

# ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنش های پسماند ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله ۵۶ اینچ فولادی API X-70

پژوهش نفت

سال بیست و سوم

شماره ۷۶

صفحه، ۶۵-۷۹ ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۶/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۱/۱۶

مجید سبک روح\*<sup>۱</sup>، سید حجت هاشمی<sup>۱</sup> و محمد رضا فراهانی<sup>۲</sup>

۱. گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند

۲. دانشکده مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران

majidsabokrooh@birjand.ac.ir

## چکیده

تنش های پسماند ناشی از جوش کاری باعث کاهش تنش طراحی خطوط لوله قطور و پرفشار انتقال گاز طبیعی می شود. در این مطالعه که برای اولین بار در ایران صورت گرفته است، ابتدا دو قطعه لوله ۵۶ اینچ فولادی (از نوع درز جوش مارپیچ) با گرید ایکس ۷۰ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ بر اساس دستورالعمل ویژه شرکت ملی گاز ایران جوش کاری گردید. پس از آن آزمون کرنش سنجی سوراخ بر اساس استاندارد ASTM E 837 انجام شد. سپس برای اطمینان از سلامت جوش، تبدیل کرنش های آزاد شده به تنش و تشخیص اثر این تنش ها بر رفتار سازه، آزمایش های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش و ضربه انجام شد. نتایج نشان می دهد حداکثر تنش پسماند کششی در مرکز درز جوش و در راستای محیطی سطح خارجی لوله برابر با ۳۱۸ MPa بوده و بیش از ۶۰٪ استحکام تسلیم جوش می باشد. در منطقه جوش، عناصر میکروآلیاژی کاهش و میزان کربن افزایش یافته است. در پاس سطح ۷۵٪ فاز مارتنزیت تمپر نشده مشاهده شده است. افزایش کربن سبب افزایش حجم کریستالی مارتنزیت و در نتیجه کاهش تنش پسماند و همچنین کاهش مقاومت ماده خواهد شد.

کاهش استحکام کششی در جوش نیز سبب افزایش درصد تنش پسماند نسبت به استحکام استاتیکی سازه شده است. علاوه بر این کمترین مقاومت به ضربه در راستای محیطی (J<sub>5T</sub>) جوش سر به سر لوله اتفاق افتاده است. بنابراین مرکز درز جوش در راستای محیطی سطح خارجی به عنوان ناحیه بحرانی لوله دارای بیشترین تنش پسماند کششی و درصد فاز مارتنزیت و کمترین عناصر میکروآلیاژی، استحکام تسلیم، کرنش نهایی و مقاومت به ضربه است.

واژه های کلیدی: تنش پسماند، جوش چند پاسه محیطی، کرنش سنجی سوراخ، خواص مکانیکی و متالورژیکی، لوله API X70.

## مقدمه

ایران طولانی ترین شبکه لوله انتقال نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را دارا می باشد [۱]. جوش کاری سر به سر حدود ۲۵٪ زمان لازم برای ایجاد یک خط لوله انتقال جدید را تشکیل می دهد و برای انجام آن مهارت بالایی مورد نیاز است [۲]. در برخی مواقع ممکن است جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد [۳].

### روش تحقیق

ابتدا دو قطعه لوله ۵۶ اینچ فولادی (از نوع درز جوش ماریپیچ) با ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ، بر اساس دستورالعمل ویژه شرکت ملی گاز ایران جوش کاری گردید. پس از آن آزمون کرنش سنجی سوراخ انجام شد. سپس به منظور اطمینان از سلامت جوش، تبدیل کرنش‌های آزاد شده به تنش و تشخیص اثر این تنش‌ها بر رفتار سازه، آزمایش‌های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش و ضربه انجام گردید.

### لوله فولادی، آماده سازی و انجام فرآیند جوش کاری

لوله فولادی مورد آزمایش از نوع درز جوش ماریپیچ (اسپیرال) با گرید ایکس ۷۰ با قطر ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ می‌باشد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی عناصر موجود را در فولاد آزمایش شده را نشان می‌دهد [۱۳]. جوش کاری بر روی دو قطعه ۵۰ cm لوله فولادی اسپیرال ایکس ۷۰ بر اساس استاندارد<sup>۲</sup> AWS و API و در ۹ پاس، شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به ترتیب با سه قطر الکتروود ۳/۲، ۴ و ۵ از ریشه تا سطح، توسط فرآیند جوش کاری قوسی الکتروود دستی پوشش‌دار<sup>۳</sup> صورت گرفت. جدول ۲ مشخصات فرآیند جوش کاری در هر پاس را نشان می‌دهد. طرح پخ و آماده‌سازی لوله‌ها با زاویه پخ ۳۰ درجه و پیشانی پخ ۱/۶ mm مطابق با استاندارد انجام گردید. فاصله بین لوله‌ها در شعاع داخلی لوله ۳/۲ mm و در شعاع خارجی لوله ۳۶ mm می‌باشد. شکل‌های ۱ الف تا ۱ ت به ترتیب قید و بند لوله‌ها و تنظیم اتصال جوش سر به سر محیطی، محدوده طراحی پخ بر اساس استاندارد API 1104، شرایط طرح پخ قبل از فرآیند جوش کاری محیطی و نحوه شرایط فرآیند جوش کاری را نشان می‌دهد.

### تشریح آزمون نیمه مخرب کرنش سنجی سوراخ

مراحل آماده‌سازی شامل روغن زدایی، سمباده زنی، رسم خطوط نشانه برای کرنش‌سنج و ختنی‌سازی بر اساس استاندارد ASTM E 837 انجام گرفت [۱۴].

بنابر این جوش علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد. به همین دلیل علاوه بر آزمون‌های غیر مخرب، تایید سلامت به وسیله آزمون‌های مخرب مکانیکی (کشش و ضربه) و بررسی ریزساختارهای متالورژیکی (کوانتومتری و متالوگرافی) نیز ضروری است [۴]. بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند قبل از ساخت مشخص نبوده و معمولاً به صورت کامل در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود [۵]. منابع این تنش‌ها بسیار متنوع است و می‌توان آن را در سه مجموعه کلی مکانیکی، حرارتی و متالورژیکی دسته بندی نمود [۶].

با وجود حجم بالای فعالیت‌های انجام گرفته در زمینه محاسبه تنش‌های پسماند جوشی طی سال‌های اخیر، هنوز در این حوزه اتفاق نظر عمومی وجود ندارد. نتایج بررسی‌های مؤسسات استاندارد و محققین، نشان‌دهنده تغییرات گسترده مقدار و توزیع تنش‌های پسماند جوشی در یک اتصال محیطی (سر به سر) بین دو لوله است [۷].

دلیل این موضوع را می‌توان در روش‌های مختلف اندازه‌گیری، شبیه‌سازی و همچنین طراحی زاویه پخ<sup>۱</sup> اتصال جستجو کرد. آزمون‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به سه گروه روش‌های کاملاً مخرب، روش‌های غیرمخرب و روش‌های نیمه مخرب تقسیم می‌شوند [۸].

کرنش سنجی سوراخ به عنوان یک روش نیمه مخرب با گستره کاربرد حدود ۲۲٪، مرسوم‌ترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است و برای تعیین تنش پسماند در نزدیک سطح جسم به کار می‌رود [۹]. این روش شامل نصب کرنش‌سنج، ایجاد یک سوراخ در نزدیکی آن و اندازه‌گیری کرنش آزاد شده است [۱۰]. استانداردهای صنعتی از حداقل نتایج نمونه‌های آزمایشی مختلف نتیجه شده است و معمولاً به تنهایی بسیار محافظه کارانه بوده و مقداری از استحکام سازه را لحاظ نمی‌کند [۱۱]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر استحکام<sup>۴</sup> که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری دارد. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی مانند تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود زمینه دارد [۱۲].

1. Groove Angle

2. HSLA (High Strength Low Alloy) Steel

3. API (American Petroleum Institute), AWS (American Welding Society)

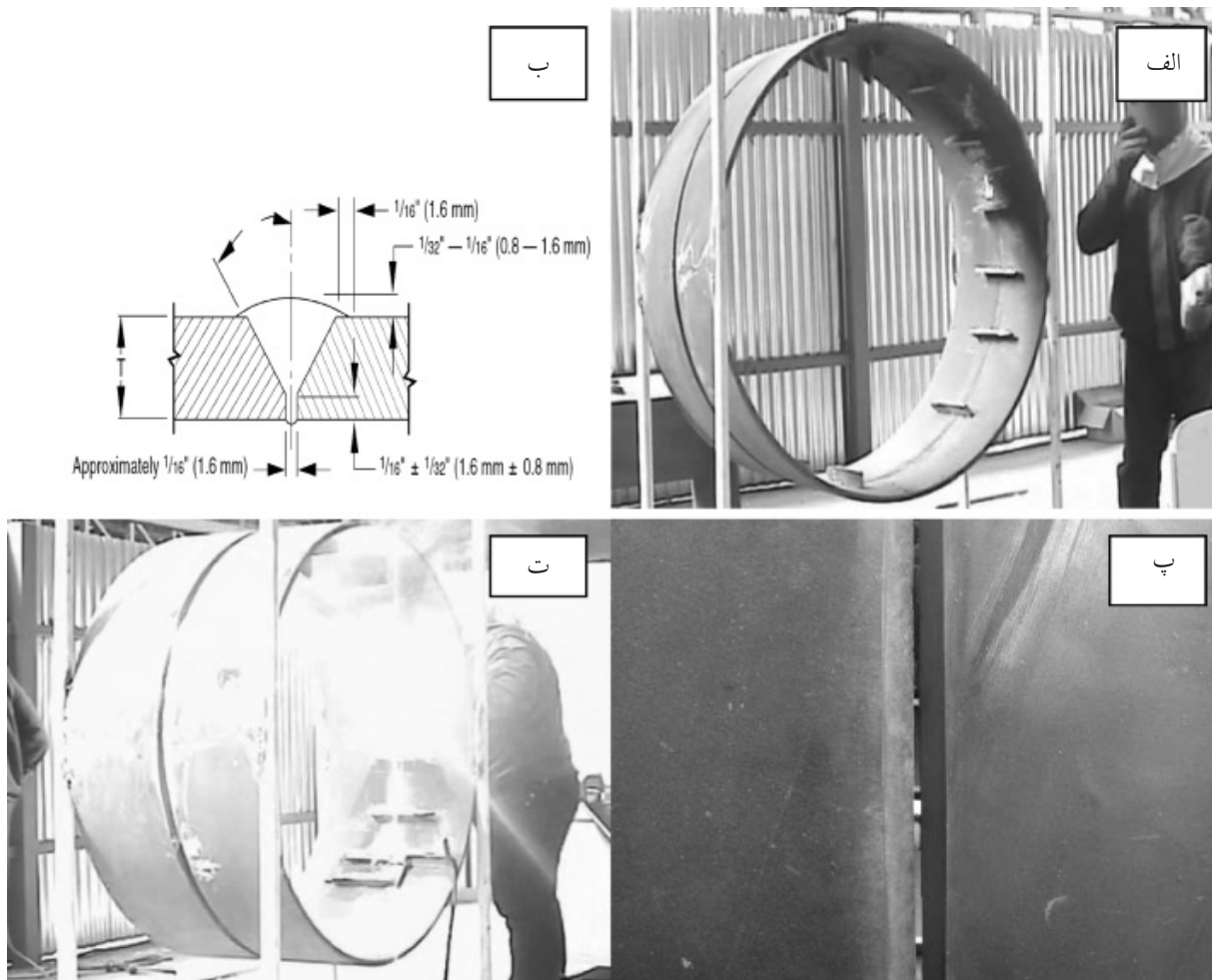
4. SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

جدول ۱- درصد عناصر وزنی موجود در ترکیب شیمیایی لوله فولادی مورد آزمایش [۱۳]

نام عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	B
درصد وزنی	۰/۰۵۳	۰/۱۹	۱/۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۰۰۱
نام عنصر	Ca	Cu	Mo	N	Nb	Ti	V	Al
درصد وزنی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲

جدول ۲- مشخصات فرآیند جوش کاری در هر پاس

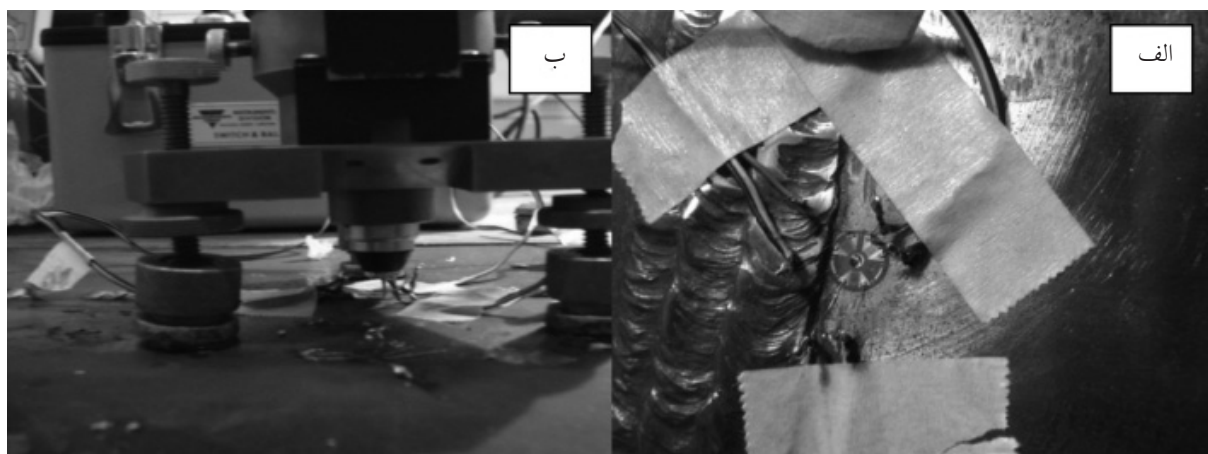
نوع پاس	فرآیند	کلاس الکتروود	قطر الکتروود (mm)	نوع جریان	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوش کاری (mm/min)
ریشه	SMAW	E 6010	۳/۲	DC	۸۰	۲۳/۲	۱۲۰
گرم	SMAW	E 8010 G	۴	DC	۱۰۰	۲۴	۱۳۰
پرکن	SMAW	E 8010 G	۴	DC	۱۲۰	۲۴/۸	۱۵۰
سطح	SMAW	E 8010 G	۵	DC	۱۵۰	۲۶	۱۸۰



شکل ۱- الف) قید و بند لوله ها و تنظیم اتصال جوش محیطی، ب) طراحی اتصال بر اساس استاندارد، پ) شرایط طرح پیچ قبل از فرآیند جوش کاری محیطی، ت) جوشکاری سر به سر لوله

مشابه اجرا گردید. سپس همانند سطح خارجی لوله، این آزمایش بر روی سطح داخلی لوله نیز انجام گرفت. شکل ۲ محل قرار گیری رزت و اتصالات را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در شعاع داخلی لوله تنها یک منطقه جوشی وجود دارد و روند کلی تغییرات تنش مشخص شده است؛ این آزمایش تنها بر روی سه نقطه صورت گرفت. ۲ رزت به ترتیب در فواصل ۲۲ و ۵۵ mm از لبه جوش و رزت آخر روی مرکز درز جوش قرار گرفت. شکل‌های ۳ الف و ۳ ب به ترتیب نقاط ارزیابی تنش‌های پسماند در روی سطوح خارجی و داخلی لوله را نشان می‌دهد. نمودار شکل ۴ تنش‌های پسماند محیطی و محوری سطوح داخلی و خارجی لوله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشخص است، مقدار حداکثر تنش و سطح توزیع تنش‌ها (متوسط نقاط ارزیابی تنش در یک سطح) در سطح خارجی لوله بیشتر از سطح داخلی آن است.

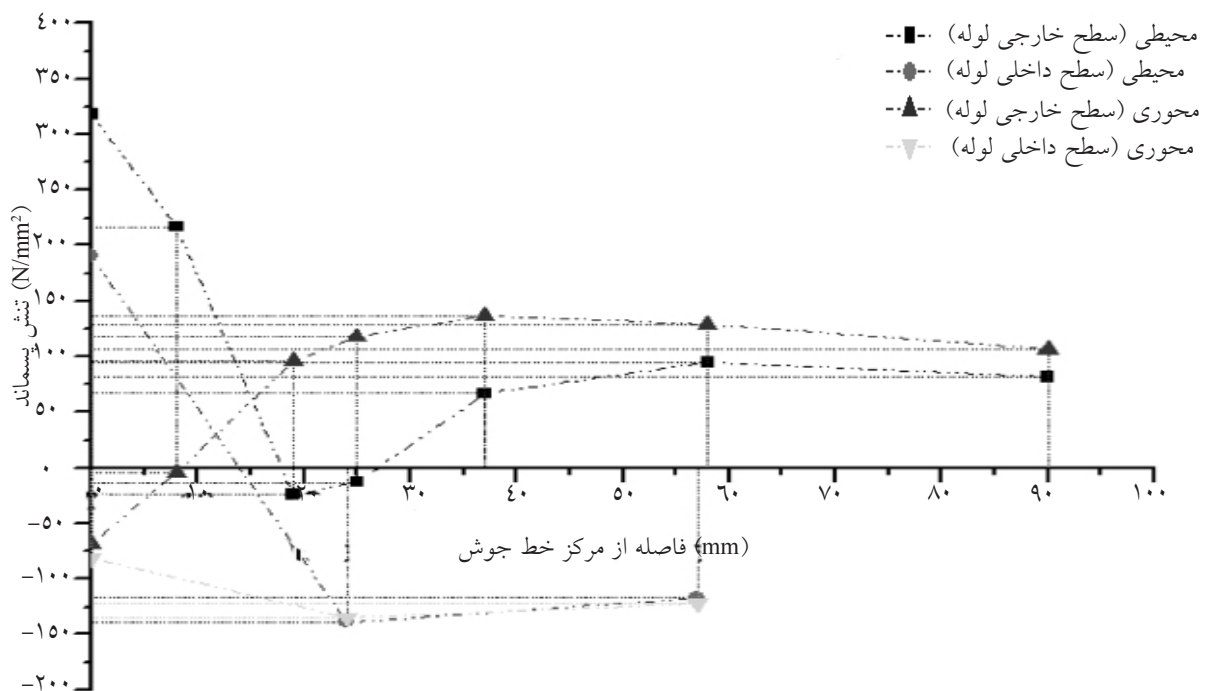
با توجه به مجاز نبودن نزدیکی نقاط مورد آزمایش بر طبق استاندارد، کرنش‌سنج‌ها بر روی یک خط عمود بر درز جوش قرار نگرفته‌اند. مراحل انجام عملیات سوراخ‌کاری طبق استاندارد مربوطه صورت گرفت و کرنش‌های آزاد شده، اندازه‌گیری شد. ابتدا آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ بر روی مناطق مختلف منطقه متاثر از حرارت سطح خارجی لوله به ترتیب در فواصل ۴، ۱۰، ۲۲، ۴۳ و ۷۵ mm از لبه درز جوش انجام شد. پس از تکمیل آزمایش بر روی فولاد پایه، آماده‌سازی سطح خارجی جوش جهت نصب رزت‌ها مطابق با استاندارد مربوطه اجرا گردید. با توجه به اینکه جوش‌کاری نهایی لوله در سه پاس موازی صورت گرفته و اتصال سر به سر لوله به صورت متقارن لحاظ گردیده است؛ دو نقطه محل برای آزمایش روی پاس‌های کناری و مرکزی در نظر گرفته شد و مراحل انجام آزمایش به صورت



شکل ۲- الف) محل و نحوه قرارگیری رزت، ب) شرایط فرزکاری در حین آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ



شکل ۳- محل آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ، الف) روی سطح خارجی لوله، ب) روی سطح داخلی لوله



شکل ۴- توزیع تنش‌های پسماند در سطوح خارجی و داخلی لوله.

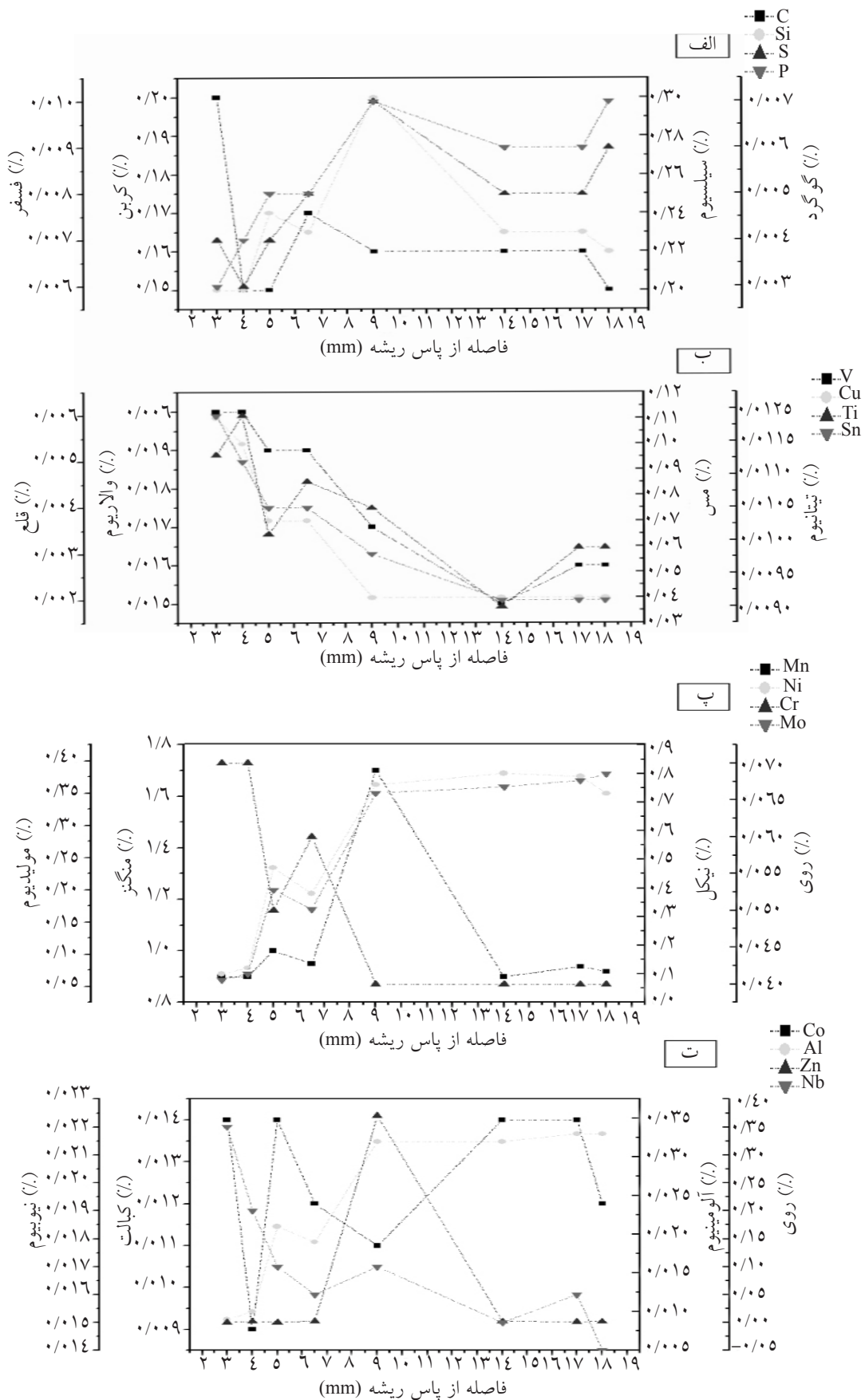
مطابق با استاندارد ASTM E407 برای مشخص کردن ریزساختار نواحی مختلف استفاده گردید. در شکل ۷ نواحی مختلف جوشی قابل رویت است. برای بررسی ریزساختار از کتاب راهنما استفاده شده است. به منظور تشخیص انواع فازها و مقدار آن و تعیین اندازه دانه در مناطق جوش و متاثر از حرارت (پاس ریشه و سطح که محل آزمایش کرنش سنجی سوراخ است) از میکروسکوپ نوری<sup>۱</sup> با بزرگنمایی ۱۰۰۰ استفاده گردید. شکل ۸ از بالا به پایین پاس‌های ریشه و سطح را نشان می‌دهد. تصاویر الف، ناحیه جوش و تصاویر ب، ناحیه جوش را در سمت چپ و منطقه متاثر از حرارت را در سمت راست اتصال نشان می‌دهد. مرز و تغییر ساختار جوش به ساختار فولاد پایه، به ویژه در منطقه پاس ریشه کاملاً مشهود است. تصاویر نشان‌دهنده ریزساختارهای متفاوت در مناطق مختلف جوش است. در تصویر الف ۲ مقدار قابل توجهی ساختار تیغه‌ای مارتنیت لایه‌ای و تا حدودی مورفولوژی تیغه‌ای قابل مشاهده است که می‌تواند در میزان تنش پسماند اثر قابل توجهی داشته باشد. شکل ۹ ریزساختار گرده جوش را در بزرگنمایی ۵۰۰ نشان می‌دهد. این تصاویر در نزدیکی محل آزمون کرنش سنجی سوراخ جهت بررسی تنش پسماند در سطح خارجی جوش گرفته شده است.

### تشریح آزمون‌های مخرب و نتایج آن کوانتومتری

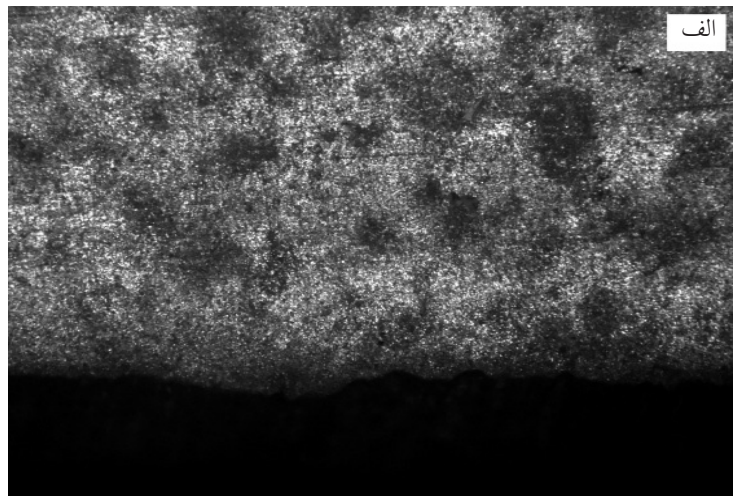
به منظور بررسی خواص متالورژیکی جوش، ترکیب شیمیایی در هر منطقه توسط دستگاه کوانتومتر بر اساس استاندارد<sup>۱</sup> به دست آمد. شکل ۵ نمودارهای نتایج آزمایش کوانتومتری را در نواحی مختلف درز جوش نشان می‌دهد. این نتایج از پاس ریشه به سوی پاس نهایی مرتب گردیده است و بمنظور مقایسه روند تغییر این عناصر رسم شده است. لازم به ذکر است که درصد عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم) با افزایش تعداد پاس و فاصله از شعاع داخلی لوله کاهش یافته است. کاهش این عناصر سبب کاهش استحکام و در نتیجه افزایش نسبت تنش پسماند به مقاومت تسلیم جوش می‌شود.

### متالوگرافی

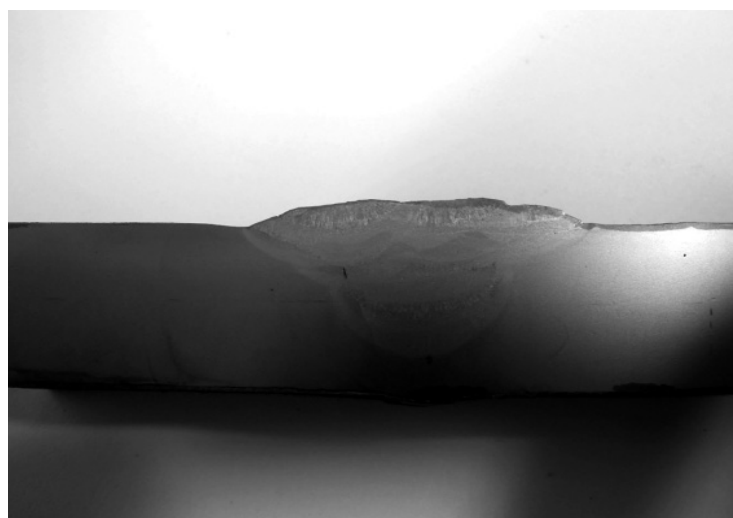
پس از تمیزکاری و پولیش کاری سطح از محلول اسید کلریدریک ۵۰٪ بر اساس استاندارد جهت بررسی درشت ساختار مناطق مختلف درز جوش استفاده گردید (شکل ۶). همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، مناطق مختلف جوش دارای میزان خوردگی متفاوت می‌باشد. مکان‌های دارای خوردگی بیشتر، سطح انرژی بالاتری دارند. پس از سمباده‌زنی و پولیش کاری دوباره سطح بر اساس استاندارد ASTM E3 از محلول حکاکی نایتال ۳٪



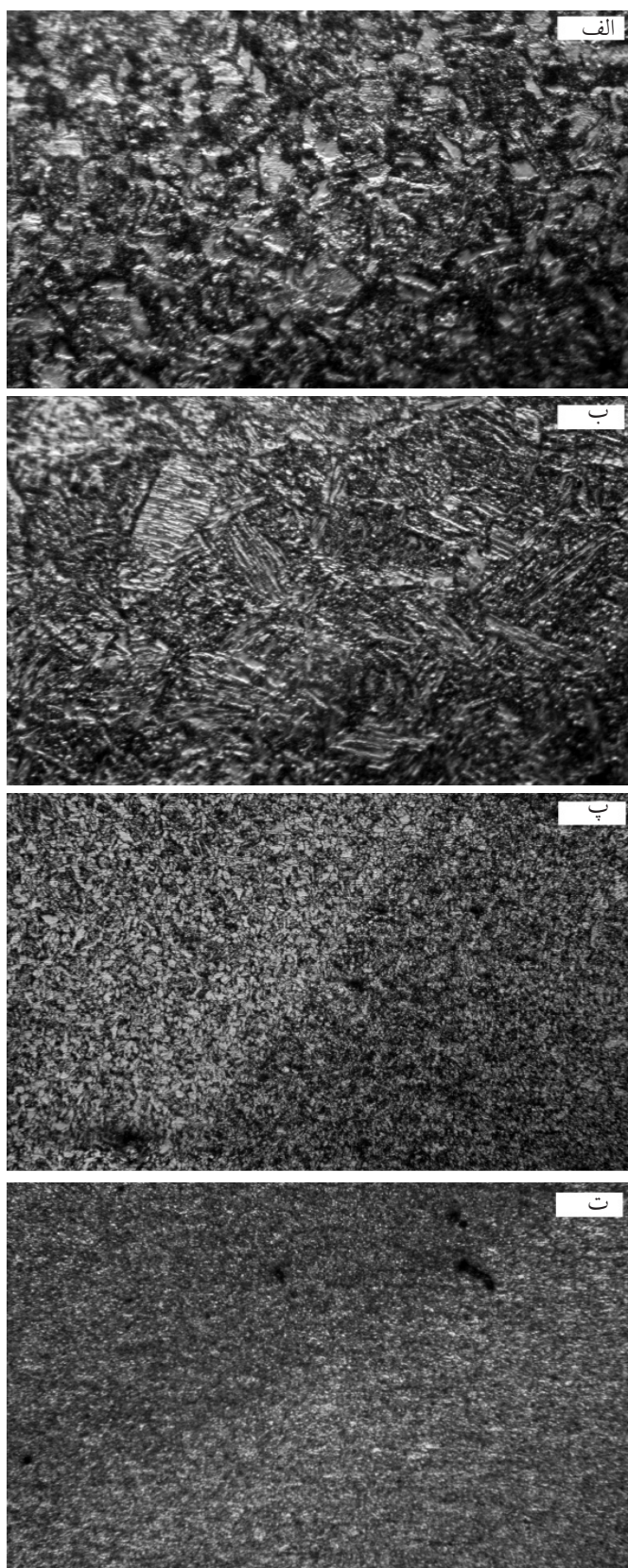
شکل ۵- عناصر شیمیایی در نواحی مختلف درز جوش، الف) کربن، سیلیسیم، گوگرد و فسفر، ب) وانادیم، مس، تیتانیوم و قلع، پ) منگنز، نیکل، کروم و مولیبدن و ت) کبالت، آلومینیوم، روی و نیوبیم



شکل ۶- درشت ساختار نواحی جوش، الف) ناحیه پاس‌های ریشه و گرم و ب) ناحیه پاس‌های پرکن و سطح

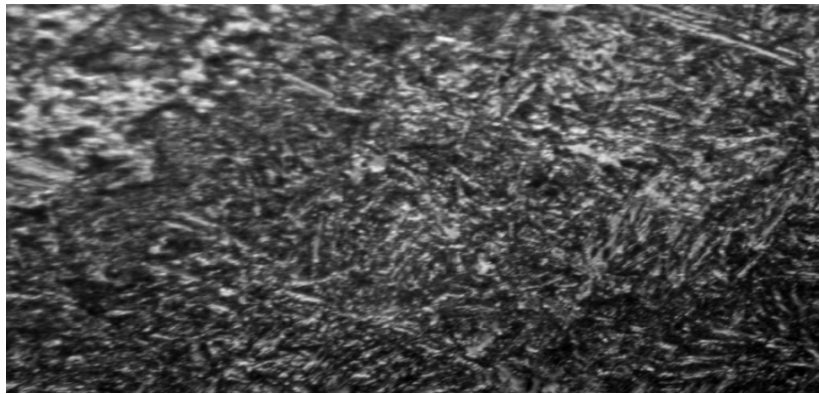


شکل ۷- حکاکی مناطق مختلف جوش به منظور مشخص کردن و تحلیل مناطق مختلف جوشی



شکل ۸- الف) ساختار در پاس ریشه جوش ب) ساختار جوش در پاس سطح پ) مرز نواحی جوش و منطقه متأثر از حرارت در پاس ریشه ت) مرز نواحی جوش و منطقه متأثر از حرارت در پاس سطح (در شکل پ و ت ناحیه جوش در سمت چپ و ناحیه متأثر از حرارت در سمت راست قرار دارد)





شکل ۹- ساختار تیغه‌ای گرده جوش در بزرگ‌نمایی ۵۰۰

شده است. در مرکز منطقه جوش میزان این تنش بیش از ۶۰٪ استحکام تسلیم درز جوش است. با توجه به صلبیت و درجه مهار بالای مناطق اطراف جوش، انتظار می‌رفت که میزان این تنش به استحکام تسلیم درز جوش نزدیک‌تر باشد. این اختلاف را می‌توان به پدید آمدن بیش از ۷۵٪ فاز مارتنزیت تمپر نشده<sup>۳</sup> در پاس نهایی جوش نسبت داد. با توجه به سیکل حرارتی شدید، وجود ساختار مارتنزیت درشت دانه شدن ساختار فولاد در این ناحیه اجتناب‌ناپذیر است. در فواصل بیشتر از مرکز درز جوش، میزان تنش پسماند به حالت کششی درآمده است. آزمون ارزیابی تنش پسماند در جوش سر به سر لوله توسط لگات در فولاد X-65 و با قطر تقریبی نصف این مقدار انجام شده است [۱۵]. نتایج این مرجع در حدود ۲۰٪ با نتایج این مطالعه متفاوت است که با توجه به تفاوت قطر لوله و متغیرهای جوش کاری کاملاً طبیعی به نظر می‌رسد. جوش سطح خارجی لوله در راستای عمود بر آن تحت دو اثر هم‌زمان پیچیدگی زاویه‌ای و انقباض طولی جوش قرار می‌گیرد. تغییر شکل زاویه‌ای تمایل به کشیدن سطح خارجی جوش دارد که متقابل با انقباض طولی قرار می‌گیرد و تمایل به کشیدن جوش در داخل لوله دارد. بنابراین انتظار می‌رود که این تنش‌ها تقریباً برابر صفر بر روی مرکز درز جوش باشند. وجود تنش فشاری در این ناحیه را باید ناشی از وجود فاز مارتنزیت دانست. این میزان با افزایش فاصله از منطقه جوش یک روند تدریجی را دنبال کرده و کرنش سنج در فاصله ۲۰ mm از لبه جوش، بیشترین میزان تنش پسماند کششی محوری را برابر ۱۳۷ MPq ثبت می‌نماید.

1. Zwick  
2. Roell/Amsdler pk 450  
3. Untempered Martensite

### کشش

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی فولاد، آزمون کشش بر روی نمونه تخت عمود بر درز جوش محیطی و نمونه گرد از درز جوش در راستای محیطی با استفاده از ماشین آزمایشگاهی زوئیک<sup>۱</sup> با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت کشش ۱۰ mm/min بر دقیقه بر اساس استاندارد EN 895, ASTM E8M انجام گردید. همچنین گسست در نمونه تخت (عمود بر درز جوش محیطی) منطقه درز جوش اتفاق نیفتاده است. از نتایج شکل ۱۰ برای استخراج خواص ماده جهت تبدیل کرنش‌های آزاد شده به تنش استفاده می‌شود. جهت مقایسه درصد تنش پسماند به استحکام سازه و همچنین چقرمگی مناطق جوش و فولاد پایه، نتایج آزمون کشش به صورت شکل ۱۱ ترسیم گردید.

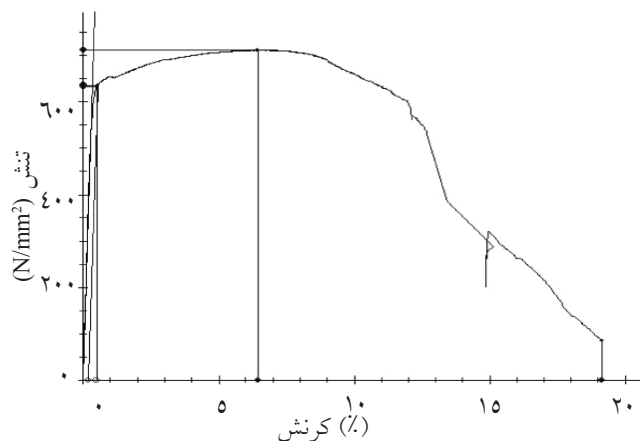
### ضربه شاری

به‌منظور تعیین مقاومت فولاد در برابر ضربه، آزمون شاری با ضخامت کامل ۱۰ mm و با قرار دادن شیار در سه ناحیه جوش، متأثر از حرارت و فولاد پایه توسط ماشین آزمایشگاهی<sup>۲</sup> با ظرفیت ۴۵۰ J مطابق با استاندارد EN 875 انجام شد. نمودار نتایج آزمون در شکل ۱۲ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که از منطقه جوش به طرف منطقه متأثر از حرارت انرژی شاری افزایش یافته است.

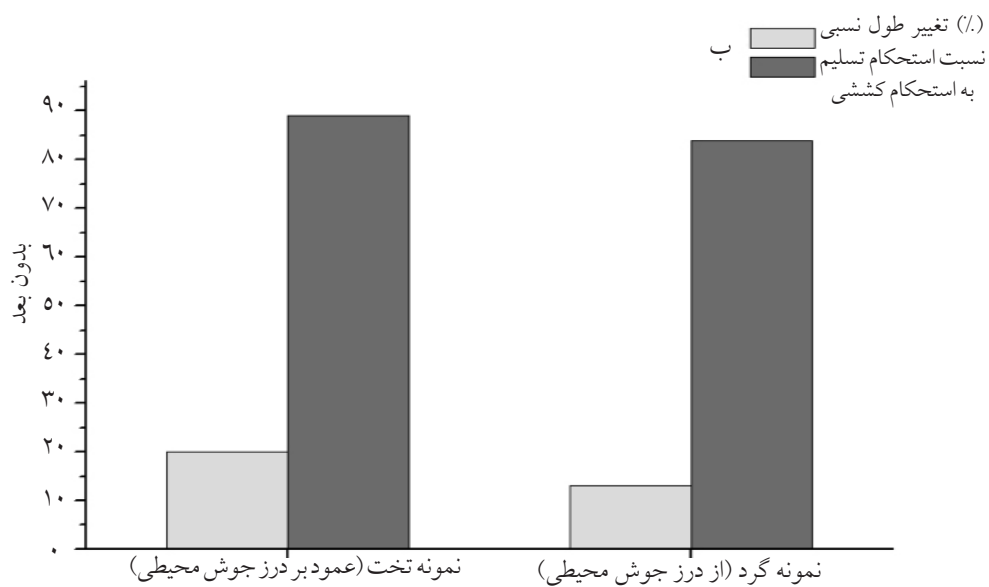
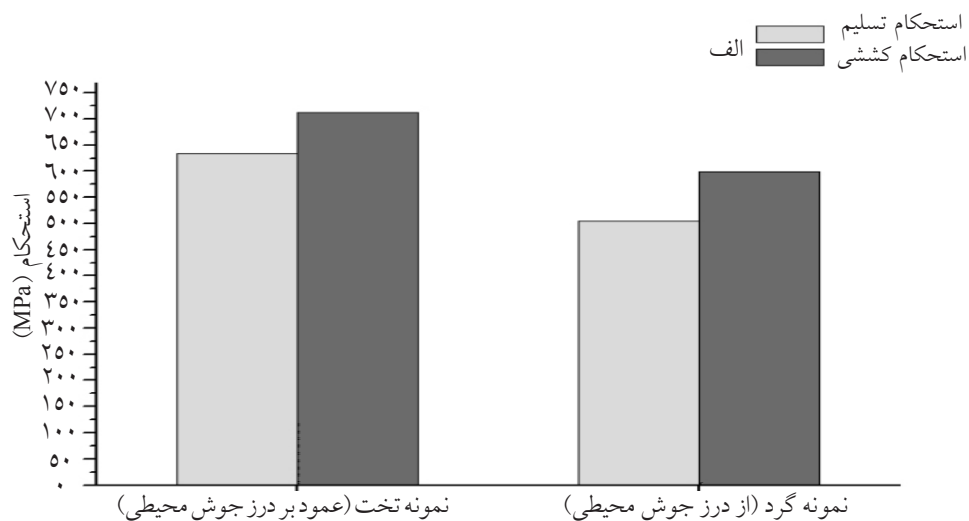
### نتایج و بحث

#### ارزیابی نتایج تنش پسماند

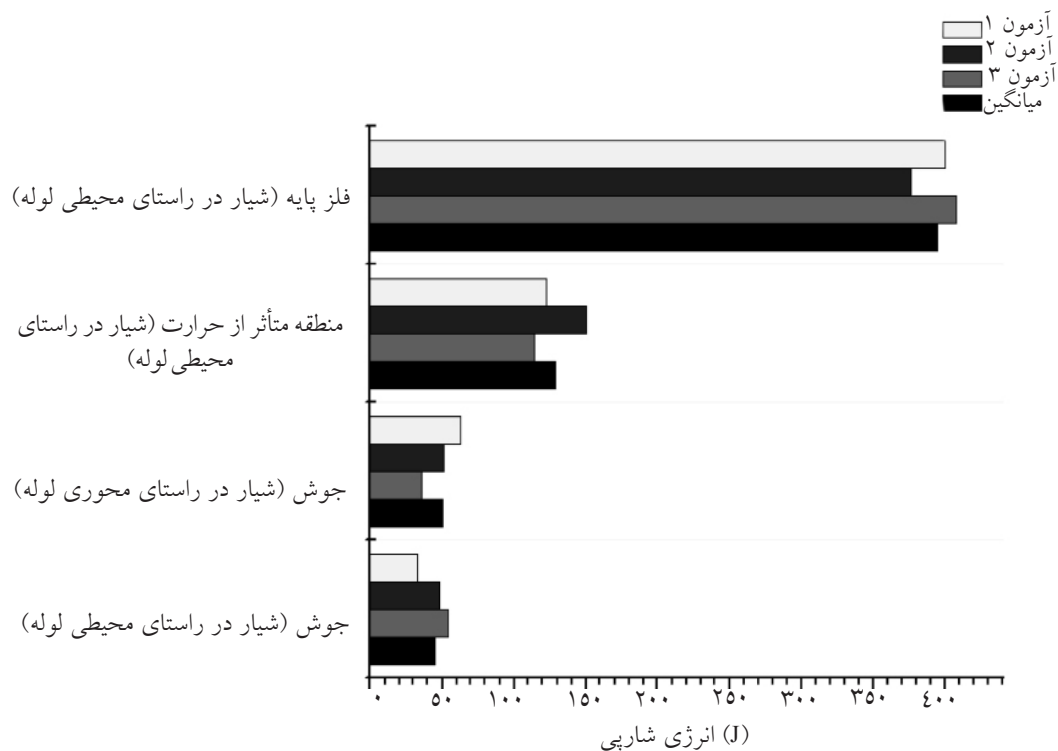
همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، در سطح خارجی لوله مقدار قابل توجهی تنش‌های پسماند کششی محیطی ایجاد



شکل ۱۰- منحنی تنش بر حسب کرنش در دمای محیط برای نمونه تخت عمود بر درز جوش محیطی



شکل ۱۱- مقایسه خواص استاتیکی در نواحی جوش و متأثر از حرارت، الف) استحکام تسلیم و کششی و ب) تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی



شکل ۱۲ - مقایسه نتایج آزمون ضربه شارپی

اندازه درز جوش، وجود فاز مارتزیت و عدم تنش گیری در پاس سطح دانست. بر خلاف تنش های پسماند محیطی (در راستای موازی جوش)، تنش های پسماند کششی محوری در سطح داخلی لوله از نظر کیفی روندی کاملاً متضاد و متقابل را نسبت به سطح خارج لوله دنبال می کند. بنابراین در منطقه متأثر از حرارت داخل لوله با تنش های پسماند محوری فشاری بالا رو به رو هستیم. روش کرنش سنجی سوراخ تنها برای ارزیابی تنش های سطحی کاربرد دارد و قادر به ارزیابی تنش های پسماند شعاعی نیست. با عنایت به اینکه این لوله جدار نازک می باشد، سطح این تنش ها قابل چشم پوشی است. از سوی دیگر با توجه به ۹ پاسه بودن جوش، هر پاس به عنوان عملیات حرارتی پاس قبلی عمل می کند. در نتیجه همین مقدار اندک نیز به صفر متمایل شده و مقادیر تنش پسماند محوری و محیطی نیز متعادل می گردند [۱۶].

#### اثر تنش پسماند بر خواص متالورژیکی و مکانیکی

##### کوانتومتری

تفاوت ترکیب شیمیایی در پاس های مختلف درز جوش در شکل ۵ مشاهده می شود. این تفاوت می تواند ناشی

جهت اندازه گیری تنش های پسماند سطح داخلی لوله در سه نقطه، آزمایش کرنش سنجی سوراخ انجام شد. در راستای موازی جوش محیطی، تنش های پسماند محیطی از نظر کیفی روندی شبیه به سطح خارج لوله را دنبال می کند، اما مقدار کمی آن به میزان قابل توجهی متفاوت است. به نظر می رسد تنش های پسماند کششی در سطح داخل لوله نسبت به خارج از لوله به میزان مشخصی افت کرده است. در مرکز ناحیه جوش، تنش پسماند کششی حدود ۴۰٪ نسبت به نقطه متناظر سطح خارجی لوله کاهش نشان می دهد. میزان تنش پسماند فشاری در منطقه متأثر از حرارت سطح داخلی لوله و در فاصله ۲۲ mm از لبه جوش، در حدود ۶ برابر نقطه حداکثر تنش پسماند فشاری بر روی سطح خارجی لوله است. نقطه سوم که در فاصله دورتر از مرکز جوش قرار دارد، دارای مقدار مشابه تنش نسبت به منطقه تقریباً متناظر سطح خارجی لوله است، اما جهت آن متفاوت بوده و به صورت فشاری است. به طور کلی می توان افت سطح تنش های پسماند محیطی در سطح داخل لوله نسبت به سطح خارج آن را ناشی از متغیرهای جوش کاری، تنش های باقیمانده از ساخت، زاویه پخ و

از جوش کاری، سطح انرژی ناشی از تنش پسماند بالاتر است. بنابراین با توجه به اینکه آزمون کرنش سنجی سوراخ در نقطه معینی صورت می‌گیرد، متفاوت بودن تنش‌های پسماند ارزیابی شده در نواحی اطراف محل آزمون کاملاً محتمل است. جهت بررسی دقیق‌تر، متالوگرافی ریزساختار نیز انجام گردید (شکل ۷). بررسی ریزساختار با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی<sup>۱</sup> و روش نقطه‌شماری<sup>۲</sup> انجام شده است. تصاویر شکل ۸ حاصل از آزمایش متالوگرافی نتایج جالبی را نمایان می‌سازد.

#### پاس ریشه

تصویر منطقه جوش پاس ریشه، ۴۴٪ فازهای تیره مارتنزیت لایه‌ای تمپر شده همراه با مقدار محدودی پرلیت و ۵۶٪ فازهای سفید رنگ شامل فریت‌های ناشی از بازپخت و مقدار محدودی کاربیدهای کمپلکس<sup>۳</sup> را نشان می‌دهد. با توجه به سرعت سرد شدن بالا در پاس ریشه، همیشه باید انتظار داشت که مقداری از این فاز تبدیل به مارتنزیت گردد. همچنین در زمان جوش کاری پاس‌های بعدی، عناصر آلیاژ محلول در فاز جامد آستنیت همچون کرم، منگنز و مولیبدن از آن خارج شده و با کربن خارج شده از شبکه کریستالی مارتنزیت، تشکیل کاربید کمپلکس می‌دهد. منطقه متأثر از حرارت جانبی پاس ریشه دارای ۶۰٪ پرلیت، مقادیر ناچیز مارتنزیت لایه‌ای و ۴۰٪ آستنیت باقی مانده و فریت پرویوتکتوئید و مقدار بسیار محدودی کاربیدهای کمپلکس است. این مقدار با منطقه جوشی تا حدودی متفاوت است. باید توجه کرد که الکتروود استفاده شده در پاس ریشه از گرید ۶۰ می‌باشد که یک خانواده از فولاد پایه، استحکام کمتر و نرمی بیشتری دارد. همچنین باید به تاثیر حل شدن عناصر مختلف در جوش در اثر حرارت بالای قوس توجه کرد.

#### پاس سطح

در منطقه پاس نهایی ۷۵٪ مناطق تیره شکل، مارتنزیت لایه‌ای و ۲۵٪ مناطق سفید رنگ، شامل آستنیت مادر و مقداری کمی کاربیدهای کمپلکس است. این منطقه از ۳ پاس موازی با سرعت جوش کاری پایین و با بزرگ‌ترین

از ترکیب شیمیایی متفاوت الکتروود، تغییر میزان درصد فولاد پایه در درز جوش و حرارت ورودی در پاس‌های مختلف جوش باشد. با افزایش فاصله از شعاع داخلی لوله، شدت جریان الکتریکی و در نتیجه حرارت ورودی افزایش پیدا می‌کند و در پاس‌های انتهایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به نظر می‌رسد تحت اثر افزایش حرارت ورودی، مقداری از عناصر میکروآلیاژی سوخته و یا از منطقه مذاب خارج شده است. کاهش عناصر میکروآلیاژی همچون تیتانیوم و وانادیم در فلز جوش نسبت به فولاد پایه و کاهش آن در پاس‌های انتهایی، سبب کاهش خواص مکانیکی به ویژه در پاس سطح و گرده جوش می‌شود. همچنین در منطقه جوش نسبت به فولاد پایه، میزان درصد کربن به شدت افزایش یافته است. این افزایش کربن می‌تواند کاهش استحکام ناشی از افت عناصر میکروآلیاژی را جبران نماید، اما از سوی دیگر باعث تردتر شدن سازه و از بین رفتن خصوصیات ویژه این نوع فولادها می‌گردد. در صورتی که از عملیات حرارتی بعد از جوش کاری استفاده نشود، افزایش میزان کربن در منطقه جوش سبب ایجاد مارتنزیت حجیم تردتر می‌شود. پیدایش فاز مارتنزیت در مقاومت جوش نسبت به تنش‌های پسماند رفتاری متضاد دارد. این افزایش حجم از یک طرف باعث کاهش تنش‌های پسماند کششی می‌شود و از سوی دیگر مقاومت ذاتی جوش را در برابر تنش‌های پسماند به شدت کاهش می‌دهد.

#### متالوگرافی

تصاویر درشت ساختار شکل ۶ از نقاط تاریک و روشن با توزیعی غیریکنواخت تشکیل شده است. این نواحی نشان‌دهنده مناطق پر انرژی است که تحت اثر محلول حکاکی، میزان خوردگی بیشتری در آن اتفاق افتاده است. این انرژی می‌تواند ترکیبی از انرژی ترمودینامیکی ناشی از استحاله برشی تشکیل مارتنزیت و انرژی مکانیکی ناشی از حضور تنش‌های پسماند باشد [۱۷]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مناطق نزدیک به سطح دارای توزیع یکنواخت‌تری از این مناطق است، اما میانگین سطح خوردگی بالاتر است. این مناطق دارای نرخ سرد شدن سریع‌تری بوده و احتمال افزایش مارتنزیت بیشتری در آن وجود دارد. همچنین در پاس سطح به دلیل فقدان عملیات حرارتی پس

1. ANALYSIS, CLEMEX

2. Point Count

3. M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>

۱۱- الف مشاهده می‌شود، استحکام تسلیم در منطقه جوش نسبت به منطقه متأثر از حرارت متفاوت است. بنابراین چنانچه میزان تنش پسماند در نواحی جوش و منطقه متأثر از حرارت یکسان فرض شود؛ افت استحکام و به عبارتی میزان کاهش تنش طراحی سازه در این مناطق نسبت به هم متفاوت خواهد بود. با توجه به اینکه میزان تنش پسماند کششی در مرکز درز جوش، بسیار بالا ارزیابی گردیده، افزایش پیش خور شدن استحکام سازه با اهمیت‌تر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده در شکل ۱۱- ب نسبت تنش تسلیم به استحکام کششی را در درز جوش برابر با  $0/89$  نشان می‌دهد که با استانداردهای مربوطه تطابق دارد. با توجه به اینکه در نمودار تنش- کرنش، استحکام تسلیم و نهایی در منطقه جوش (روی محور عمودی) و حداکثر ازدیاد طول نسبی (روی محور افقی) کمتر از فولاد پایه می‌باشد؛ سطح زیر این نمودار در منطقه جوشی پایین‌تر از فولاد پایه است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که میزان چقرمگی استاتیکی در منطقه جوش از فولاد پایه کمتر است.

#### آزمون ضربه

شکل ۱۲ کمترین انرژی شاری در درز جوش را برابر  $J 45$  در راستای محیطی لوله و برابر  $J 50$  در راستای طولی لوله نشان می‌دهد. این اعداد از میانگین مقادیر حداقل ارائه شده در استاندارد IPS-C-PI-270 بیشتر است و سلامت جوش را تایید می‌کند. در این آزمایش منطقه فولاد پایه بیشترین انرژی شکست را دارا می‌باشد. همچنین کمترین مقاومت به ضربه در منطقه جوش به ویژه در راستای محیطی است که کمتر بودن سطح زیر نمودار تنش- کرنش نمونه ماشین کاری شده از راستای محیطی درز جوش، کاهش چقرمگی استاتیکی را نیز تایید می‌نماید. کمترین انرژی شکست  $J 33$  است که در راستای محیطی جوش اتفاق افتاده است. با توجه به شرایط مشابه و یکسان مکان آزمون در راستاهای محیطی و محوری جوش، این نمونه‌ها در شرایط حرارتی یکسان تولید شده و دارای ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی یکسانی می‌باشند. بنابراین می‌توان این اختلاف را ناشی از وجود تنش‌های پسماند کششی محیطی دانست. تنش‌های پسماند، رفتاری مشابه تنش‌های هیدروستاتیکی دارند و با افزایش این تنش‌ها رفتار سازه

قطر الکتروود و شدت جریان بالا تشکیل شده است. با توجه به وجود سه پاس موازی، پهنای پاس محدود است. بنابراین به دلیل استفاده از ولتاژ نسبی کمتر، میزان شدت جریان باز هم افزایش یافته است. به این موارد باید نرخ سرعت سرد شدن سریع را نیز اضافه کرد. این منطقه با توجه به عمق اتصال تقریباً کامل، بیشترین میزان فروکشی حرارتی را دارا می‌باشد و با توجه به نهایی بودن پاس، پاس بعدی وجود نخواهد داشت که در نقش عملیات حرارتی و تمپرینگ ظهور نماید. منطقه متأثر حرارت جانبی پاس نهایی دارای مقدار تقریبی  $59\%$  مناطق سیاه رنگ شامل کلنی‌های پرلیت و مارتنزیت لایه‌ای و  $41\%$  فریت پریتکتوئید، آستنیت باقی مانده و مقداری کاربیدهای کمپلکس است. با توجه به سیکل حرارتی شدید این منطقه نسبت به منطقه متأثر از حرارت جانبی پاس ریشه، افزایش میزان مارتنزیت بدیهی به نظر می‌رسد [۱۸]. جهت بررسی دقیق‌تر ساختار جوش در محل ارزیابی تنش پسماند، تصاویر شکل ۹ در بزرگ‌نمایی  $500\times$  و  $1000\times$  در نزدیکی محل آزمون کرنش سنجی سوراخ مورد ارزیابی قرار گرفت. مارتنزیت لایه‌ای به همراه آستنیت مادر همراه با فریت ویدمن اشتاتن تیغه‌ای سفید رنگ در این شکل قابل ملاحظه است. این مورفولوژی تحت اثر سیکل حرارتی شدید و عدم انجام عملیات حرارتی به وجود آمده و دارای انرژی ترمودینامیکی بالایی است. با توجه به ارزیابی تنش‌های پسماند کششی بالا (انرژی مکانیکی بالا)، این ناحیه می‌تواند به عنوان یکی از محل‌های مهم در خوردگی تحت سرویس شناسایی شود.

#### آزمون کشش

از شکل ۱۰ ضریب یانگ و استحکام تسلیم واقعی جهت تبدیل کرنش‌های آزاد شده به تنش‌های پسماند، محاسبه شده است. گسست در منطقه متأثر از حرارت نشان از سلامت جوش دارد. اگر چه تنش‌های پسماند به صورت مستقیم بر خواص استاتیکی اثر نمی‌گذارند؛ اما می‌توان از نتایج آزمون کشش در ارزیابی این تنش‌ها استفاده کرد. از نسبت تنش پسماند به استحکام تسلیم واقعی، می‌توان کاهش مقاومت استاتیکی سازه ناشی از وجود تنش‌های پسماند را مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که در این شکل

۳. فاز مارتنزیت تمپر نشده مشاهده گردیده است. این فاز سبب کاهش تنش پسماند کششی از یک سو و افزایش تردی نسبی از سوی دیگر در این منطقه می‌شود. همچنین این فازها به صورت غیر تعادلی در منطقه جوش توزیع گردیده است. بنابراین میزان تنش پسماند در مناطق اطراف آزمون کرنش سنجی سوراخ می‌تواند مقداری متفاوت در نظر گرفته شود.

۴. پایین بودن نتایج آزمون کشش در جوش سبب افزایش درصد تنش پسماند نسبت به استحکام سازه شده و در نتیجه درصد بیشتری از استحکام سازه پیش خور گردیده است. همچنین در این منطقه میزان تغییر طول نسبی کاهش یافته و استحکام کششی که کاهش چقرمگی و ضربه پذیری را به دنبال دارد.

۵. مقاومت به ضربه در راستای محیطی جوش نسبت به راستای محوری کاهش بیشتری داشته است که نشان دهنده کاهش چقرمگی در این راستا تحت اثر تنش‌های پسماند کششی می‌باشد. همچنین با فاصله گرفتن از درز جوش و کاهش تنش‌های پسماند (انرژی مکانیکی) و کاهش فازهای غیر تعادلی (انرژی ترمودینامیکی)، مقاومت در برابر انرژی ضربه افزایش پیدا کرده است.

بنابراین منطقه بحرانی در راستای محیطی سطح خارجی جوش سر به سر لوله قطور انتقال گاز طبیعی ایران می‌باشد. این منطقه در بین مناطق جوشی دارای بیشترین تنش پسماند کششی، کمترین درصد عناصر میکروآلیاژی، بیشترین درصد فاز مارتنزیت، کمترین استحکام تسلیم و کمترین مقاومت به ضربه است.

### تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ همکاری موثر در کلیه مراحل جوش کاری محیطی لوله و همکاری در انجام آزمون‌های کشش و ضربه قدردانی می‌گردد.

از حالت تنش صفحه‌ای به حالت کرنش صفحه‌ای میل می‌کند سبب می‌شود چقرمگی فولاد به صورت نسبی کاهش پیدا کند. مقاومت به ضربه از منطقه جوش به منطقه متاثر از حرارت دو برابر افزایش می‌یابد و افزایش مقاومت به ضربه از منطقه متاثر از حرارت به فولاد پایه در حدود ۴۰۰٪ است.

### نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی تنش‌های پسماند در جوش سر به سر فولاد میکروآلیاژی خطوط لوله انتقال گاز را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. تنش پسماند محیطی در درز جوش محیطی به صورت کششی است و بیشترین مقدار آن در مرکز جوش سطح خارجی لوله اتفاق افتاده است. این تنش‌ها در منطقه متاثر از حرارت سطح خارجی لوله به صورت فشاری می‌باشند.

۲. روند کلی تغییرات تنش‌های پسماند محیطی در سطوح داخلی و خارجی لوله رفتاری مشابه به هم دارند.

۳. مقدار تنش‌های پسماند محوری در منطقه جوش سطوح داخل و خارج لوله نزدیک به هم است. اما با فاصله گرفتن از مرکز جوش، رفتاری معکوس نسبت به هم نشان می‌دهند.

۴. بیشترین مقدار تنش پسماند محوری در منطقه متاثر از حرارت سطوح خارجی و داخلی لوله اتفاق افتاده است. بررسی دقیق‌تر نتایج آزمون‌های متالورژیکی و مکانیکی، تحلیل مقادیر تنش‌های پسماند و بررسی اثرات آن بر کارایی سازه جوش کاری شده را فراهم می‌سازد. مه‌ترین نتایج آزمون‌های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش و ضربه را می‌توان به ترتیب به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. عناصر استحکام دهنده میکروآلیاژی در درز جوش نسبت به فولاد پایه کاهش یافته است و این روند کاهشی از پاس ریشه به پاس نهایی ادامه دارد. همچنین میزان درصد کربن در منطقه جوش نسبت به فولاد پایه به شدت افزایش یافته است. افزایش کربن علاوه بر تردی نسبی، سبب افزایش حجم کریستالی مارتنزیت و در نتیجه کاهش تنش پسماند کششی می‌گردد.

۲. در منطقه جوش به ویژه در پاس سطح ۷۵٪

## مراجع

- [۱]. مقدمه کتاب خلاصه مقالات چهارمین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز، شرکت ملی گاز، ایران، ۱۳۹۱.
- [2]. *New Joining Technology for Metal Pipe in the Construction Industry*, Construction Industry Institute & Break-through Strategy Committee, Texas, 2003.
- [۳]. کوکی ا. ح.، تکنولوژی جوشکاری، نشر آزاده، ۱۳۸۸.
- [۴]. حائری م.، بررسی متالورژیک عیوب در جوش، نشر کیانا، ۱۳۸۳.
- [۵]. سبک روح م.، بررسی علل ترک خوردگی جوش در لوله‌های حامل سیال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، ایران، ۱۳۸۷.
- [۶]. فراهانی م.، بررسی طراحی اتصال جوش بر بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، ۱۳۸۵.
- [7]. Bouchard R. P. J., "Validated Residual Stress Profiles for Fracture Assessments of Stainless Steel Pipe Girth Welds", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, pp. 195-222, 2007.
- [8]. Leggatt R. H., "Residual Stresses in Welded Structures", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 144-151, 2008.
- [9]. Kandil F., Lord J., Fry A. and Grant P., *Measurement of Residual Stress in Components*, A Review of Residual Stress Measurement Methods, NPL Report, 2001.
- [10] *Handbook of Measurement of Residual Stress*, Society for Experimental Mechanics, 1th edition, pp. 2-7, 1996.
- [11]. *International Welding Engineer*, Course According to IIW Guideline IAB-252-07, SLV, Duisburg, 2006.
- [12]. Gladman T., *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*, Institute of Materials, London, 1997.
- [۱۳]. فروزان م.، ر.، حیدری ع. و گلستانه س. ج.، شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند جوشکاری زیرپودری لوله‌های API 5L-X70 با درز جوش مستقیم مورد استفاده در صنایع نفت و گاز، استقلال، دوره ۲۸، شماره ۱، ۱۳۸۸.
- [14]. *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, ASTM Standard E 837.
- [15]. Leggatt R. H., "Residual Stresses at Girth Welds in Pipes, *Welding in Energy Related Projects*", Pergamon, pp. 429-40, 1984.
- [۱۶]. سبک روح، م.، هاشمی، س. ح. و فراهانی م.، تعیین تجربی مقدار و توزیع تنش‌های پسماند در جوش چند پاسه محیطی لوله فولادی ترمومکانیکال، پذیرش برای چاپ در سال ۱۳۹۳ نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، دانشگاه فردوسی.
- [۱۷]. سبک روح م.، بررسی تنش‌های پسماند در جوش سر به سر خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران، پایان نامه دکتری، دانشگاه بیرجند، ایران، ۱۳۹۲.
- [۱۸]. هاشمی س. ح.، سبک روح م. و فراهانی م.، بررسی جوش پذیری اتصال چند پاسه محیطی در لوله فولادی ترمومکانیکال، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، ۱۳۹۲.