نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 98-87

# تعیین تجربی اثر نرماله کردن بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش سر به سر چند پاسه لوله فولاد کم آلیاژ استحکام بالا API X65

**مجید سبک روح[1*]، محسن ساروقی[2]**

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک

(دریافت مقاله: 1396/12/06 ؛ پذیرش مقاله: 1397/01/26)

**چکیده**

فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا کاربرد وسیعی در صنعت گاز دارند، لذا جوشکاری دستی قوس الکتریکی با استفاده از الکترود پوشش‌دار در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران اهمیت ویژه‌ای دارد. برای بررسی تجربی درز جوش و اطمینان از پیوستگی جوش محیطی نیاز به آزمونهای مخرب و غیرمخرب است. در این مقاله، تأثیر عملیات حرارتی نرماله بر خصوصیات جوش چندپاسه محیطی، در موقعیت‌های متفاوت (ساعت 6-7/30، 7/30-9، 9-10/30 و 10/30-12) با قطر خارجی 36 اینچ به وسیلهٔ آزمایش‌های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش، ضربه و سختی‌سنجی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد در اثر نرماله کردن، مقدار فریت پاس ریشه و سطح جوش به‌ترتیب 24 و 6 درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. همچنین مقدار افزایش فریت در پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح به‌ترتیب 32، 14، 12و 7 درصد نسبت به پیش از عملیات نرماله است. میزان ازدیاد طول جوش نسبت به نمونهٔ قبل از عملیات حرارتی و فلز پایه به‌ترتیب 65 و 5 درصد افزایش داشته است. انرژی شکست در راستای عمود بر جوش (ساعت9-10/30)، 70 درصد نسبت به نمونهٔ قبل از عملیات حرارتی افزایش داشته است. مقدار افزایش کربن، وانادیوم و تیتانیوم در منطقهٔ جوش نسبت به فلز پایه در موقعیت 6-7/30 به‌ترتیب برابر با 0/01 ، 0/003 و 0/005 می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نرماله کردن، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، جوش چند پاسه محیطی، خطوط انتقال گاز طبیعی،API X65.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: majid.sabokrooh@yahoo.com , msabokrouh@mahallat.ac.ir

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

# Experimental determination of normalizing effect on mechanical and metallurgical properties of HSLA API X65 multi-pass girth weld

**M. Sabokrouh[1*], M. Saroghi[2]**
1- Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.
2- Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak, Arak, Iran

(Received 25 February 2018 ; Accepted 15 April 2018)

## Abstract
High strength low alloy steels are widely used in gas industry, so shield metal arc welding in pipelines to transport natural gas from Iran is of great importance. For experimental investigation of seam weld and integrity of girth weld, destructive and non-destructive tests are required. In this article the effects of normal heat treatment on properties of multi pass welding in different situations (6-7:30 , 7:30-9 , 9-10:30 , 10:30-12) with 36 in outside diameter is evaluated by chemical, metallography, tensile, toughness and hardness. The result shows that normalizing increases ferrite ratio in root pass and weld cap pass respectively 24 and 6 percent than base steel. Also the increase rate of ferrite in root, hot, filler, and the cap pass are respectively 32, 14, 12 and 7 percent before than normalizing. The elongation weld of was increased ratio than before the heat treatment in base metal respectively 65 and 5 percent. The impact energy alignment to weld (9-10:30) had a rate of 70 percent increase before the heat treatment. The increase rate of C, V and Ti in the weld zone according to base metal in situation of 6-7:30 are respectively 0.01, 0.003 and 0.005.

**Keywords**: Normalizing, High strength low alloy steel, Multi pass girth weld, Natural gas pipeline, API X65.

## 1- مقدمه
از مهم‌ترین و آسان‌ترین راه‌های صدور گاز طبیعی، انتقال گاز از طریق خط لوله است. ایران با دارا بودن 17 درصد از کل ذخایر گاز طبیعی جهان و 47 درصد از ذخایر منطقه خاورمیانه از نظر ذخایر گاز طبیعی، دومین کشور جهان محسوب می‌گردد [1]. علاوه بر آزمون‌های غیرمخرب، تأیید سلامت جوش به‌وسیلهٔ آزمون‌های مخرب مکانیکی (کشش، ضربه و سختی‌سنجی)و بررسی ریزساختارهای متالورژیکی(کوانتومتری و متالوگرافی) نیز ضروری است [2]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم آلیاژ پر استحکام که در خطوط لولهٔ انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمّیت بیشتری دارد. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا، اغلب حاوی مقادیر بسیار کمی نیوبیوم، وانادیوم و تیتانیوم است. این عناصر علاوه بر ریزدانه کردن ساختار، امکان سختی رسوب را نیز فراهم می‌آورند [3]. با توجه به این که در نرماله کردن فریت و پرلیت در دمایی کمتر و با آهنگی بیشتر از آنیل تشکیل می‌شود، اندازه دانه‌های فریت و سمنتیت و فاصلهٔ بین لایه‌ای پرلیت هردو کاهش می‌یابند. بنابراین، در مقایسه با خواص حاصل از فرایند آنیل، استحکام و سختی افزایش و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد [4]. هاشمی و همکارانش در سال2009، ارتباط ریزساختار ومقاومت به ضربه در درز جوش مارپیچ فولاد ایکس70 را بررسی کردند [5]. شیتونگوی و همکارش در سال 2011، فولاد میکروآلیاژی را در دمای بین 820 تا 940 درجه سانتی‌گراد نرماله کردند که در این عملیات سیر تکاملی فاز آستنیت در درجه حرارت 730 تا 940 درجه سانتی‌گراد تشکیل شد. در این دما ارتباط بین استحکام کششی و اندازهٔ دانه، باعث افزایش استحکام و سختی می‌شود[6]. هاشمی و همکارش در سال2012 خصوصیات سختی و مقاومت به ضربه جوش مارپیچ فولاد ایکس 65 را همراه با شناسایی و تحلیل میکروساختار ارائه کردند [7]. سبک‌روح و همکارانش در سال 2012، ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنش‌های پسماند ناحیهٔ جوش چندپاسه محیطی خطوط لوله فولادی

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

56 اینچ API X70 را بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد بیشترین مقدار تنش پسماند محوری در منطقه متأثر از حرارت سطوح خارجی و داخلی لوله اتفاق افتاده است [8]. علیزاده و همکارش در سال 2013یک فرآیند عملیات حرارتی جدید جهت بررسی تأثیر تغییرات میکروساختاری در رفتارخوردگی فلزپایه و ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش در لوله‌های فولادی جوش‌شده با گریدAPI X70، را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد، مقاومت به خوردگی ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش بعد از عملیات حرارتی به علت شکل‌دهی خوب و فشردهٔ لایه حاصل از خوردگی با ترک‌های کمتر افزایش یافته است[9]. لی- ون و همکارانش در سال 2016 خواص مکانیکی منطقه جوش میکروآلیاژ فولاد کم‌کربن نیوبیوم‌دار و بدون نیوبیوم، با عملیات حرارتی نرماله کردن در زمان‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند که فولاد مربوطه متاثر از عملیات حرارتی در دمای 900 درجه سانتی‌گراد به ریزساختار ستونی تبدیل شد. نتایج نشان می‌دهد تفاوت‌های مهمی بین ریزساختار و خواص مکانیکی جوش و منطقه جوش نرماله کرده وجود دارد. درحالی‌که سختی تأثیرگذار است، ولی با اضافه کردن نیوبیوم سختی به طور قابل ملاحظه‌ای تأثیر نمی‌گذارد و استحکام شکل‌پذیری جوش و منطقه جوش با اضافه کردن عنصر نیوبیوم بهبود می‌یابد [10]. سبک روح و همکارش در سال2016، جوشکاری لوله فولادی کم‌کربنAPI X65، با قطر خارجی 36 و ضخامت 0/406اینچ، را مطابق استاندارد انجام داد [11]. برای جوشکاری، لوله‌ها حدود 100 درجه پیش‌گرم شدند و سپس در چهار نقطه از محیط لوله که نسبت به هم متقارن می‌باشند، جوشکاری انجام گرفت. تصاویر حاصل از آزمون متالوگرافی با استفاده از (میکروسکوپ نوری و الکترونی) نشان می‌دهد که مقدار فریت در ریشه جوش، گرم، پرکن و سطح به‌ترتیب برابر با 75، 75، 74 و 79 درصد است. میزان ازیاد طول جوش 26 درصد بود. مقدار متوسط سختی 178 ویکرز و انرژی شکست در راستای عمود بر جوش (ساعت 1:30-3) 96 ژول به‌دست آمد. لولهٔ فولادی API X65 مورد آزمایش از نوع درز جوش مستقیم با با قطر 36 اینچ و ضخامت 0/406 اینچ است. نمونه‌های لوله هم اکنون در خطوط لوله پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران به کار می‌رود. فولاد مربوطه از خانواده کم‌کربن پراستحکام و دارای مقادیر قابل توجهی عناصر میکروآلیاژ شامل تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم است.

## 2- انجام فرایند جوشکاری

پس از برشکاری و پخ‌زنی لوله و آماده‌سازی برای جفت کردن لوله‌ها از قید و بند خارجی استفاده شد. خط طولی جوش لوله‌ها طبق استاندارد شرکت ملی گاز ایران در موقعیت 2 و 10 قرار گرفت و قبل از عملیات جوشکاری محل اتصال جوش حدود 100 درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شدند، سپس در چهار ناحیه متقارن لوله‌ها جوشکاری شد که نواحی جوش جزء پاس ریشه محسوب می‌شود. بعد از جوشکاری چهار نقطه، گیره باز شد که در این مرحله دو جوشکار همزمان و به صورت سر به بالا از ساعت3 به سمت ساعت 12و ساعت 6 به سمت ساعت 9 و بعد از ساعت 6 به سمت ساعت 3 و از ساعت 9 به سمت ساعت 12 جوشکاری کردند. پس از اتمام جوشکاری پاس ریشه، سطح جوش توسط برس برقی کاملاً تمیز (جوش فاقد گل و سرباره) شد. پس از حدود تقریباً 5 دقیقه بعد از پاس اول، دو جوشکار همزمان از ساعت 12 به صورت سرازیر و در جهت خلاف هم جوشکاری را انجام دادند. جوشکاری پاس پرکن و پاس سطح نیز به طریق پاس گرم انجام شد. جوشکاری بر روی دو قطعه50 سانتی‌متری لوله فولادی از نوع درز جوش مسقیم ایکس 65 از خانواده فولادهای کم‌کربن پراستحکام با قطر 36 اینچ و ضخامت 0/406 اینچ بر اساس استانداردهای ویژه در چهار پاس، شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به‌ترتیب با دو الکترود 3/2 و 4 از ریشه تا سطح، توسط فرایند جوشکاری قوسی الکترود دستی پوشش‌دار صورت گرفت. برای پاس ریشه از الکترود E6010 و برای پاس‌های دیگر از الکترود E7010 استفاده گردید. جوشکاری طبق استاندارد و دستور العمل ویژه جوشکاری شرکت ملی گاز ایران انجام شده است و آزمون‌های

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

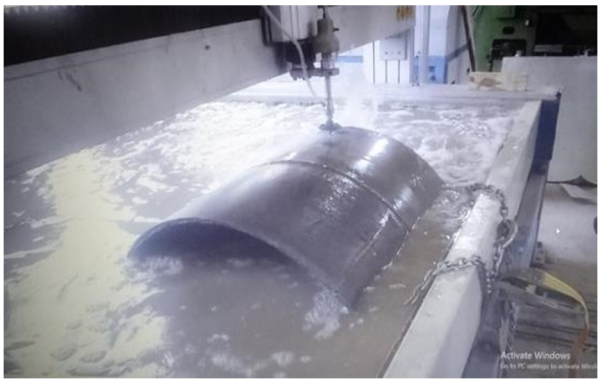
غیر مخرب انجام شد و کیفیت جوش مورد تایید قرار گرفت. در این فولاد مقدار کربن، وانادیوم، تیتانیوم و نیوبیوم به ترتیب برابر با 0/13، 0/004، 0/003 و 0/002 می‌باشد. همچنین استحکام تسلیم (مگاپاسکال)، استحکام نهایی (مگاپاسکال)، درصد ازدیاد طول و سختی (ویکرز) به ترتیب برابر با 473، 570، 41 و 186 بودند. طراحی پخ بر اساس استاندارد انجام گرفت. شکل(1) جوشکاری سر به سر محیطی را نشان می‌دهد.



شکل1- فرایند جوشکاری

**3- آماده سازی، عملیات حرارتی وآزمون های تجربی**

به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول آزمون‌های مخرب مکانیکی و متالورژیکی، نمونه‌سازی بر روی جوش لوله با دقت بالا و با کمترین حرارت برش‌کاری توسط دستگاه‌های واترجت و وایرکات انجام گردید. برای برشکاری لوله توسط واترجت، ابتدا محیط لوله به 8 قسمت مساوی تقسیم گردید و در ساعت‌های مشخص‌شده (1:40، 3:10، 4:40، 6:10، 7:40، 9:10، 10:40 و12:10) برش‌های طولی داده شد. سپس روی قطعات جداشده برش‌های عرضی انجام شد؛ به‌طوری‌که طول قطعات جداشده تقریباً 30 سانتی‌متری بدست آمد. فرآیندعملیات حرارتی نرماله شامل سه مرحله حرارت دادن فولاد در دمای 830-870 درجه سانتی گراد، نگهداری در آن دما برای یک ساعت و خنک‌کاری در معرض هوا است. مهمترین اهداف نرماله کردن شامل افزایش سختی قطعه، یکنواخت کردن نسبی ترکیب شیمیایی و ساختار میکروسکوپی و همچنین تعدیل ناهمواری‌ها و تنش‌های داخلی است. کوره نمک عملیات حرارتی دارای دهانه کورۀ 60 سانتی‌متری و ارتفاع کورۀ 90 سانتی‌متری بود. این کوره یک ترمومتر نشانگر دما دارد که به‌وسیله ترموکوبل داخل کوره دمارا به صورت دیجیتال در تابلو برق نمایش می‌دهد. نمونه‌ها مطابق شکل(2) سیم‌کشی گردید.



شکل2-برش لوله توسط واتر جت

برای قرار دادن در کوره از آویز و نگهدارنده استفاده شد. سپس داخل کوره، درون مذاب (شامل سیانول، پتاسیوم و نمک طعام) و در دمای بین 830 تا 870 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. شکل(3) عملیات حرارتی نمونه‌ها در کوره را نشان می‌دهد. بعد از اتمام زمان عملیات حرارتی، نمونه‌ها از درون کوره خارج شد و برای خنک‌کاری در معرض هوا به مدت یک ساعت قرار گرفت. برای تعیین خواص متالورژیکی، آنالیز شیمیایی جوش (در موقعیت‌های مختلف با دستگاه کوانتومتر و به روش اسپکترومتری نشری) بر اساس استاندارد در مرکز پژوهش متالورژی رازی تهران انجام شد.



شکل3- سیم کردن نمونه ها جهت قرار دادن در کوره

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

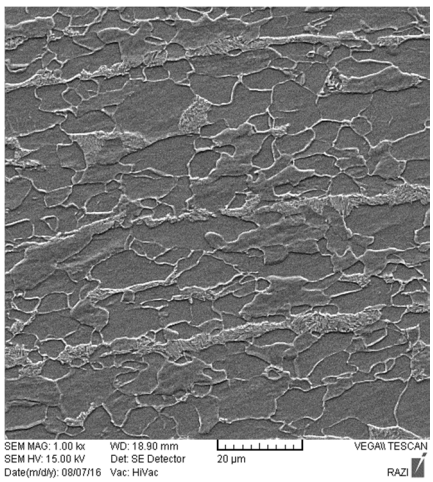
برای مشاهده و بررسی ریزساختار فلز پایه و نمونه‌های در راستای عمود بر جوش{موقعیت‌های (12-10/30)، (9-10/30)و (7/30-6)} و در مناطق مختلف شامل ریشه جوش، ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش (پس از آماده سازی) از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.



شکل4- عملیات حرارتی نمونه ها در کوره

شکل(5) ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد. شکل‌های(6) الی (8) به‌ترتیب تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت، ریشه جوش و منطقه جوش را در موقعیت‌های 7/30-6، 9-10/30 و 12-10/30 نشان می‌دهد. برای مشاهده ساختار فلز پایه، منطقه جوش و ناحیه متاثر از حرارت از آزمون متالوگرافی استفاده گردید. برای اچ کردن نمونه از محلول نایتال استفاده شد. جهت آزمون متالوگرافی نواحی فوق نمونه طبق استاندارد تهیه گردید، به منظور بررسی روند تغییر ریزساختار (از منطقه جوش، مناطق اطراف آن و فلز پایه) از میکروسکوپ نوری (با بزرگنمایی 500) در موقعیت بحرانی 7/30-6 استفاده گردید. شکل(9) تصاویرمیکروسکوپی فلز پایه را نشان می‌دهد. شکل‌های (10)تا (15) به‌ترتیب تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت مجاور فلز پایه، مجاور منطقه جوش، پاس ریشه، گرم، سطح و پرکن را نشان می‌دهد.

برای تعیین خواص مکانیکی فولاد، آزمون کشش بر روی 7 نمونه (2 نمونه در راستاهای محوری و محیطی فولاد پایه ، 4 نمونه در راستای عمود بر جوش محیطی و در موقعیت‌های 12-10/30، 9-10/30، 9-7/30 و 7/30-6 و 1 نمونه در راستای جوش در موقعیت 9-7/30) توسط دستگاه آزمون کشش (با ظرفیت 20 تن و با سرعت کشش 5میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد) انجام شد. در آزمون کشش بر روی نمونه‌های عمود بر جوش، شکست در خارج از منطقه‌ی جوش رخ داده است. مطابق استاندارد نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی کمتر از 0/85 است. نتایج آزمون کشش در جدول(2) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد استحکام تسلیم و استحکام کششی در نمونه راستای جوش بیشتر از نمونه های عمود بر جوش هست.




شکل5- ریزساختار فلز پایه

برای تعیین مقاومت به ضربه در راستای (طولی و محیطی) فلز پایه و در راستای جوش (در موقعیت‌های ساعت 12-10/30و 9-10/30) و در راستای عمود بر جوش (در موقعیت‌های 7/30-6، 9-10/30 و 12-10/30) بر اساس استاندارد انجام شد. نتایج به دست آمده انرژی شارپی را بیش از 91 ژول نمایش می‌دهد. شکل(16) نمونه شکست بعد از آزمون ضربه را نشان می دهد. نتایج آزمون‌های ضربه در جدول(3) آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که انرژی شارپی در موقعیت 12-10/30 کاهش یافته است. در شکل(17) مهمترین خواص مکانیکی با هم مقایسه شده است.برای تعیین میزان سختی فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش (در ساعت‌های12-10/30، 9-10/30، 9-7/30 و 7/30-6) آزمون سختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد انجام شد. شکل(18) نمای شماتیکی از محل قرارگیری نقاط آزمون سختی را نشان می‌دهد. نقاط 1،2 و3 در ناحیه فلز پایه، نقاط 4، 5 و6 در ناحیه متاثر از حرارت و نقاط 7، 8 و 9 در منطقه جوش قرار دارند.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

جدول1- ترکیب شیمیایی نمونه در موقعیت های مختلف برحسب درصد وزنی عناصر

| موقعیت | عناصر شیمیایی | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۲-۱۰/۳۰ | کربن | سیلیسیم | منگنز | فسفر | گوگرد | کروم | نیکل |
| | ۰/۱۳ | ۰/۱۰ | ۰/۶۹ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۳ | ۰/۵۸ |
| | مولیبدن | مس | وانادیم | تیتانیم | کبالت | قلع | نیوبیوم |
| | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۳ |
| ۱۰/۳۰-۹ | کربن | سیلیسیم | منگنز | فسفر | گوگرد | کروم | نیکل |
| | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ | ۰/۷۱ | ۰/۱۳ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۳ | ۰/۵۶ |
| | مولیبدن | مس | وانادیم | تیتانیم | کبالت | قلع | نیوبیوم |
| | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۳ |
| ۹-۷/۳۰ | کربن | سیلیسیم | منگنز | فسفر | گوگرد | کروم | نیکل |
| | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ | ۰/۶۹ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۳ | ۰/۵۵ |
| | مولیبدن | مس | وانادیم | تیتانیم | کبالت | قلع | نیوبیوم |
| | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۳ |
| ۷/۳۰-۶ | کربن | سیلیسیم | منگنز | فسفر | گوگرد | کروم | نیکل |
| | ۰/۱۴ | ۰/۱۱ | ۰/۵۹ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۹ | ۰/۰۳ | ۰/۶۰ |
| | مولیبدن | مس | وانادیم | تیتانیم | کبالت | قلع | نیوبیوم |
| | ۰/۰۲ | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ |

جدول 2- نتایج تست کشش

| موقعیت | نمونه | استحکام تسلیم ( مگا پاسکال) | استحکام نهایی (مگا پاسکال) | درصد ازدیاد طول | نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی |
|---|---|---|---|---|---|
| در راستای طولی لوله | فلز پایه | ۴۷۳ | ۵۷۰ | ۴۱ | ۰/۸۳ |
| در راستای محیطی لوله | فلز پایه | ۴۷۲ | ۵۷۲ | ۳۴ | ۰/۸۳ |
| ۱۲-۱۰/۳۰ | نمونه عمود بر جوش | ۳۵۳ | ۵۱۴ | ۲۴ | ۰/۶۸ |
| ۱۰/۳۰-۹ | نمونه عمود بر جوش | ۳۵۰ | ۴۷۹ | ۲۸ | ۰/۷۳ |
| ۹-۷/۳۰ | نمونه عمود بر جوش | ۳۶۵ | ۴۶۱ | ۱۵ | ۰/۷۹ |
| ۹-۷/۳۰ | نمونه در راستا جوش | ۳۷۰ | ۵۲۲ | ۴۳ | ۰/۷۱ |
| ۷/۳۰-۶ | نمونه عمود بر جوش | ۳۴۸ | ۴۳۲ | ۱۴ | ۰/۸۱ |

جدول(4) میزان سختی فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش را در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

## 4 - بحث و بررسی

تفاوت آنالیز شیمیایی در فلز پایه و موقعیت‌های مختلف جوش (6-7/30، 7/30-9، 9-10/30، 10/30-12) محیطی در جدول(1) قابل ارزیابی است. بنابراین انتظار خواص مکانیکی و متالورژیکی متفاوت در مناطق گوناگون جوش نسبت به فلز پایه منطقی است. این می تواند ناشی از تغییر میزان درصد فلز پایه در موقعیت‌های مختلف با توجه به حرارت ورودی ناشی از شدت جریان الکتریکی، سرعت و نحوه حرکت الکترود جوشکاری باشد. درصد عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم) درموقعیت‌های گوناگون تفاوت دارد. این امر سبب تغییر استحکام تسلیم و استحکام نهایی جوش می‌شود. عنصر نیوبیوم در موقعیت‌های مختلف جوش نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. در حالی که عناصر وانادیم وتیتانیوم در موقعیت‌های مختلف جوش نسبت به فلز پایه افزایش داشته است. کربن در موقعیت 6-7/30 و 12-10/30 به ترتیب 0/02 و 0/01 نسبت به قبل عملیات حرارتی افزایش داشته است. همچنین نیوبیوم در موقعیت 9-7/30 و تیتانیوم در موقعیت

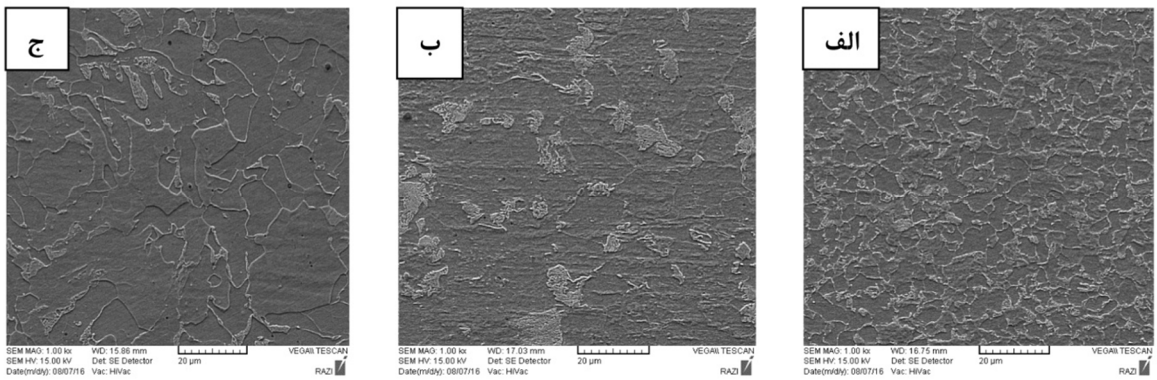
[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

جدول3- نتایج آزمون ضربه جوش.

| موقعیت | نام نمونه | انرژی شکست (ژول) |
|---|---|---|
| در راستای طولی لوله | فلز پایه | ۲۴۶ |
| در راستای محیطی لوله | فلز پایه | ۱۶۳ |
| ۱۲-۱۰/۳۰ | ضربه در راستای جوش | ۱۲۲ |
| ۱۲-۱۰/۳۰ | ضربه عمود برجوش | ۹۱ |
| ۱۰/۳۰-۹ | ضربه عمود برجوش | ۱۶۴ |
| ۱۰/۳۰-۹ | ضربه در راستای جوش | ۱۰۴ |
| ۷/۳۰-۶ | ضربه عمود بر جوش | ۱۶۱ |

جدول4- نتایج آزمون سختی سنجی.

| موقعیت | عددسختی موقعیت‌های فلز پایه (HV) | | | عددسختی موقعیت‌های ناحیه متاثر از حرارت (HV) | | | عددسختی موقعیت‌های منطقه جوش(HV) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
| ۱۲-۱۰/۳۰ | ۱۵۲ | ۱۵۱ | ۱۵۰ | ۱۵۸ | ۱۶۵ | ۱۷۰ | ۱۶۷ | ۱۷۲ | ۱۴۳ |
| ۱۰/۳۰-۹ | ۱۵۰ | ۱۵۱ | ۱۵۰ | ۱۶۰ | ۱۶۴ | ۱۷۱ | ۱۵۴ | ۱۶۰ | ۱۴۵ |
| ۹-۷/۳۰ | ۱۵۳ | ۱۵۱ | ۱۵۴ | ۱۷۰ | ۱۷۱ | ۱۸۲ | ۱۶۰ | ۱۶۳ | ۱۶۹ |
| ۷/۳۰-۶ | ۱۵۱ | ۱۵۰ | ۱۵۲ | ۱۶۰ | ۱۶۱ | ۱۶۳ | ۱۴۸ | ۱۵۱ | ۱۴۲ |

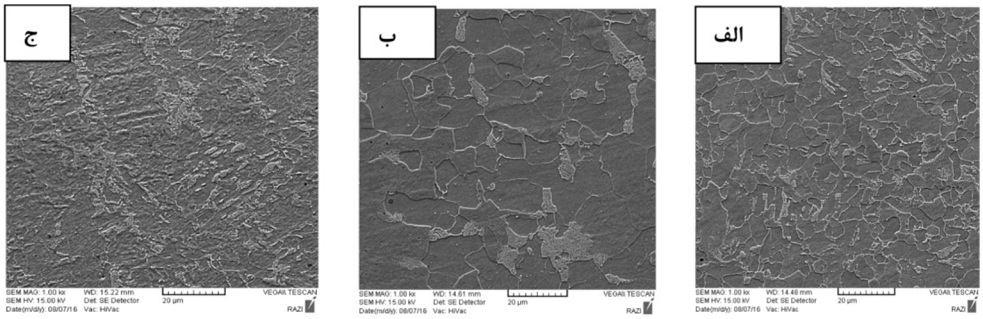



شکل 6-الف) تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت، ب) ریشه جوش و ج) منطقه جوش در موقعیت 7/30-6

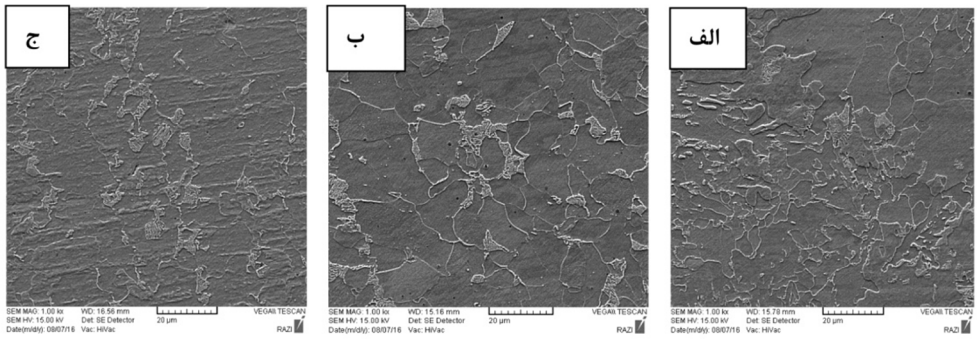
7/30-6 و9-7/30، هر کدام 0/001 نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش داشته است.

بررسی ریزساختاری نمونه‌ها نشان می‌دهد فلز پایه شامل پرلیت و فریت، ناحیه متاثر از حرارت شامل ریز ساختار درشت و خشنی از فریت سوزنی و فریت بینیتی و منطقه جوش شامل فریت سوزنی (ویدمن اشتاتن)، فریت مرز دانه‌ای و مقدار کمی بینیت است. مطالعه ریزساختار حاصل از آزمایش متالوگرافی نتایج جالبی را مشخص می‌کند. این بررسی با استفاده از نرم افزار تخصصی انجام شده است. روش محاسبه درصد فازی روش نقطه شماری است. در این تصاویر، زمینه روشن نشان‌دهنده فریت هست. تصاویر میکروسکوپی میکروسکوپی فلز پایه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی و ردیف‌های پرلیت (16 درصد پرلیت و 84 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به فلز پایه، شامل ساختارریزدانه فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت (12درصد پرلیت و 88 درصد فریت) است. تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به جوش، شامل ساختار درشت دانه ویدمن شتاتن و فریت سوزنی به همراه نواحی کوچک پرلیت (16 درصد پرلیت و 84 درصد فریت) است. تصاویرمیکروسکوپی ریشه جوش، شامل ساختار درشت دانه‌های فریت و ذرات ریز سمانتیت (99 درصد فریت) هست. تصاویر میکروسکوپی پاس گرم‌کن، شامل ریزدانه‌های

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل7-الف) تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت، ب) ریشه جوش و ج) منطقه جوش در موقعیت 9-10/30




شکل8- الف) تصاویر میکروسکوپی ناحیه متاثر از حرارت، ب) ریشه جوش و ج) منطقه جوش در موقعیت 12-10/30

فریت و به همراه نواحی کوچک پرلیت (14درصد پرلیت و 86 درصد فریت) است. تصاویر میکروسکوپی پاس پرکن، شامل ساختار ریزدانه فریت به همراه نواحی کوچک و ردیف‌های پرلیت (17درصد پرلیت و 83 درصد فریت) هست. تصاویر میکروسکوپی پاس سطح، شامل ساختار ریز دانه‌های فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت (15 درصد پرلیت و 85 درصد فریت) است. بعد از انجام عملیات حرارتی نرماله کردن مقدار فریت در ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به جوش، ریشه جوش، پاس گرم، پاس پرکن و پاس سطح به ترتیب 12، 2، 14، 11، 9 و 6 درصد افزایش داشته است.

نتایج جدول(2) نشان می‌دهد پس از عملیات نرماله کردن، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی در موقعیت‌های مختلف تفاوت دارد. نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی در نمونه های عمود بر جوش 25 درصد و در نمونه‌ی راستای جوش نیز 21 درصد است. استحکام نهایی و تسلیم و حداکثر ازدیاد طول نسبی در مناطق جوش کمتر از فولاد پایه (به غیر از نمونه راستای جوش در موقعیت 9-7/30)به‌دست آمد. بنابراین مساحت زیر نمودارها در موقعیت‌های مختلف جوش محیطی از فولاد پایه کمتر است لذا می‌توان نتیجه گرفت که میزان چقرمگی استاتیکی در منطقه جوش از فولاد پایه کمتر است. نتایج آزمون عمود بر جوش در ساعت 9-7/30 نشان می‌دهد، میزان تغییر طول نمونه آزمایش نسبت به فلز پایه 26 درصد افزایش داشته است. میزان استحکام تسلیم نمونه‌ها در راستای جوش و در جهت عمود بر جوش به ترتیب 22 و 25 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. میزان استحکام نهایی نمونه‌ها در جهت عمود بر جوش نسبت به فلز پایه تقریباً 17 درصد کاهش و در جهت راستای جوش نسبت به فلز پایه 9 درصد کاهش پیدا کرده است. میزان تغییر طول نمونه‌های عمود بر جوش نسبت به فلز پایه در حدود 50 درصد کاهش و در راستای جوش نسبت به فلز پایه 26 درصد افزایش داشته است. همچنین میزان استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه‌های عمود بر جوش نسبت به فلز پایه 25 درصد کاهش و در راستای جوش نمونه‌ها نسبت به فلز پایه 14 درصد کاهش داشته است. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی، تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه عمود برجوش در موقعیت 12-10/30 نسبت به

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

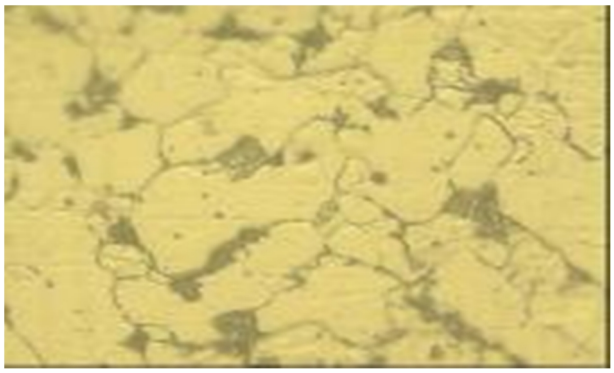
فلز پایه به ترتیب برابر 25، 9، 41 و 18 است. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی، تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه عمود بر جوش در موقعیت 10/30-9 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 26، 16، 31 و 12می‌باشد. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی، تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه عمود بر جوش در موقعیت9-7/30 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 23، 19، 63 و 48 به‌دست آمد. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی، تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه عمود بر جوش در موقعیت 7/30-6 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 26، 24، 66 و2 بود. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه در راستای جوش محیطی در موقعیت 9-7/30 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 22، 9 و 14 به‌دست آمد. همچنین در این موقعیت مقدار افزایش تغییر طول 26 درصد بود. با انجام عملیات حرارتی نرماله کردن درصد ازدیاد طول در نمونه های عمود بر جوش و در راستای جوش در موقعیت 9-7/30 به ترتیب 4 و 17 نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش داشته است. با نرماله کردن نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی در نمونه عمود بر جوش در موقعیت 7/30-6، هفت درصد نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش داشته است.

در جدول(3) کمترین انرژی ضربه در نمونه‌های ضربه عمود بر جوش محیطی (در راستای طولی لوله) و در راستای جوش به ترتیب در موقعیت 12-10/30 (91 ژول) و 10/30-9 (104 ژول) به‌دست آمده است. این مقادیر از میانگین مقادیر حداقل داده شده در استاندارد بیشتر است. این موضوع سلامت جوش را تایید می‌کند. با توجه به نتایج آزمایش، ضعیف‌ترین مقاومت به ضربه، نمونه عمود بر جوش محیطی در موقعیت 12-10/30 و بیشترین استحکام را فلز پایه(راستای طولی لوله) دارد. کاهش مقاومت به ضربه در موقعیت‌های مختلف جوش محیطی نسبت به فلز پایه رفتار غیرخطی دارد. انرژی شکست نمونه‌های ضربه در راستای جوش نسبت به فلز پایه به‌طور میانگین 30 درصد کاهش و در راستای عمود بر جوش نسبت به فلز پایه تقریباً 43 درصد کاهش داشته است. مقاومت به ضربه در راستای جوش از موقعیت 12-10/30 به سمت موقعیت 10/30-9 کاهش داشته است و میزان کاهش انرژی شکست در راستای عمود بر جوش نسبت به راستای جوش بیشتر است. مقاومت به ضربه بستگی به حالت‌های جوشکاری (تخت، افقی، عمودی سرازیر و بالای سر) دارد. تمرکز تنش حرارتی باعث کاهش مقاومت به ضربه در موقعیت 12-10/30 در نمونه عمود بر جوش شده است، زیرا لوله های اولیه در موقعیت 2 و 10 نسبت به هم جوشکاری شده است. نتایج نشان می‌دهد جوشکاری و اثرات حرارتی ناشی از آن می‌تواند به میزان زیاد خواص دینامیکی فولاد را کاهش دهند (برخلاف آزمون کشش که از نظر استاتیکی ضعیف‌ترین استحکام را درمنطقه متاثر از حرارت ارزیابی می‌کرد). کاهش شدید مقاومت به ضربه در موقعیت 12-10/30 را می‌توان در آنالیز شیمیایی متفاوت آن و نیز احتمال قرارگیری در نزدیکی خط طولی جوش نسبت به فلز پایه ارزیابی کرد. کاهش میزان عناصر میکروآلیاژی در فلز جوش و همچنین رشد احتمالی این عناصر و قرارگرفتن غیرکنترلی در زمینه ریزساختار فلز جوش اثر مهمی بر خواص مکانیکی دارد. در اثر سیکل های حرارتی متنوع و غیرکنترلی ناشی از حالت‌های مختلف جوشکاری، تغییر حرکت دست در حین جوشکاری، تغییر زوایای الکترود در راستای طولی لوله در جوش محیطی و طول قوس، مقدار و اندازه عناصر میکروآلیاژی و پیوندشان با زمینه تغییر می‌کند.

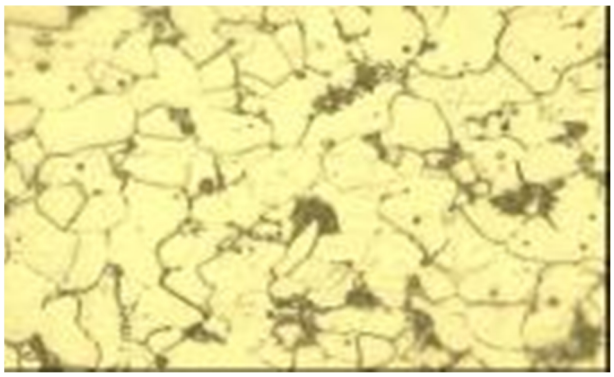
این چرخه حرارتی همچنین می‌تواند مورفولوژی عناصر محلول در فازها را تغییر دهد. بنابراین کاهش انرژی شارپی نسبت به فلز پایه در موقعیت‌های مختلف جوش منطقی به نظرمی‌رسد. با انجام عملیات حرارتی نرماله کردن مقاومت به ضربه نمونه های عمود بر جوش در موقعیت های 7/30-6 و 10/30-9 به ترتیب 39 و 68 ژول نسبت به قبل از عملیات حرارتی افزایش داشته است. همانگونه که در جدول(4) مشاهده می‌شود، میزان سختـی در پاس‌های ریشه، گرم کن و سطـح در

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

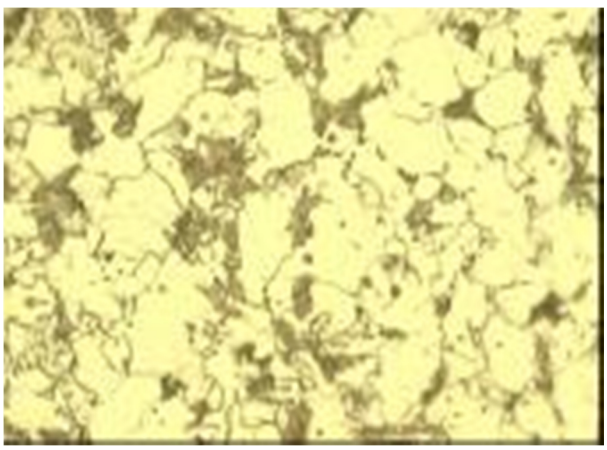
موقعیت‌های مختلف جوش محیطی تفاوت دارد.



شکل9- تصویرمیکروسکوپی فلز پایه

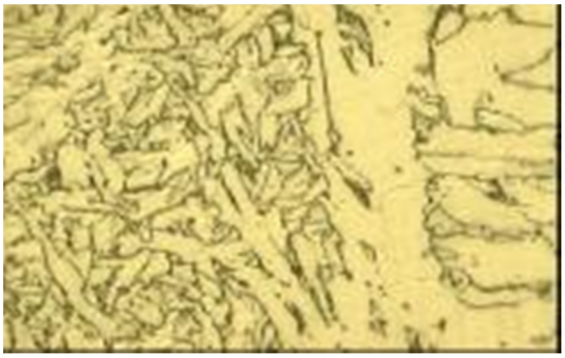


شکل10- تصاویرمیکروسکوپی ناحیه متاثر ازحرارت مجاور فلز پایه

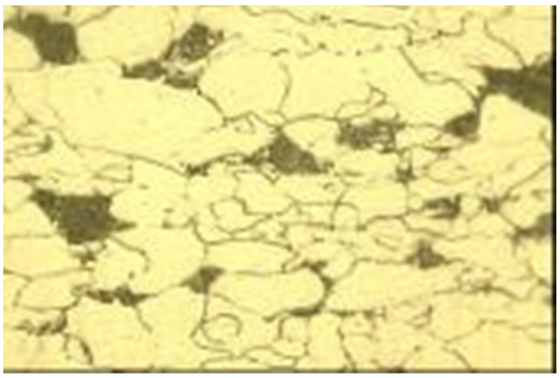


شکل11- تصاویرمیکروسکوپی ناحیه متاثر ازحرارت مجاور جوش

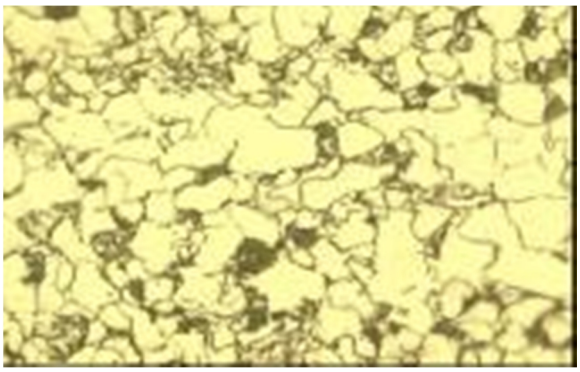
این تغییرات می‌تواند بر اثر از عواملی چون نوع الکترود در پاس ریشه و پاس‌های دیگر، افزایش قطر الکترود، آمپر، سرعت حرکت دست جوشکار، دمای پیشگرم، دمای بین پاسی و در کل حرارت ورودی باشد. هر یک از این موارد در حرارت اولیه ناشی از جوشکاری و در نواحی متاثر از حرارت (پاس‌های قبلی و بعدی) موثر است.



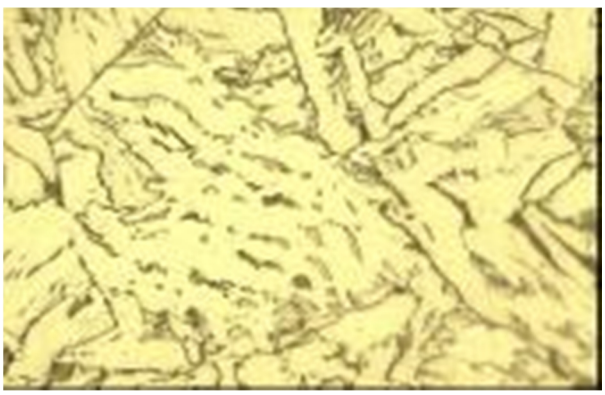
شکل 12- تصاویرمیکروسکوپی پاس ریشه



شکل13- تصاویرمیکروسکوپی پاس گرم

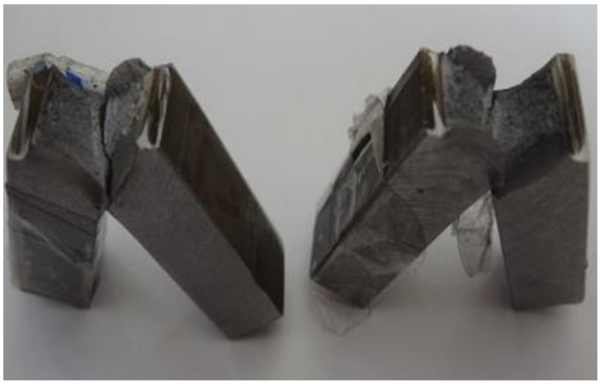


شکل 14- تصاویرمیکروسکوپی پاس پرکن

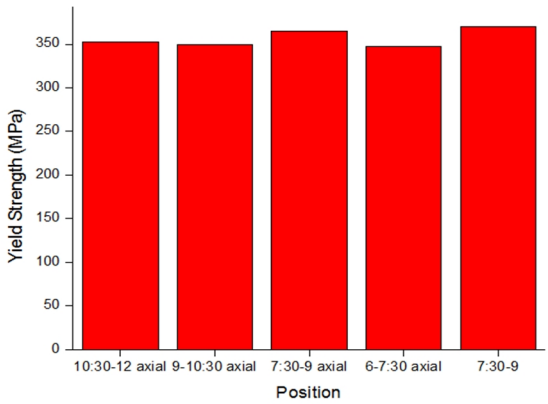


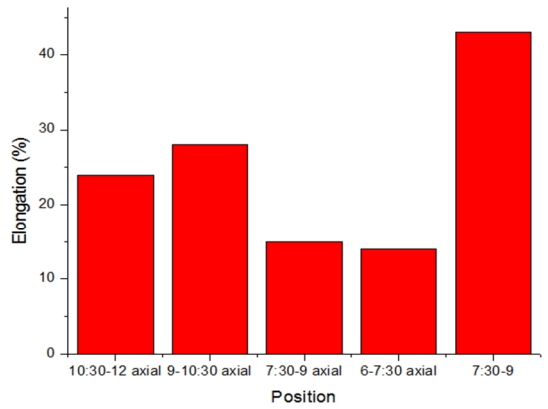
شکل15- تصاویرمیکروسکوپی پاس سطح

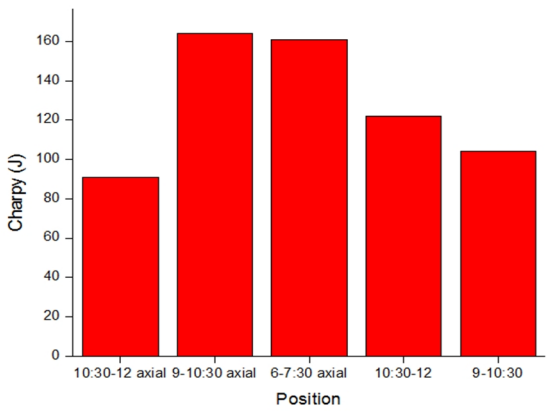
[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]



شکل16- نمونه شکست بعد از آزمون ضربه

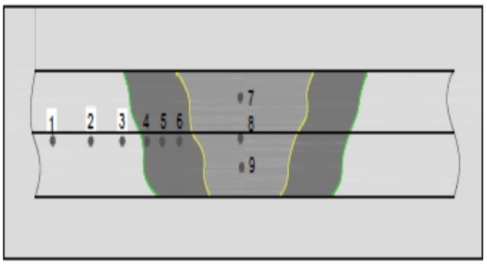



شکل17-مقایسه خواص مهم مکانیکی در موقعیت های مختلف

با افزایش تعداد پاس ها، گرادیان درجه حرارت، تعداد جهات و نرخ سرد شدن تغییر می کند. نتایج حاصل از آزمون سختی نشان می‌دهد که سختی جوش با توجه به عملیات پیشگرم و دمای بین پاسی کنترل شده کمتر ازفلز پایه است. همچنین میزان سختی در منطقه متاثر از حرارت نیز کمتراز فلز پایه است. در این مناطق با توجه به نرخ سرد شدن در جهت ضخامت لوله، انتقال حرارت تنها از مسیر کناری اتفاق می‌افتد. این میزان حرارت با توجه به حالت جوشکاری، سرعت جوشکاری و حرارت ورودی بالا قابل توجه است. نتایج نشان می‌دهد کمترین مقدار سختی 151 ویکرز و در موقعیت 6-7/30 اتفاق افتاده است. همچنین در موقعیت 9-7/30 بالاترین مقدار سختی رخ داده است. با انجام عملیات حرارتی نرماله کردن مقدار سختی فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و منطقه جوش در موقعیت‌های مختلف (6-7/30، 7/30-9، 9-10/30 و 10/30-12) نسبت به قبل از عملیات حرارتی کاهش داشته است.




شکل18- نمای شماتیکی از نقاط آزمون نمونه‌ها

## 5- نتیجه‌گیری

برای رسیدن به اتصال یکپارچه در جوش سر به سر لوله‌های انتقال گاز، خواص مناطق جوش و فلز پایه از نظر مکانیکی و متالورژیکی باید تا حد ممکن به هم نزدیک باشند، در این مقاله با انجام عملیات نرماله کردن آزمایش‌های مختلف مطابق با استاندارد انجام گردید و با بررسی و تحلیل دقیق‌تر نتایج، خواص مکانیکی و متالورژیکی در نواحی مختلف (فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و منطقه جوش) مشخص می‌شوند.

- درصد عناصر شیمیایی در فلز جوش دارای تغییراتی نسبت به فلز پایه می‌باشد. عناصرتیتانیوم، وانادیوم و مولیبدن موجود

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

در فلز جوش دارای درصد وزنی بیشتر بودند. عناصر نیوبیوم، تیتانیوم و وانادیوم با شیب تندی تغییر کردند که باعث اختلاف در خواص فلزجوش وفلزپایه شدند.

- افزایش عنصر وانادیوم در منطقهٔ فلز جوش موجب کاهش چقرمگی و در نهایت، افت مقاومت به ضربه فلز جوش گردید.

- در نواحی مختلف جوش و متأثر از حرارت ساختارهای متنوع متالورژیکی مشاهده گردید. ساختارمیکروسکوپی در فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به جوش، ریشه جوش، پاس گرم‌کن، پاس پرکن و پاس سطح به‌ترتیب شامل 16 درصد پرلیت و 84 درصد فریت، 12 درصد پرلیت و 88 درصد فریت، 16 درصد پرلیت و 84 درصد فریت، 99 درصد فریت، 14درصد پرلیت و 86 درصد فریت، 17درصد پرلیت و 83 درصد فریت و 15 درصد پرلیت و 85 درصد فریت بودند.

- نتایج آزمون کشش در جوش نشان داد که در موقعیت 9-7:30 میزان تغییر طول نسبی افزایش داشته است و باعث افزایش چقرمگی و ضربه‌پذیری شده است.

- آزمون ضربه روند کاهشی انرژی شارپی نمونه‌ها را در موقعیت‌های مختلف نسبت به فلز پایه به منطقه جوش مشخص کرد. میانگین انرژی شارپی در راستای محیطی جوش و فولاد پایه به‌ترتیب 113 و 163 ژول و میانگین انرژی شارپی در راستای عمود بر جوش محیطی و فلز پایه به‌ترتیب 139 و 246 ژول بود. میزان مقاومت به ضربه نمونهٔ عمود بر جوش در موقعیت 12-10:30 نسبت به فلز پایه کاهش 2/7 برابری را نشان داد.

- مقاومت به ضربه در راستای محیطی جوش نسبت به راستای محوری کاهش بیشتری داشته است که نشان‌دهندهٔ کاهش چقرمگی در این راستا است.

- سخت‌ترین منطقهٔ ناحیه متاثر از حرارت در موقعیت 9-7:30 برابر با 174 ویکرز و نرم‌ترین منطقه، ناحیهٔ جوش در موقعیت 6-7:30 برابر 147 ویکرز بود که نتایج آزمون کشش حدوداً در آخرین نقاط منطقه متاثر از حرارت را تایید کرد.

- در آزمـون کشش، شکست در خـارج از جوش اتفـاق افتاد. استحکام نهایی این نمونه دارای میانگین 472 مگاپاسکال بود.

## منابع


1- S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.

2- S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 32, pp. 33-40, 2009.

3- A. Fragiel, R. Schouwenaarf, R. Guardián, R. Perez, Microstructural characteristics of different commercially available API 5L X65 steels,Journal of New Materials for Electrochemical Systems, Vol. 8, pp. 115-119, 2005.

4- F. B. Pickering, The spectrum of microalloyed high strength low alloy steels in HSLA steels technology and applications, International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels, Philadelphia, 1983.

5- S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, On the Relation of Microstructure and Impact Toughness Characteristics of DSAW Steel of Grade API X70, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 32, pp. 33-40, , 2009.

6- W. Shitong, L. Shanping, Effects of multiple normalizing processes on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel weld metal with and without Nb, Materials and Design, Vol. 32, pp. 30-43, 2012.

7- S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.

8-M. Sabokrouh, S. H. Hashemi, M. R. Farahani, Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 231, pp. 1039-1047, 2017.

9-M. Alizadeh, S. Bordbar, The influence of microstructure on the protective properties of the corrosion product layer generated on the welded API X70 steel in chloride solution , journal homepage, Vol. 22, pp. 604-612, 2013.

10-W. li, M. Zhen, B. Li, chongZhang., Ya-zhengLiu ., Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel,Materials Science & Engineering A., Vol. 3, pp. 121-130, 2016.

11-مجید سبک روح و علیرضا آجرلو، تعیین تجربی اثر موقعیت بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش سر به سر چند پاسه لوله کم آلیاژ استحکام بالا در خطوط انتقال گاز طبیعی، مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، بهمن و اسفند 1397 ، دوره 5، شماره 4، ص 30-43.


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]