "Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Low Carbon Steel API 5L Shielded Metal Arc Welds", American Journal of Materials Science, vol. 9, no. 1, pp. 15-21, 2019.

[۶] م. داریوندپور، ر. دهملائی و خ. رنجبر، "ارتباط ریزساختار با رفتار مکانیکی فلز جوش فولاد HSLA-100 تولید شده با روش "GTAW". فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحه ۳۵-۴۸، ۱۴۰۰.

نمونه E6010 ۲/۳ درصد و در نمونه E6013 ۳/۶ درصد تعیین شد. قطر میانگین آخال‌ها در نمونه E6010 نسبت به نمونه E6013 کمتر بود.

۴- نتایج آزمون ضربه نشان داد، نمونه E6010 پس از فرآیند جوشکاری، دارای متوسط انرژی ضربه ۸۷ ژول در دمای محیط و ۲۵/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد می‌باشد و در مقابل، نمونه E6013 دارای متوسط انرژی ضربه ۶۱ ژول در دمای محیط و ۱۷/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد است. همچنین، نمونه E6010 پس از گذشت ۵۶۲ روز از فرآیند جوشکاری، دارای انرژی ضربه ۸۳ ژول در دمای محیط و ۱۸/۵ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد می‌باشد و در مقابل، نمونه E6013 دارای انرژی ضربه ۵۱ ژول در دمای محیط و ۸ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد است. در نتیجه نمونه E6010 چقرمگی ضربه بالاتری در هر دو بازه زمانی دارد.

۵- درصد شکست نرم نمونه E6010 (پس از فرآیند جوشکاری) در دمای محیط و دمای ۳۰- درجه سانتیگراد به ترتیب برابر ۶۰٪ و ۱۰٪ می‌باشد. در مقابل، درصد شکست نرم نمونه E6013 در دمای محیط و دمای ۳۰- درجه سانتیگراد به ترتیب برابر ۶۸٪ و ۶٪ تعیین شد.

۶- نتایج آزمون کشش نشان داد، نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 و E6013 به ترتیب دارای میانگین استحکام تسلیم (۲۴۵MPa و ۲۴۳MPa) و استحکام کشش نهایی (۴۹۱MPa و ۴۹۸MPa) تقریباً یکسان، همراه با خواص مکانیکی یکسان در فلز جوش می‌باشند. نوع ریزساختار تشکیل شده و کسر حجمی آخال‌ها در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6013، موجب افزایش جزئی استحکام کششی و متوسط اندازه دانه کمتر در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E6010 موجب افزایش جزئی استحکام تسلیم شده است.

۷- نتایج آزمون خمش نشان داد، هر دو نمونه جوشکاری شده به دلیل یکسان بودن استحکام تسلیم ناشی از نوع ساختار و

- [۱۶] "راهنمای فنی محصولات تولیدی شرکت صنعتی آما"، شرکت صنعتی آما، چاپ بیست و دوم، ۱۳۹۲.
- [17] A. Kesuma, Sepfitrah Rinaldi & A. Khair, "Effect of arc welding amperage on the toughness of low alloy steel", *Journal of Ocean Mechanical and Aerospace*, vol. 31, no. 1, pp. 21-24, 2016.
- [18] S. I. Talabi, O. B. Owolabi, J. A. Adebisi & T. Yahaya, "Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steel welded joint, *Advances in Production Engineering & Management*", vol. 9, no. 4, pp. 181-186, 2014.
- [19] M. Shi, P. Zhang, C. Wang & F. Zhu, "Effect of high heat input on toughness and microstructure of coarse grain heat affected zone in Zr bearing low carbon", *ISIJ International*, vol. 54, no. 4, pp. 932-937, 2014.
- [20] M. A. Bodude & I. Momohjimoh, "Studies on Effects of Welding Parameters on the Mechanical Properties of Welded Low-Carbon Steel", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 142-153, 2015.
- [21] Y. R. A. Pradana, A. Aminnudin, H. Suryanto & D. Z. Lubis, "Hardness Distribution and Impact Toughness of Carburized Steel Welded by SMAW", *International Conference on Mechanical Engineering Research and Application*, vol. 494, no. 1, pp. 1-7, 2019.
- [22] AWS A5.1/A5.1M:2012, "Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding", An American National Standard, 2012.
- [23] ASME SECTION V, "Boiler and Pressure Vessel Code / Nondestructive Examination", AN INTERNATIONAL CODE, 2019.
- [24] ASTM Standard E94/E94M-17, "Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film", ASTM INTERNATIONAL, 2019.
- [۲۵] ش. شفیع نیا، ش. میردامادی، ح. ثابت و س. ر. امیرآبادی زاده، "تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش SAW"، مواد نوین، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۱۹-۳۶، ۱۳۹۴.
- [7] R. Chiong, N. Khandoker, S. Islam & E. Tchan, "Effect of SMAW parameters on microstructure and mechanical properties of AISI 1018 low carbon steel joints: An experimental approach", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 495, no. 1, pp. 1-9, 2019.
- [8] T. Welt, M. Junaid, R. Mory & J. Kenney, "Evaluating impact toughness as a qualification testing requirement for welds", *Elsevier/Constructional Steel Research*, vol. 165, no. 1, pp. 1-10, 2019.
- [۹] م. ح. عوض کننده قراول، م. ح. سیزوار و ع. حائریان اردکانی، "تاثیر کروم بر ریزساختار و آخال‌های جوش‌های چند راهه فولادهای کم آلیاژی در جوشکاری به روش الکتروود دستی"، مهندسی متالورژی و مواد، دوره ۲۱، شماره ۲، صفحه ۱۳-۲۸، ۱۳۸۹.
- [۱۰] ح. ثابت، "تکنولوژی و متالورژی جوشکاری"، شرکت کاوش جوش، نشر فنی امیر، چاپ دوم، ۱۳۹۴.
- [11] F. Khamouli, M. Zidani, K. Digheche, A. Saoudi & L. Atoui, "Effect of E6010 and E8018-G Fluxes Utilization on SMAW Multi-pass Welded steel", *Scientific.Net*, vol. 18, no. 1, pp. 55-64, 2018.
- [12] S. D. Ramdani, A. Subhan, H. Febnesia & M. Hidayat, "Comparison of penetration depth based on effect of DCEP and DCEN polarity on SMAW process using E6013 with ASTM A36", *AIP Conference proceedings*, vol. 2671, no. 2, pp. 020008/1-020008/9, 2023.
- [۱۳] ن. خدابنده لو و ح. ثابت، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه اتصال فولاد ساده کربنی جوشکاری شده با فرآیند FCAW و مقایسه با فرآیند GMAW"، مواد نوین، دوره ۸، شماره ۲، صفحه ۱-۱۴، ۱۳۹۶.
- [14] A. Ghosh, S. Das, S. Chatterjee & P. R. Rao, "Effect of cooling rate on structure and properties of an ultra-low carbon HSLA-100 grade steel", *Materials Characterization*, vol. 56, no. 1, pp. 59-65, 2010.
- [15] G. O. Schumann & I. E. French, "Effect of microstructure and non-metallic inclusions on the impact properties of flux-cored weld metals", *scripta materialia*, vol. 36, no. 12, pp. 1443-1450, 1997.

- [34] S. Kumar & S. K. Nath, "Effect of heat input on impact toughness in transition temperature region of weld CGHAZ of a HY 85 steel", Springer, vol. 236, no. 5, pp. 216-224, 2016.
- [35] ع. طالبی هنزائی، پ. مرعشی، ا. رنجبر نوده و ا. حمداله زاده، "تأثیر مقدار هیدروژن و شرایط جوشکاری بر ترک هیدروژنی در جوش فولاد API X70"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۲۹-۴۱، ۱۳۹۷.
- [36] ر. پیری، ب. قاسمی و م. یوسف پور، "تأثیر کسر حجمی بینیت حاصل از عملیات حرارتی بین بحرانی بر خواص مکانیکی و رفتار شکست فولاد دوفازی فریتی-بینیتی"، مهندسی متالورژی، دوره ۲۰، شماره ۱، صفحه ۵۴-۴۶، ۱۳۹۶.
- [37] W. T. Becker & S. Lampman, "Fracture appearance and mechanisms of deformation and fracture", ASM Handbook, vol. 11, 2002.
- [38] ASTM Standard E23-16b, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", ASTM INTERNATIONAL, 2018.
- [39] ASTM Standard E290-09, "Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility", ASTM INTERNATIONAL, 2009.
- [40] AWS D1.1/D1.1M:2020, "Structural Welding Code-Steel", An American National Standard, 2020.
- [26] ASTM Standard E3-11, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", ASTM INTERNATIONAL, 2017.
- [27] ASTM Standard E883-11, "Standard Guide for Reflected-Light Photomicrography", ASTM INTERNATIONAL, 2012.
- [28] AWS B4.0:2016, "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds", An American National Standard, 2016.
- [29] ASTM Standard E384-05a, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", ASTM INTERNATIONAL, 2005.
- [30] J. S. Lee, S. H. Jeong, D. Y. Lim, J. O. Yun & M. H. Kim, "Effects of welding heat and travel speed on the impact property and microstructure of FC welds", Metals and Materials International, vol. 16, no. 5, pp. 827-832, 2010.
- [31] G. Krauss, Steels: Processing, "Structure and Performance", 1th Edition, pp. 113-129, ASM International, 2015.
- [32] ASTM Standard E45-05, "Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel", ASTM INTERNATIONAL, 2005.
- [33] K. T. Park, S. W. Hwang, J. H. Ji & C. H. Lee, "Inclusions Nucleating Intragranular Polygonal Ferrite and Acicular Ferrite in Low Alloyed Carbon Manganese Steel Welds", Metals and Materials International, vol. 17, no. 2, pp. 349-356, 2011.

## ۲- پی نوشت

- [1] Kesuma et al  
 [2] Talabi et al  
 [3] Shi et al  
 [5] Bodude & Momohjimoh  
 [6] Pradana et al  
 [7] Focus to Film Distance  
 [8] Single Wall Single Image