

## بررسی تأثیر گرمای ورودی جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن AISI310 و فولاد کم آلیاژ API5LX60

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

عبدالحسین ساعدی  
اسماعیل حجاری\*  
سید محسن صدرالسادات

### چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI310 به فولاد کم آلیاژ API5LX60 در سه گرمای ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انجام عملیات جوشکاری از فرآیند قوسی تنگستن-گاز (GTAW) و فلز پرکننده ER2209 استفاده شده است. پس از جوشکاری، ریز ساختار مناطق مختلف اتصال شامل فلزات پایه، فلزات جوش، مناطق متأثر از گرما (HAZ) و فصل مشترکها با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سطوح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. همچنین خواص مکانیکی اتصال با استفاده از آزمون ضربه و ریزسختی سنجی ارزیابی گردید. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان داد فلزجوش ER2209 دارای ریزساختار فریتی-آستنیتی می‌باشد. با افزایش گرمای ورودی، در ناحیه متأثر از گرما فولاد AISI310 تغییرات ریزساختاری چندانی مشاهده نشد اما این تغییرات در فلز پایه API5LX60 بوضوح قابل مشاهده بود. نتایج آزمون ضربه نشان داد که با افزایش گرمای ورودی، انرژی شکست فلز جوش بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش گرمای ورودی، تأثیر چندانی بر سختی فلز جوش نداشته و تنها بصورت جزئی موجب کاهش سختی آن می‌شود.  
واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن AISI310، فولاد کم آلیاژ API5LX60، فلز پرکننده ER2209، اتصال غیرمشابه، گرمای ورودی.

## Investigation the Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of AISI310 Stainless Steel and API5LX60 Low Alloy Steel Dissimilar Joint

A. H. Saedi Department of Materials Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran  
E. Hajjari Department of Materials Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran  
S. M. Sadrossadat Department of Materials Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### Abstract

In this research, the microstructure and mechanical properties of AISI310 austenitic stainless steel/API5LX60 low alloy steel dissimilar joints welded in three different heat inputs, were studied. Gas tungsten arc welding (GTAW) Process and ER2209 filler metal was used for preparing the joints. After welding, the microstructure of different regions of each joint, including base metal, weld metal, heat affected zone (HAZ) and the interface were investigated using optical microscope. Studying fracture surface of the weldments prepared in different heat inputs was performed using scanning electron microscope (SEM). Mechanical properties of the joints were evaluated using impact and micro-hardness tests. Microstructural studies showed that using ER2209 filler metal has led to a ferritic-austenitic microstructure at the weld metal. It was found by increasing the heat input, no significant microstructural change occurred at the heat affected zone of AISI310 steel, but the change in microstructure at the heat affected zone of API5LX60 steel was clearly visible. The results of impact tests showed a considerable increase in fracture energy of the weld metal by increasing the heat input. In addition increase in the heat input, has not a noticeable effect on the weld metal hardness, and change in hardness of the weld metal due to increasing the heat input was quite low and negligible.

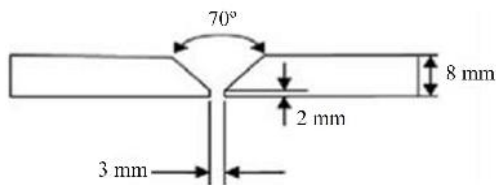
**Keywords:** AISI310 Stainless Steel, API5LX60 Low Alloy Steel, ER2209 Filler Metal, Dissimilar Welding, Heat Input.

همچنین این فولاد در صنایع شیمیایی برای نگهداری اسیدهای داغ غلیظ، آمونیاکی، سولفوری و اکسیدی به کار می‌رود. در صنایع غذایی نیز این فولاد در محل‌هایی که در معرض اسید استیک و اسید سیتریک قرار داشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. گروه دیگر از فولادهای آلیاژی، فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا یا فولادهای میکروآلیاژ هستند که در این نوع فولادها با افزودن حداکثر چند صدم یا چند دهم درصد از عناصر Ti, V, Nb استحکام بسیار بالایی ایجاد می‌شود. این عناصر با تشکیل نئتریدها و کاربیدها درون زمینه منجر به ریز دانه شدن ساختار و افزایش همزمان استحکام و چقرمگی شکست می‌شوند. این فولادها بدلیل میزان کربن کم آنها دارای قابلیت بالای جوش پذیری هستند. پایین بودن میزان عناصر آلیاژی فولادهای

### ۱- مقدمه

فولاد زنگ نزن AISI310 از نوع آستنیتی بوده و معمولاً برای کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود مقادیر بالای نیکل و کروم در ترکیب این فولاد سبب شده است تا نسبت به رایج ترین آلیاژ این گروه یعنی فولاد AISI304 در برابر خوردگی و اکسیداسیون مقاومت بیشتری داشته باشد. بنابراین این آلیاژ در زمره مهم ترین مواد فلزی مهندسی قابل استفاده در شرایط سخت و حاد قرار می‌گیرد. از جمله کاربردهای دمای بالای این فولاد زنگ نزن، می‌توان به استفاده در اجزای کوره‌ها در صنایع عملیات حرارتی، صنایع فرآوری نفت و همچنین آتش‌زن‌های مربوط به اتاق ریفرمر در صنایع تولید فولاد، لوله‌های داخلی کوره‌ها و محفظه‌های احتراق اشاره نمود.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.hajjari@scu.ac.ir



شکل ۱- طرح جوارحه طرح اتصال

گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹٫۵ درصد و دبی ۹ لیتر بر دقیقه برای محافظت از فلز جوش از بالا و پائین به نمونه‌ها دمیده شده و دمای بین پاسی نیز بین ۱۵۰-۱۲۰ درجه سلسیوس نگه داشته شد. برای محاسبه حرارت ورودی به حوضچه جوش، از رابطه (۱) استفاده گردید:

$$HI = \eta \frac{V \times I}{S} \quad (1)$$

در این رابطه، HI حرارت ورودی، V ولتاژ قوس، I جریان، S سرعت حرکت و  $\eta$  بازده و برابر ۰٫۶ در نظر گرفته شده است [۶]. به منظور بررسی تأثیر حرارت ورودی بر خواص اتصال، نمونه‌ها در سه شدت جریان ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ آمپر جوشکاری شده و بقیه پارامترها نیز ثابت در نظر گرفته شدند. در جدول ۲ پارامترهای جوشکاری گزارش شده است. جهت انجام بررسی‌های ریز ساختمانی، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی اتصال به وسیله دستگاه وایبرکات برش کاری گردیدند. عملیات برشکاری به گونه ای انجام شد که در هر نمونه، نواحی جوش، منطقه متأثر از گرما و هر دو فلز پایه قرار داشته باشد. عملیات سنباده زنی تا سنباده ی شماره ۲۰۰۰ انجام شد. به منظور مشخص نمودن ریزساختار، نمونه‌ها با استفاده از محلول ماربل به مدت ۵ ثانیه و همچنین محلول الکترو اچ اسید اگزالیک به مدت ۳۰-۱۰ ثانیه اچ شدند. تصاویر میکروسکوپی از نواحی مختلف جوش و سطوح شکست با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردید. به منظور بررسی چقرمگی فلز جوش، آزمون ضربه شارپی براساس استاندارد ASTM E23 بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد.

بدین منظور قطعاتی با ابعاد ۵×۱۰×۵۵ میلی‌متر دارای شیار V شکل به عمق ۱ میلی‌متر با استفاده از دستگاه وایبرکات تهیه شد. این شیار به گونه‌ای در قطعات ایجاد شد که در مرکز فلز جوش قرار داشته باشد. و زمان ۱۵ ثانیه انجام گرفت.

میکروآلیاژی منجر به کاهش هزینه‌ی تولید این فولادها شده است. عمده کاربرد این فولادها در خطوط لوله های انتقال نفت و گاز می‌باشد [۲]. از نظر اقتصادی هر جایکه امکان پذیر باشد، جایگزینی فولادهای زنگ نزن با فولادهای میکروآلیاژی مقرون به صرفه بوده و عامل کنترل کننده است. به منظور جایگزینی فولادهای زنگ نزن با فولادهای میکروآلیاژی، با هدف کاهش هزینه‌ها و یا هدف بهبود کارایی در مقاطع بحرانی تر، ایجاد اتصال فلزی غیر مشابه بین این دو آلیاژ با استفاده از فرآیندهای ذوبی امری ضروری است. فلنچ و همکاران [۳] جوش غیر مشابه فولاد میکروآلیاژ API5LX60 و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 را مورد بررسی قرار دادند. اتصال این دو آلیاژ بیشتر در صنعت پتروشیمی کاربرد داشته و مورد توجه می‌باشد. آنها در پژوهشی که انجام داده‌اند از دو فلز پرکننده ER309، Inc182 و دماهای پیشگرم متفاوت استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از فلز پرکننده Inc182 و دمای پیشگرم بهینه ۴۰۰ درجه فارنهایت کمترین میزان فازهای سخت درمرز ذوب بین فولاد فریتی و فلز جوش تشکیل می‌شود. وانگ و همکاران [۴] از دو فرآیند جوشکاری MIG و TIG جهت اتصال غیر مشابه فولادهای APIX60/UNS S1803 استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که فرآیند تیگ به دلیل نرخ سرد شدن آهسته، آستنیت بیشتری را در فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ER2209 ایجاد می‌کند. شایان فر و همکاران [۵] اثر VLHD ورودی بر خواص اتصال غیر مشابه فولاد ASTM A516 به فولاد زنگ نزن AISI316 با روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و با استفاده از دو جریان معمولی و پالسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، اندازه دانه مناطق متأثر از گرما در روش پالسی نسبت به جریان معمولی کمتر و میزان آستنیت فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ER309Mo بیشتر است. از آنجا که تاکنون تحقیقی جامع و مدونی در مورد اتصال دو آلیاژ فولادی پر کاربرد API5LX60 و AISI310 به یکدیگر انجام نشده، در این تحقیق سعی شده تا به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری این اتصال پرداخته شده و شرایط مناسب جوشکاری تعیین گردد.

## ۲- روش انجام تحقیق

در این پژوهش قطعات فولاد زنگ نزن AISI310 و فولاد میکروآلیاژی API5LX60 با ابعاد ۸۰×۶۰×۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت.

جهت انجام اتصال از فلز پرکننده ER2209 با قطر ۲ میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات و فلز پرکننده در جدول ۱ آورده شده است. در این پژوهش، جوشکاری نمونه‌ها با روش قوسی تنگستن-گاز و قطبیت منفی در وضعیت تخت و با طرح اتصال جناقی یکطرفه و زاویه شیار ۳۵ درجه در ۵ پاس مطابق شکل ۱ انجام گرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده بر حسب درصد وزنی

عناصر	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Co	V	Nb	Cu	Fe
فلز پایه AISI310	۰٫۰۴	۲۴٫۴	۱۹٫۱	۰٫۲	۰٫۸۲۵	۰٫۷	۰٫۰۱۲	---	۰٫۰۲	۰٫۱۳	Bal.
فلز پایه API5LX60	۰٫۱۲	۰٫۰۳۶	۰٫۰۲۱	۰٫۰۴۲	۱٫۱۵	۰٫۲۸	۰٫۰۴	۰٫۰۴۱	۰٫۰۴۳	۰٫۱۵	Bal.
فلز پرکننده ER2209	۰٫۰۳	۲۲٫۵	۸٫۵	۳	۱٫۲۵	۰٫۵	---	---	---	۰٫۳۵	Bal.

عملیات نورد قرارمی گیرند که باعث کشیده شدن دانه ها در جهت نورد می شود [۸].

### ب) بررسی ریزساختار فصل مشترک

شکل ۳- الف ریز ساختار فصل مشترک فلز پایه فولاد AISI310S و فلز جوش پر کننده ER2209 را نشان می دهد. فصل مشترک پیوسته و پدیده رشد رونشینی در سرتاسر این فصل مشترک دیده می شود. در شکل ۳- ب فصل مشترک فولاد کم آلیاژ API5LX60 و فلز جوش پرکننده ER2209 نشان داده شده است. در این فصل مشترک، یک نوار باریک مارتنزیتی در مرز ذوب تشکیل شده است که دلیل آن را می توان به افزایش سختی پذیری بر اثر افزایش عناصر آلیاژی مربوط دانست. چون ضریب نفوذ کربن بیشتر از بقیه عناصر آلیاژیست تشکیل این نوار مارتنزیتی در فصل مشترک به علت تفاوت (حدود ۴ برابر) در درصد کربن موجود در ترکیب شیمیایی فولاد کم آلیاژ API5LX60 و فلز جوش ER2209 می باشد. در طی فرآیند جوشکاری، به علت اختلاف غلظت، مهاجرت کربن از ناحیه متأثر از حرارت فولاد کم آلیاژ API5LX60 به ناحیه ذوب اتفاق می افتد. به این ترتیب غلظت کربن در مرز ذوب بالا رفته و منجر به افزایش سختی پذیری در این ناحیه می شود. در این شرایط یک ناحیه مارتنزیتی باریک در مرز ذوب پدید خواهد آمد [۹ و ۱۰].

شکل ۲- ریزساختار فلزات پایه (الف) فولاد زنگ نزن آستینیتی

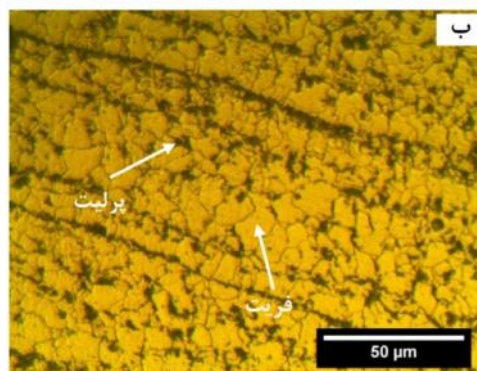
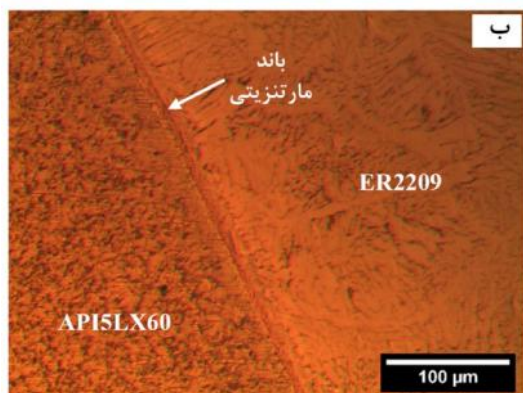
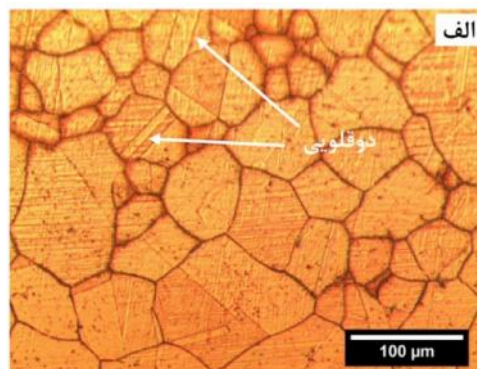
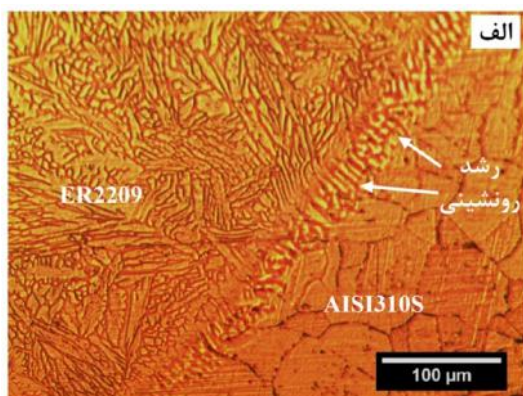
شماره نمونه	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۱۰۰	۱۵	۰٫۸	۱٫۱۲
۲	۱۲۰	۱۵	۰٫۸۵	۱٫۲۷
۳	۱۴۰	۱۵	۰٫۹	۱٫۴

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی های ریزساختاری

##### الف) بررسی ریزساختار فلزات پایه

تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فولاد زنگ نزن AISI310S در شکل ۲- الف نشان داده شده است. ریز ساختار فلز پایه مذکور شامل زمینه آستینیتی است که از دانه های هم محور تشکیل شده است. همچنین دو قلوبی های آنیل شده به خوبی در آن قابل مشاهده هستند. چنین ساختاری نتیجه فرآیند آنیل انحلالی پس از عملیات نورد است [۷]. شکل ۲- ب ریزساختار فولاد کم آلیاژ API5LX60 را نشان می دهد که حاوی زمینه فریتی با مقدار کمی فاز پرلیت در مرز دانه های فریت می باشد.



شکل ۲- ریزساختار فصل پایه (الف) فولاد زنگ نزن آستینیتی AISI310 (ب) فولاد میکروآلیاژی API5LX60

شکل ۳- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش ER2209 با (الف) فلز پایه AISI310S (ب) فلز پایه API5LX60

وجود مقادیر کم فاز پرلیت در ریزساختار این فولادها به دلیل درصد کربن کم این فولادهاست. در پروسه تولید، این فولادها تحت

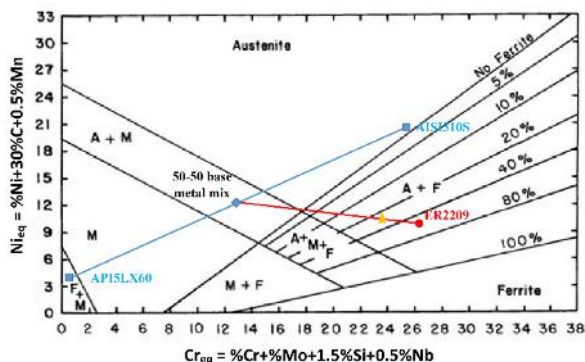


ج) بررسی ریزساختار فلز جوش

یکی از روش‌های مرسوم جهت پیش بینی ریزساختار فلز جوش در فولادهای زنگ نزن، استفاده از دیاگرام‌های ساختاری می‌باشد. در شکل ۴ نحوه استفاده از دیاگرام ساختاری شیفلر جهت پیش بینی ریزساختار فلز جوش در اتصال غیر مشابه فلزات AISI310/API5LX60 با استفاده از فلز پرکننده ER2209 نشان داده شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده، کروم و نیکل معادل مربوط به هر یک محاسبه و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. با فرض اینکه کل میزان رقت فلز پایه در پاس اول برابر ۲۰ درصد باشد، ترکیب فلز جوش تقریباً در مکانی قرار می‌گیرد که خط ایزوفریت ۲۵ درصد را قطع کرده و منجر به ایجاد یک ریز ساختار دوفازی آستنیت-فریت می‌شود که در برابر ترک انجمادی جوش مقاوم است [۱۱].

جدول ۲- میزان کروم و نیکل معادل فلزات پایه و پرکننده مطابق نمودار شیفلر

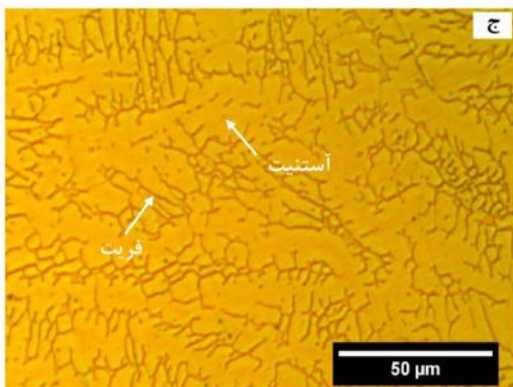
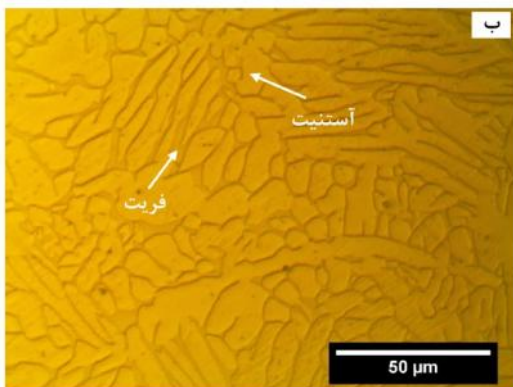
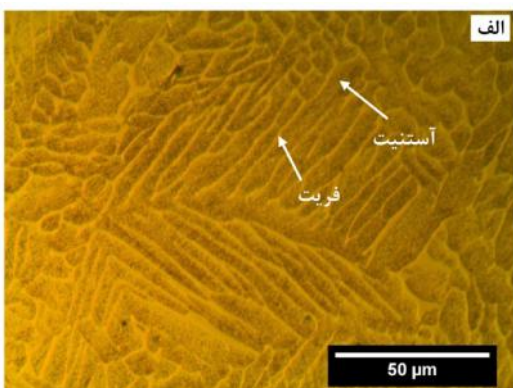
نوع ماده	کروم معادل	نیکل معادل
AISI310	۲۵٫۶۶	۲۰٫۷۱
API5LX60	۰٫۵۲	۴٫۲
ER2209	۲۶٫۲۵	۱۰٫۲



شکل ۴- دیاگرام ساختاری شیفلر جهت پیش بینی ریز ساختار فلز جوش حاصل از پرکننده ER2209

شکل ۵ ریزساختار پاس ریشه حاصل از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن دوفازی ER2209 را در گرمای ورودی‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج ریزساختار جوش فلز پرکننده فولاد زنگ نزن دوفازی ER2209 را به ترتیب در حرارت ورودی‌های ۱،۱۲، ۱،۲۷ و ۱،۴ kJ/mm نشان می‌دهند. با توجه به نسبت کروم به نیکل معادل بالای فلز پرکننده ER2209، انجماد در فلز جوش با جوانه زنی فاز فریت شروع می‌شود. با توجه به آنکه انجماد بصورت کاملاً فریتی بوده و حتی در مراحل پایانی انجماد نیز آستنیت تشکیل نمی‌شود، فاز پایدار، فریت خواهد بود. پس از پایان انجماد و با کاهش دما، استحاله تبدیل آستنیت به فریت در در زیر خط انحلال فریت و در حالت جامد آغاز می‌گردد. در این استحاله، فاز آستنیت در طول مرز دانه‌های فریت دلتا جوانه زنی کرده و شروع به رشد می‌کند. پیشرفت این استحاله،

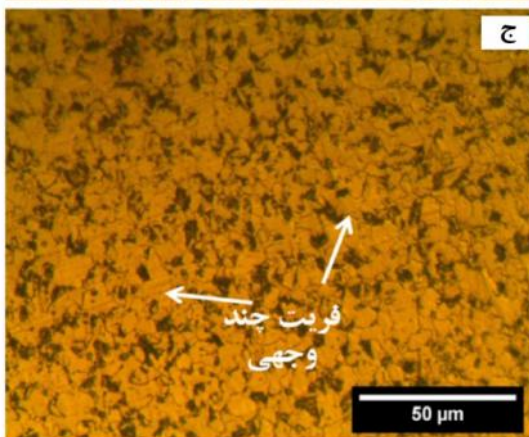
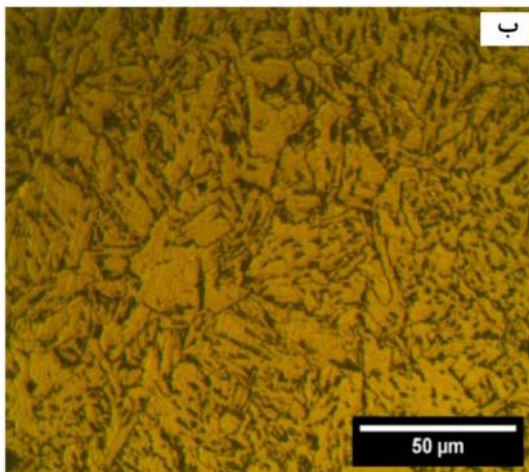
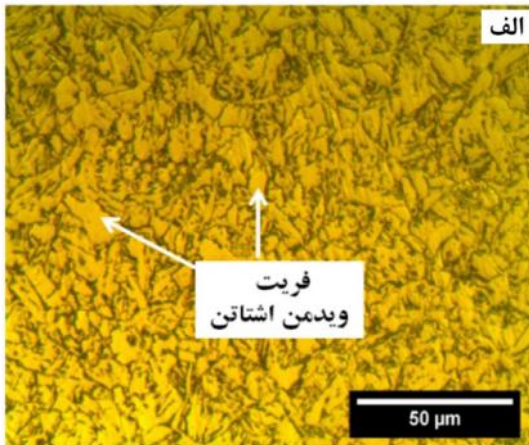
همچون تمامی استحاله‌های نفوذی، تابع دما و زمان بوده و به تدریج سبب پوشش کامل مرز دانه‌های فریت توسط آستنیت می‌شود [۱۱]. با توجه به تصاویر نشان داده شده در شکل ۵، واضح است که با افزایش حرارت ورودی و در نتیجه افزایش دما، شرایط نفوذ و انجام این استحاله حالت جامد به میزان بیشتری فراهم شده و میزان فاز آستنیت در فلز جوش افزایش پیدا می‌کند. محققین دیگر نیز، از گرمای ورودی به عنوان مؤثرترین راه جهت کنترل میزان فریت در فلز جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی، نام برده‌اند [۱۱].



شکل ۵- ریز ساختار پاس ریشه فلز جوش پرکننده ER2209 در حرارت‌های ورودی مختلف (الف) ۱،۱۲ kJ/mm (ب) ۱،۲۷ kJ/mm (ج) ۱،۴ kJ/mm

نتایج حاصل از تحلیل تصاویر نشان داده شده در شکل ۵ بوسیله نرم افزار MIP، درصد فاز فریت دلتا در فلز جوش را برای گرمای

زن AISI310S، به دلیل شرایط نورد گرم و آنیل انحلالی است که قبل از عملیات جوشکاری، بر روی این فولاد صورت گرفته است.



شکل ۶- ریز ساختار ناحیه متأثر از گرمای فولاد کم آلیاژ API5LX60 در گرماهای ورودی مختلف (الف) ۱,۱۲ kJ/mm (ب) ۱,۲۷ kJ/mm (ج) ۱,۴ kJ/mm

از آنجایی که فولاد زنگ زن AISI310S در طی فرایند تولید خود بعد از مرحله نورد، تحت عملیات گرمای آنیل قرار می‌گیرد، دچار

ورودی‌های ۱,۱۲، ۱,۲۷ و ۱,۴ kJ/mm به ترتیب برابر ۲,۳/۶، ۲,۱/۲ و ۱,۸/۹ درصد نشان می‌دهد که تا حدودی از پیش بینی بدست آمده از دیاگرام شیفلر، پایین‌تر می‌باشد. کمتر بودن درصد فاز فریت دلتا در ریزساختار پاس ریشه فلز جوش، نسبت به مقدار پیش‌بینی شده توسط دیاگرام شیفلر را می‌توان به ماهیت چند پاسه بودن فرآیند جوشکاری نسبت داد. در این شرایط، گرمای ناشی از پاس‌های بعدی جوشکاری، شرایط را برای جوانه زنی و رشد بیشتر فاز آستنیت در پاس ریشه جوش فراهم نموده و در نتیجه کاهش درصد فاز فریت دلتا در پاس ریشه را به همراه خواهد داشت.

#### د) بررسی ریزساختار نواحی متأثر از گرما

به منظور بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ناحیه متأثر از گرمای، ریز ساختار مناطق نزدیک به خط ذوب در هر یک از نمونه‌های جوشکاری شده در گرماهای ورودی ۱,۱۲، ۱,۲۷ و ۱,۴ kJ/mm در سمت هر یک از فلزات پایه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ ریز ساختار ناحیه متأثر از گرما فولاد کم آلیاژ API5LX60 در سه گرمای ورودی مختلف نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود در اثر انجام جوشکاری، تغییرات قابل توجهی در ریزساختار ناحیه متأثر از گرما فولاد کم آلیاژ API5LX60 اتفاق افتاده است. در حین فرآیند جوشکاری، دمای نواحی اطراف فلز جوش در سمت فلز پایه API5LX60، تا بالاتر از دمای Ac3 افزایش پیدا می‌کند. در این شرایط قسمت عمده ساختار این ناحیه، تبدیل به فاز آستنیت شده و سپس بصورت سریع تا زیر دمای بحرانی Ac1 سرد می‌شود. بسته به میزان گرمای ورودی جوشکاری، سرعت خنک شدن ناحیه متأثر از گرما فولاد کم آلیاژ نیز متفاوت بوده و امکان تشکیل ساختارهایی همچون بینیت بالایی، فریت ویدمن اشتاتن<sup>۱</sup> و یا فریت چند وجهی<sup>۲</sup> در آن وجود دارد [۱۲]. مطابق با تصاویر نشان داده شده در شکل ۶، در نمونه‌ای که تحت شرایط کمترین گرمای ورودی و در نتیجه بیشترین نرخ سرد شدن، جوشکاری شده است (شکل ۶-الف)، فریت ریز و با مورفولوژی ویدمن اشتاتن تشکیل شده است. اما با افزایش گرمای ورودی جوشکاری و کاهش نرخ سرد شدن (شکل‌های ۶-ب و ۶-ج)، اندازه دانه‌های فریت رشد کرده و مورفولوژی فریت از حالت ویدمن اشتاتن به چند وجهی تغییر پیدا کرده است.

برای فلز پایه فولاد زنگ زن AISI310S همانطور که در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است، تأثیر گرمای ورودی بر ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت، بصورت بسیار جزئی و ناچیز می‌باشد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری اندازه دانه به روش تقاطع خطوط با مرز دانه<sup>۳</sup> در تصاویر نشان داده شده در شکل ۵ که بوسیله نرم افزار MIP انجام شده است، متوسط اندازه قطر دانه‌های آستنیت در HAZ فولاد زنگ زن AISI310S-3 برای حرارت ورودی‌های ۱,۱۲، ۱,۲۷ و ۱,۴ kJ/mm را به ترتیب برابر ۲,۴/۸۶، ۲,۶/۱۲ و ۲,۹/۳ میکرومتر نشان می‌دهد. عدم تغییر محسوس در ریزساختار و اندازه دانه‌های HAZ در سمت فولاد زنگ

<sup>1</sup> Widmanstätten ferrite

<sup>2</sup> Polygonal ferrite

<sup>3</sup> Intercept method



### ۲-۳- بررسی خواص مکانیکی

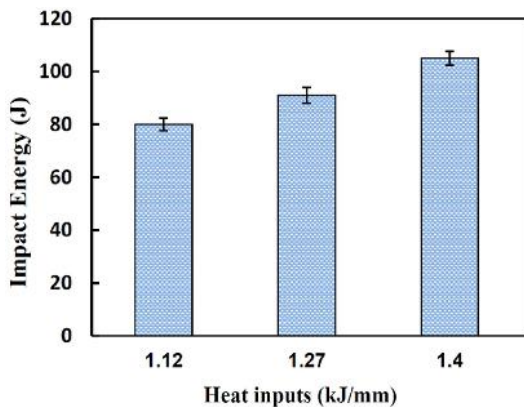
#### الف) مقاومت به ضربه

مقاومت به ضربه فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در گرماهای ورودی مختلف از طریق اندازه گیری انرژی ضربه مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمون بدترین شرایط طراحی (وجود بار دینامیکی و شیار) در نظر گرفته شده و مقاومت ماده در برابر شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نمونه‌های مورد استفاده جهت انجام آزمون ضربه اتصالات جوشکاری شده، در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۸- نمونه‌های آزمون ضربه اتصالات جوشکاری شده در گرماهای ورودی مختلف

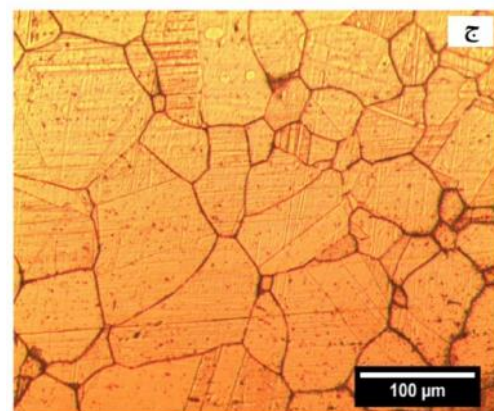
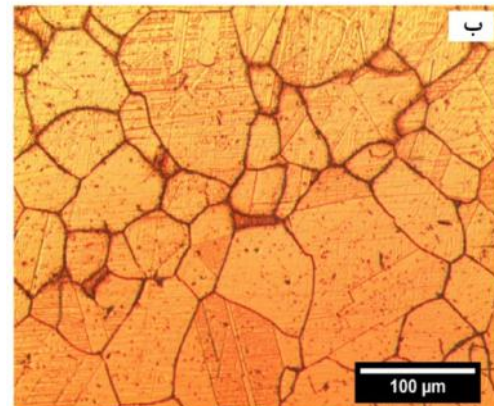
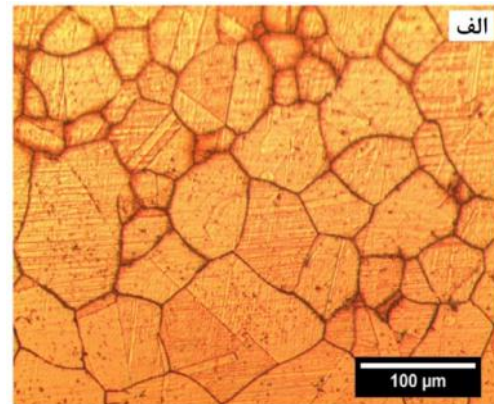
مقادیر انرژی ضربه فلز جوش حاصل از پرکننده ER2209 که مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده در گرماهای ورودی مختلف می‌باشند، در نمودار میله‌ای شکل ۹ نشان داده شده‌اند. با توجه به این نمودار، مشخص است که افزایش گرمای ورودی جوشکاری، منجر به افزایش انرژی ضربه فلز جوش شده است. با افزایش گرمای ورودی و کاهش نرخ سرد شدن، استحاله فریت به آستنیت زمان بیشتری جهت انجام داشته و منجر به تشکیل مقادیر بیشتر آستنیت در فلز جوش می‌شود. همچنین با افزایش گرمای ورودی، میزان آستنیت ثانویه نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند به بهبود انرژی ضربه کمک کند.



شکل ۹- انرژی ضربه پرکننده ER2209 جوشکاری شده در گرماهای ورودی مختلف

شکل ۱۰ سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه اتصالات جوشکاری شده در گرماهای ورودی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به حضور فرو رفتگی‌های سهمی شکل (دیمپل) در سطح شکست، می‌توان نتیجه

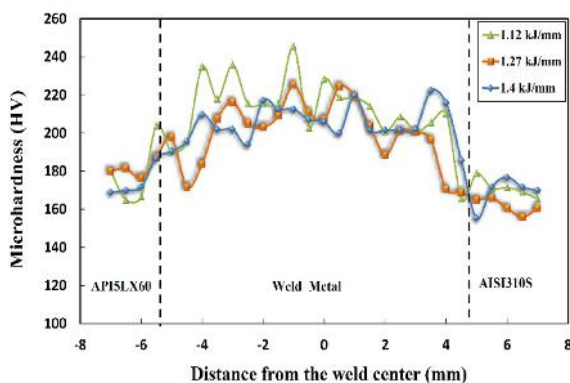
پدیده های بازیابی و تبلور مجدد نشده و حرارت ایجاد شده در جوشکاری صرفاً باعث رشد دانه شده است. مطابق شکل ۷ می‌توان گفت که با افزایش گرمای ورودی، تنها افزایش جزئی در اندازه دانه‌ها اتفاق افتاده و در هر سه حرارت ورودی دوقلوبی‌های آنیلی نیز قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۷- ریز ساختار ناحیه متأثر از گرما فولاد زنگ نزن AISI310S در گرماهای ورودی مختلف (الف) ۱,۱۲ kJ/mm (ب) ۱,۲۷ kJ/mm (ج) ۱,۴ kJ/mm

**(ب) سختی**

نمودار تغییرات سختی در امتداد فلز جوش، مناطق مجاور فلز جوش و همچنین فلزات پایه برای نمونه‌هایی که با استفاده از فلز پرکننده ER2209 در گرماهای ورودی مختلف جوشکاری شده‌اند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در این شکل، مشخص می‌باشد که افزایش گرمای ورودی، تأثیر چندانی بر سختی فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت نداشته و تنها بصورت جزئی منجر به کاهش سختی در این مناطق شده است. کاهش اندک سختی فلز جوش با افزایش گرمای ورودی را مطابق با تصاویر نشان داده شده در شکل ۵ می‌توان به افزایش میزان فاز آستنیت و همچنین افزایش اندازه دانه‌ها در فلز جوش نسبت داد. از سوی دیگر همانگونه که در نمودار نشان داده شده در شکل ۱۱ نیز مشخص می‌باشد، در نمونه‌های جوشکاری شده در هر سه گرمای ورودی، یک پیک سختی در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه API5LX60 ایجاد شده است که حاکی از تشکیل ترکیبات سخت در فصل مشترک فلز جوش می‌باشد. برخی از محققانی که اتصال سایر فولادهای فریتی به آستنیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند نیز تشکیل یک ناحیه با سختی بالا را در مرز ذوب فولادهای فریتی گزارش نموده‌اند و دلیل آن را به تشکیل باند مارتنزیتی (شکل ۳-ب) و کاربیدها در این منطقه نسبت داده‌اند [۱۰ و ۴].

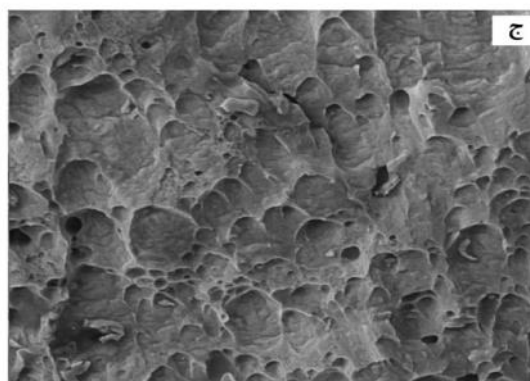
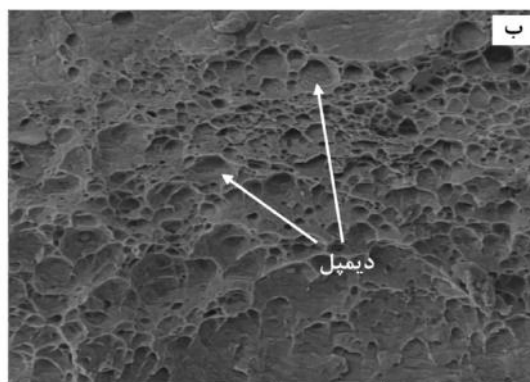
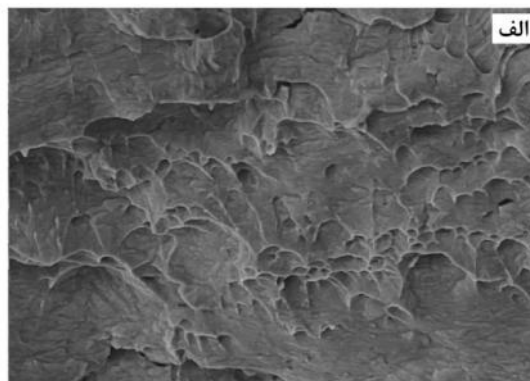


شکل ۱۱- پروفیل تغییرات سختی اتصالات غیر همجنس API5LX60/AISI310S جوشکاری شده با فلز پرکننده ER2209 در گرماهای ورودی مختلف

**۴- نتیجه‌گیری**

- ۱- ساختار فلز جوش حاصل از اتصال غیر مشابه فلزات API5LX60/AISI 310 با استفاده از فلز پرکننده ER2209 بصورت فریتی-آستنیتی بوده و در فصل مشترک فلز جوش با فلز پایه فولاد API5LX60 دارای یک باند مارتنزیتی می‌باشد.
- ۲- با افزایش گرمای ورودی جوشکاری، میزان فاز فریت در فلز جوش کاهش یافته و از سوی دیگر، درصد آستنیت فلز جوش افزایش می‌یابد که این پدیده منجر به افزایش انعطاف پذیری و افزایش انرژی ضربه فلز جوش می‌شود.

گرفت که شکست نمونه‌های جوشکاری شده در هر سه گرمای ورودی، از نوع نرم می‌باشد. علاوه بر آن، همانگونه که در تصاویر نشان داده شده در شکل ۱۰ نیز مشخص می‌باشد، با افزایش حرارت ورودی، فرو رفتگی‌های سهمی شکل بزرگ تر و عمیق تر شده اند که این امر نشان از تغییر شکل پلاستیک بیشتر و در نتیجه انرژی بالاتر ضربه برای این نمونه‌ها می‌باشد [۱۳].



شکل ۱۰- سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه فلز جوش ER2209 در گرماهای ورودی مختلف (الف) ۱,۱۲ kJ/mm (ب) ۱,۲۷ kJ/mm (ج) ۱,۴ kJ/mm

۳- افزایش گرمای ورودی جوشکاری، منجر به تغییرات ریزساختاری در ناحیه متأثر از حرارت فولاد کم آلیاژ API5LX60 شده ولی تغییرات چندانی را در ناحیه متأثر از گرما فولاد زنگ نزن AISI 310 ایجاد نمی‌کند.

۴- میزان سختی فلز جوش و مناطق متأثر از گرما، چندان تحت تأثیر میزان حرارت ورودی به فلز جوش نبوده و با افزایش گرمای ورودی تنها به میزان اندکی از سختی آنها کاسته می‌شود.

## ۵- مراجع

- [1] Farooq M., Strengthening and degradation mechanisms in austenitic stainless steels at elevated temperature, PhD. Thesis, KTH Industrial Engineering and management, Stockholm, Sweden, 2013.
- [2] Graf M., Hillenbrand H. G., Development and production of high strength pipeline steels, *Proceedings of The Niobium 2001 Conference*, Orlando, USA, 2001.
- [3] Fallatah G., Sheikh A., Khan Z., Boah J., Reliability of dissimilar metal welds subjected to sulfide stress cracking, *Proceedings of The 6th Saudi Engineering Conference*, KFUPM-King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, December, pp. 297-312, 2002
- [4] Wang J. Lu., Zhang M., Chang L., Xu W., Hu L., Effect of welding process on the microstructure and properties of dissimilar weld joints between low alloy steel and duplex stainless steel, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 19, pp.518-524, 2012
- [۵] شایان فر پ. و شمعانیان م.، جوشکاری غیرمشابه فولادکونچ-تمپر ASTM 517A به فولاد زنگ‌نزن AISI 316L و تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار. *فراآیندهای نوین در مهندسی مواد*، د. ۸، ش. ۳، ص ۷۵-۸۹، ۱۳۹۳.
- [6] Dupont J. N., Marder A. R., Kermanpur A., Thermal efficiency of arc welding processes, *Welding Research Supplement*, pp. 406s-416s, December 1995
- [7] Shah Hosseini H., Shamanian M., Kermanpur A., Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds, *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 425-431, 2011
- [8] Hajiannia I., Shamanian M., Kasiri M., The weldability evaluation of dissimilar welds of AISI 347 stainless steel to ASTM A335 low alloy steel by gas tungsten arc welding, *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol.1, pp. 33-40, 2013
- [9] Mendoza B., Maldonado Z., Albiter H., Robles P., Dissimilar welding of super duplex stainless steel/HSLA steel for offshore applications joined by GTAW, *Engineering*, Vol. 2, pp. 520-528, 2010
- [10] Dupont J. N., Kusko C. S., Martensite formation in austenitic/ferritic dissimilar alloy welds, *Welding Journal*, Vol. 86, pp. 51-54, 2007
- [11] Lippold J. C., Koteki D. J., *Welding metallurgy and weldability of Stainless steels*, John Wiley & Sons Inc, 2005
- [12] Tasalloti H., Kah, Martikainen P. J., Effect of heat input on dissimilar welds of ultra high strength steel and duplex stainless steel: Microstructural and compositional analysis, *Materials Characterization*, Vol. 123, pp. 29-41, 2017
- [13] Hejripour F., Aidun D. K., Consumable selection for arc welding between stainless steel 410 and Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 245, pp. 287-299, 2017