

# ارزیابی اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت استاتیکی و چقرمگی دینامیکی ناحیه جوش چند گذر محیطی در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بر اساس معیارهای جدید طراحی

مجید سبک روح<sup>۱\*</sup>، سید حجت هاشمی<sup>۲</sup> و محمدرضا فراهانی<sup>۳</sup>

۱- گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، ایران

۲- گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران

۳- دانشکده مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۵

## چکیده

نتایج آزمون کشش در ناحیه جوش و ناحیه متاثر از حرارت سازه‌های جوشکاری شده، به دلیل وجود ریز ساختارهای متنوع متالورژیکی در نقاط بسیار نزدیک به هم معتبر نمی‌باشد. بهترین روش تخمین مقاومت ماده در این مناطق، تبدیل نتایج آزمون سختی به مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی به وسیله روابط تجربی می‌باشد. در این صورت میزان کاهش تنش طراحی سازه ناشی از تنش‌های پسماند جوشکاری با دقت بیشتری لحاظ می‌شود. در این مطالعه سختی سنجی در نواحی مختلف جوش سر به سر لوله فولادی انتقال گاز طبیعی ایران انجام گرفت. از ترکیب نتایج آزمون‌های سختی سنجی و تنش‌های پسماند (ارزیابی شده به وسیله آزمون کرنش سنجی سوراخ) در نقاط مشخص، معیارهای بی بعد  $R_{ya}$  (حاصل از تقسیم متوسط تنش پسماند بر مقاومت تسلیم سازه)،  $R_{u2}$  (حاصل از تقسیم اختلاف تنش پسماند بر مقاومت نهایی سازه) و  $R_{u3}$  (بر اساس نسبت اختلاف تنش‌های پسماند حداکثر و حداقل سه بعدی بر مقاومت نهایی سازه) جهت تعیین رفتار مکانیکی واقعی سازه برای اولین بار ارائه گردید. شناسایی حداکثر معیار  $R_{ya}$  و حالت بحرانی کاهش مقاومت استاتیکی (کاهش تنش طراحی) در مرکز درز جوش سطح خارجی لوله با نتایج آزمون کشش مطابقت دارد. منطبق بودن منطقه گسست در آزمون کشش با ناحیه حداکثر معیار  $R_{ym}$ ، بیان کننده اثر تنش‌های پسماند بر رفتار استاتیکی (علاوه بر ماهیت هیدرواستاتیک تنش‌های پسماند) سازه می‌باشد. کاهش شدید معیار  $R_{u2}$  با روند تصاعدی کاهش مقاومت به ضربه در راستای عمود بر درز جوش تطابق دارد. به نظر می‌رسد با توجه به اثر تنش‌های صفحه‌ای (در لوله‌های جدار نازک)، پارامتر  $R_{u2}$  در ارزیابی مقاومت فولاد به ضربه معیار مناسب‌تری از پارامتر  $R_{u3}$  باشد.

کلمات کلیدی: جوش محیطی، خواص مکانیکی، معیارهای بی بعد  $R_{u3}$  و  $R_{u2}$ ،  $R_{ym}$ ،  $R_{ya}$

## مقدمه

ارزیابی تنش‌های پسماند با استفاده از تفرق اشعه ایکس پرداختند [۷]. این تحقیق نشان داد که حداکثر تنش‌های پسماند در راستای موازی منطقه متأثر از حرارت<sup>۲</sup> کنار جوش اتفاق می‌افتد. پادا و همکارانش تنش پسماند در جوش سر به سر (محیطی) لوله فولادی فرتی- مارتزیتی گرید P91 را با قطر ۳۲۴ و ضخامت ۲۵/۴ mm به وسیله آزمون تفرق نوترون مورد بررسی قرار دادند [۸]. نتایج آنها نشان داد که تنش پسماند کششی حداکثر در ناحیه مرزی منطقه متأثر از حرارت اتفاق افتاده است.

با توجه به اهمیت موضوع تنش پسماند و با عنایت به حساسیت ویژه جوش سر به سر لوله‌های فولادی، در این پژوهش برای اولین بار جوش محیطی لوله فولادی گرید ایکس ۷۰ (با قطر خارجی ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ) مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) به منظور بررسی تجربی ارتباط سختی با ریزساختار و خواص مکانیکی مطالعه شده است. همچنین در این طراحی معیارهای جدید جهت ارزیابی اثر واقعی تنش‌های پسماند بر رفتار استاتیکی و دینامیکی ناحیه جوش چند پاسه محیطی لوله فولادی ترمومکانیکال در نواحی جوش، متأثر از حرارت و فولاد پایه بررسی شده است.

## آزمایش

جوشکاری (بر اساس دستورالعمل ویژه جوشکاری<sup>۳</sup>) بر روی دو قطعه ۵۰ cm لوله فولادی اسپیرال ایکس ۷۰ با قطر ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ بر اساس استاندارد<sup>۴</sup> 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 جوشکاری قوسی الکتروود دستی پوشش‌دار<sup>۵</sup> صورت گرفت. جدول (۱) آنالیز شیمیایی لوله آزمایش را نشان می‌دهد.

بررسی رفتار حین سرویس خطوط لوله انتقال گاز در حوزه تنش‌های بزرگ پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری، مستلزم شناسایی توزیع این تنش‌ها و تاثیر آن بر رفتار متالورژیکی و مکانیکی می‌باشد. آزمون‌های کرنش سنجی سوراخ مرسوم‌ترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است و برای تعیین تنش پسماند در نزدیک سطح جسم به کار می‌رود. این روش شامل نصب کرنش سنج، ایجاد یک سوراخ در نزدیکی کرنش سنج‌ها و اندازه‌گیری کرنش آزاد شده است [۱]. در بررسی یکپارچگی اتصال جوشی سر به سر لوله در صنعت انتقال گاز طبیعی و به منظور رسیدن به نتایج با اطمینان بالا، لازم است خصوصیات فولاد در مورد استفاده کاملاً مشخص شده و مورد بررسی گردد. این موضوع با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر مقاومت<sup>۱</sup> که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری دارد [۲]. لوله فولادی مورد آزمایش از نوع درز جوش مارپیچ (اسپیرال) می‌باشد. نمونه‌های لوله تولید شده هم اکنون در خطوط لوله پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران به کار می‌رود [۳].

بررسی عملیات جوشکاری تا حد زیادی بر مبنای اطلاعات به دست آمده از روش‌های آزمون و خطا انجام می‌گیرد. این نتایج در تحلیل رفتارهای مکانیکی و متالورژیکی جوش به ویژه در مبحث تنش‌های پسماند استفاده می‌شود [۴]. با توجه به عوامل تاثیرگذار و همچنین وسعت کاربرد جوش سر به سر لوله، پژوهش‌های مختلفی برای ارزیابی خصوصیات متالورژیکی و مکانیکی صورت گرفته است. هاموند و همکارانش در مطالعه‌ای جامع به بحث و بررسی خصوصیات و شرایط جوش سر به سر خطوط انتقال گاز پرداختند [۵]. این بررسی در پژوهش دیگری توسط همین تیم با محوریت هدسون ادامه یافت [۶]. رابین و همکارانش در خطوط لوله ایکس ۷۰ با قطر ۱۰۱۶ و ضخامت ۲۶/۲ mm با آگاهی از خواص مکانیکی و متالورژیکی فولاد به

1. HSLA (High Strength Low Alloy) Steel

2. HAZ

3. WPS (Welding Procedure Specification)

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

5. SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

جدول ۱ درصد عناصر وزنی موجود در ترکیب شیمیایی لوله فولادی مورد آزمایش [۳].

Al	V	Ti	Nb	N	Mo	Cu	Ca	B	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	نام عنصر
۰/۰۴۲	۰/۰۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۴	۰/۰۱	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۱	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۲	۱/۶	۰/۱۹	۰/۰۵۳	درصد وزنی

آمده در مناطق مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، فازهای سخت در پاس‌های انتهایی درصد بیشتری را نسبت به پاس‌های اولیه به خود اختصاص می‌دهد. آزمون کشش بر روی نمونه تخت عمود بر درز جوش محیطی (در راستای طولی لوله) و نمونه گرد از درز جوش سر به سر (در راستای محیطی) بر اساس استاندارد<sup>۲</sup> انجام شد. نتایج نشان می‌دهد مطابق استاندارد نسبت مقاومت تسلیم به مقاومت کششی کمتر از ۰/۹ است. همچنین گسست در منطقه درز جوش اتفاق نیفتاده است (جدول ۳). آزمون شاری با ضخامت کامل ۱۰ mm در سه ناحیه جوش، متاثر از حرارت و فلز پایه مطابق با استاندارد<sup>۴</sup> انجام گردید. نتایج آزمون‌های ضربه نشان می‌دهد که با حرکت از سمت فلز پایه به سوی مرکز درز جوش، انرژی شاری کاهش یافته است (جدول ۴) [۴].

سختی سنجی در مقطع عمود بر درز جوش محیطی با استفاده از روش برینل انجام گرفت. شکل ۳ محل قرارگیری نقاط آزمایش را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با استاندارد و به دست آوردن مقاومت تسلیم، واحد سختی از برینیل به ویکرز تبدیل شد. این آزمایش مطابق با استاندارد<sup>۵</sup> سختی جوش را در حد مجاز و زیر ۳۴۸ ویکرز نشان می‌دهد.

در این مطالعه ابتدا آزمایش کرنش سنجی سوراخ طبق استاندارد<sup>۱</sup> بر روی سطح خارجی لوله به ترتیب در منطقه متاثر از حرارت و در فواصل ۰،۴، ۱،۰، ۲،۲ و ۴۳ mm از لبه درز جوش و همچنین بر روی پاس وسط و کنار درز جوش انجام شد. سپس این آزمایش در شعاع داخلی لوله در سه نقطه بر روی درز جوش و منطقه متاثر از حرارت در فواصل ۲۲ و ۵۵ mm از لبه جوش صورت گرفت. شکل ۱ نقاط ارزیابی تنش‌های پسماند بر روی سطوح خارجی و داخلی لوله را نشان می‌دهد [۴]. در شکل ۲ تنش‌های پسماند محیطی و محوری سطوح داخلی و خارجی لوله رسم شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، مقدار حداکثر تنش و سطح متوسط توزیع تنش‌ها در سطح خارجی لوله بیشتر از سطح داخلی آن است.

به منظور بررسی خواص شیمیایی در هر پاس و منطقه متاثر از حرارت، آنالیز شیمیایی در هر منطقه توسط دستگاه کوانتومتر بر اساس استاندارد<sup>۲</sup> به دست آمده است. لازم به ذکر است که درصد عناصر میکرو آلیاژی به ویژه وانادیم با افزایش تعداد پاس‌ها و فاصله از شعاع داخلی، کاهش می‌یابد. کربن نیز در منطقه جوش در حدود ۳ الی ۴ برابر فلز پایه می‌باشد و در منطقه جوش از پاس ریشه به طرف پاس نهایی روند کاهشی داشته است. همچنین از آزمایش متالوگرافی بر اساس استاندارد جهت بررسی درشت ساختار و ریز ساختار مناطق مختلف درز جوش استفاده گردید و مشخص شد که مناطق مختلف جوش دارای خوردگی بیشتر، سطح انرژی بالاتری دارند [۴]. درصد فازهای به دست

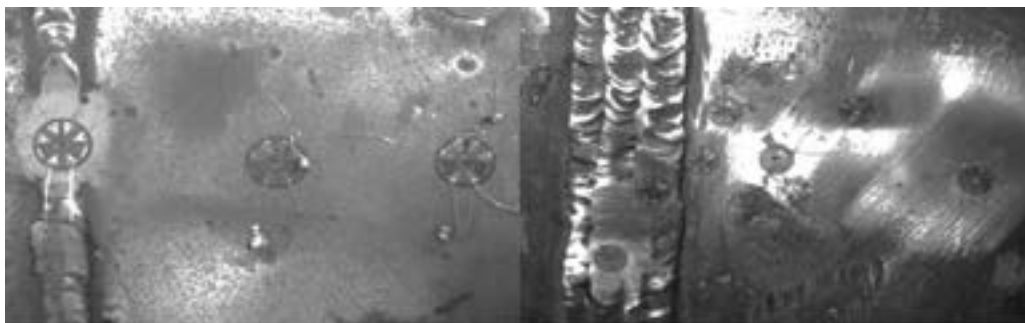
1. ASTM E 837

2. ASTM A415-08

3. EN 895, ASTM E 8M

4. EN 875

5. ASTM E10



شکل ۱ محل آزمایش کرنش سنجی سوراخ روی الف) سطح خارجی لوله و ب) سطح داخلی لوله [۴].

جدول ۲ درصد فازهای به دست آمده در مناطق مختلف [۴].

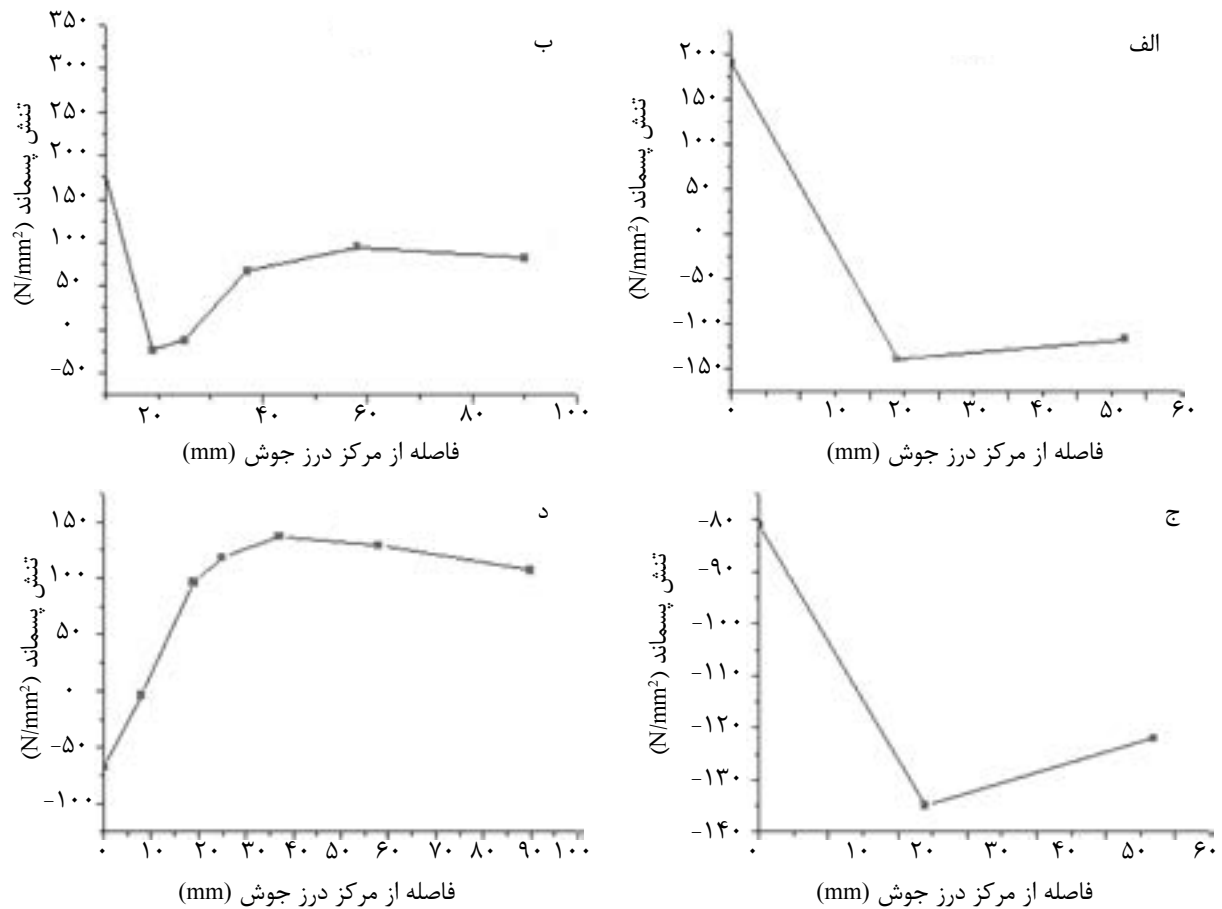
پاس	فاز های تیره: مارتنزیت و پرلیت (%)	فازهای روشن: آستنیت، فریت و کاربید کمپلکس (%)
ریشه	۴۴	۵۶
مناطق اطراف ریشه	۶۰	۴۰
گرم	۶۵	۳۵
مناطق اطراف گرم	۳۳	۶۷
پرکن	۶۲	۳۸
مناطق اطراف پرکن	۴۷	۵۳
سطح	۷۵	۲۵
مناطق اطراف سطح	۵۹	۴۱

جدول ۳ نتایج آزمون کشش [۴].

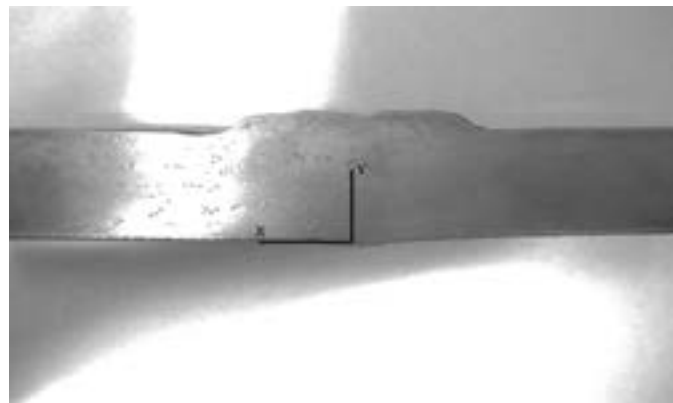
نمونه آزمایش	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	درصد تغییر طول نسبی	نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی
تخت (عمود بر ناحیه جوش محیطی)	۶۳۳	۷۱۲	۲۰	۰/۸۹
گرد (از ناحیه جوش محیطی)	۵۰۵	۵۹۹	۱۳	۰/۸۴

جدول ۴ نتایج آزمون ضربه شاری [۴].

نمونه آزمایش	انرژی شاری، آزمایش اول (J)	انرژی شاری، آزمایش دوم (J)	انرژی شاری، آزمایش سوم (J)	انرژی شاری (J) میانگین
جوش (شیار در راستای محیطی لوله)	۳۳	۴۸	۵۴	۴۵
جوش (شیار در راستای محوری لوله)	۶۳	۵۱	۳۶	۵۰
منطقه متأثر از حرارت (شیار در راستای محوری لوله)	۱۲۳	۱۵۰	۱۱۴	۱۲۹
فولاد پایه (شیار در راستای محیطی لوله)	۴۰۰	۳۷۶	۴۰۸	۳۹۵



شکل ۲ توزیع تنش‌های پسماند در سطوح خارجی و داخلی لوله الف) محیطی داخلی لوله، ب) محیطی خارج لوله، ج) محوری داخلی لوله و د) محوری خارج لوله [۴].



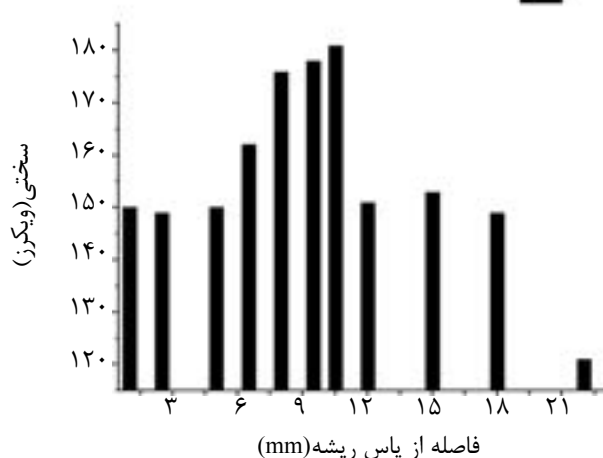
شکل ۳ مقطع مورد بررسی درز آزمایش سختی سنجی.

جوش نیز دارای کمترین میزان سختی است. مقاومت استاتیکی در مناطق مختلف جوش و فلز پایه توسط روابط زیر به مقاومت تسلیم و مقاومت کششی نهایی تبدیل می‌شود [۹ و ۱۰]:

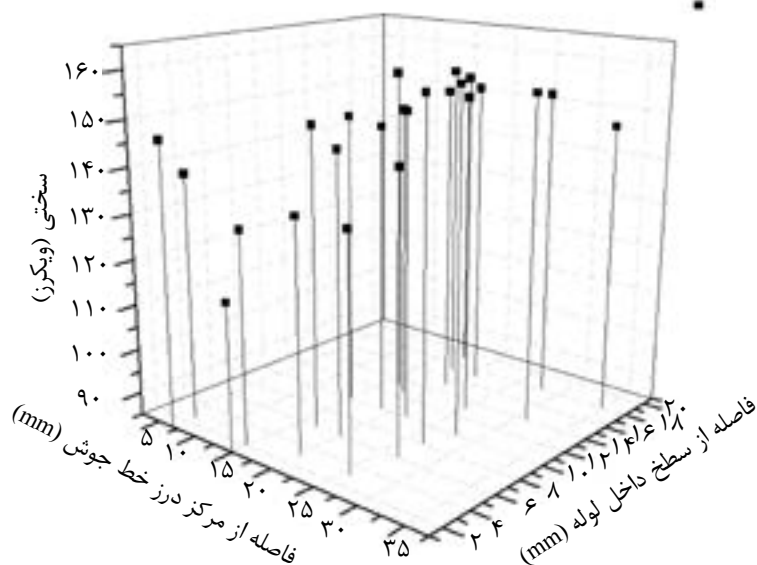
$$YS = 2HV + 105 \quad (1)$$

$$UTS = 3.45BHN \quad (2)$$

همچنین اختلاف سختی جوش و فلز پایه مطابق با استاندارد کمتر از ۱۰۰ ویکرز می‌باشد. شکل‌های (۴ و ۵) به ترتیب میزان سختی در نواحی مختلف جوش و متاثر از حرارت را بر حسب معیار سختی برینل نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در بین مناطق مختلف درز جوش، پاس پرکن دارای بیشترین میزان سختی و منطقه متاثر از حرارت کنار



شکل ۴ نمودار سختی سنجی درز مناطق مختلف جوش.



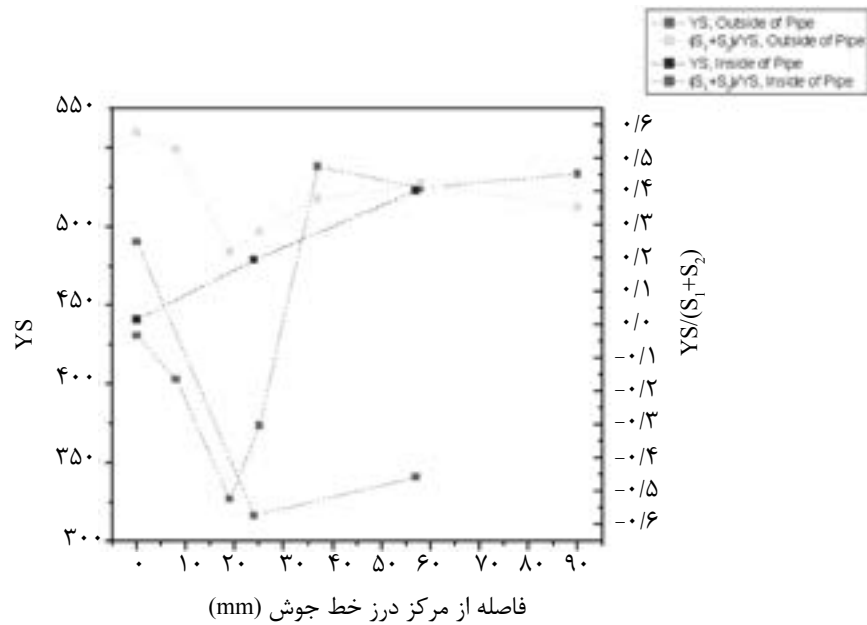
شکل ۵ نمودار سختی سنجی درز مناطق اطراف جوش.

سختی است.

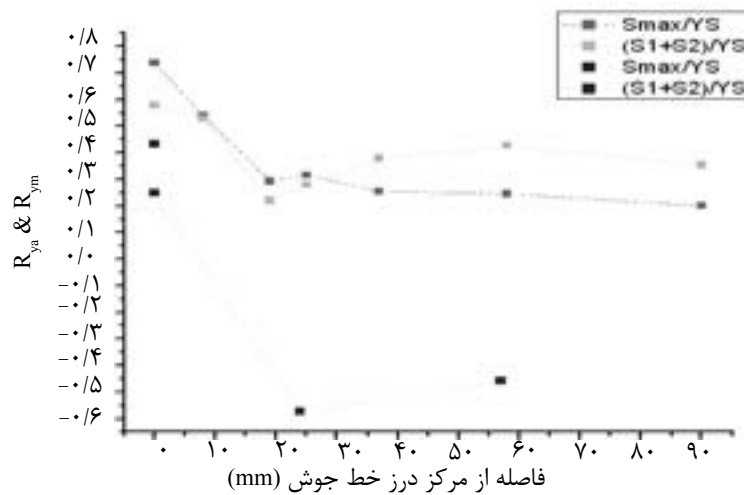
در شکل ۷ به منظور مقایسه بهتر اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت استاتیکی سازه، عدد بی‌بعد  $R_{ym}$  (نسبت تنش پسماند کششی حداکثر بر مقاومت تسلیم) و  $R_{ya}$  در سطوح داخلی و خارجی لوله ترسیم گردیده است.

سپس جهت برآورد پیش‌خور شدن مقاومت استاتیکی سازه و مقاومت به ضربه در مناطق مختلف، (شکل‌های ۶ الی ۹) رسم گردید. شکل ۶ نمودار تغییر مقاومت تسلیم و عدد بی‌بعد  $R_{ya}$  (نسبت جمع تنش‌های پسماند سطحی بر مقاومت تسلیم) در سطوح داخلی و خارجی لوله را با فاصله گرفتن از درز جوش نشان می‌دهد. این عدد بی‌بعد معرف ارزیابی نسبت میانگین تنش‌های پسماند سطحی بر مقاومت تسلیم به‌دست آمده از آزمون

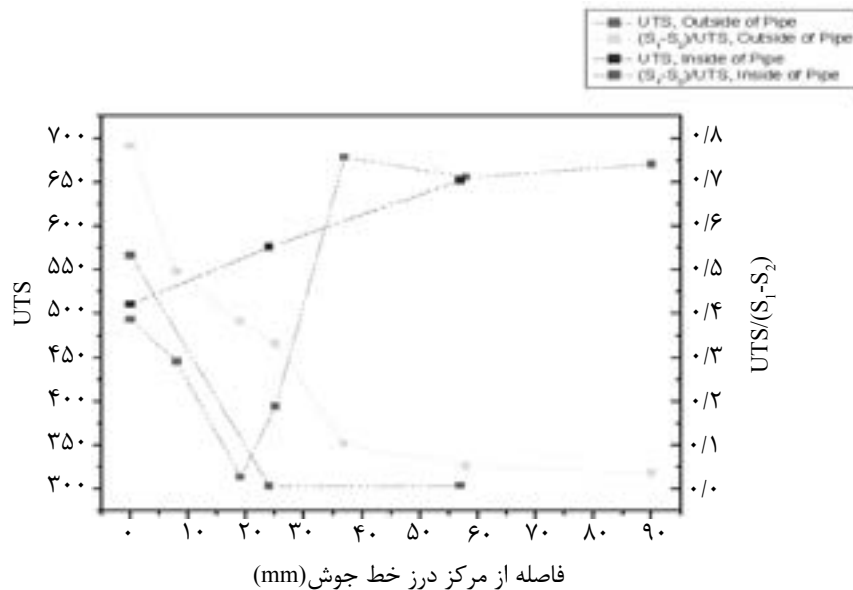
1. Residual Stress, Yield Strength, Average  
2. Residual Stress, Yield Strength, Maximum



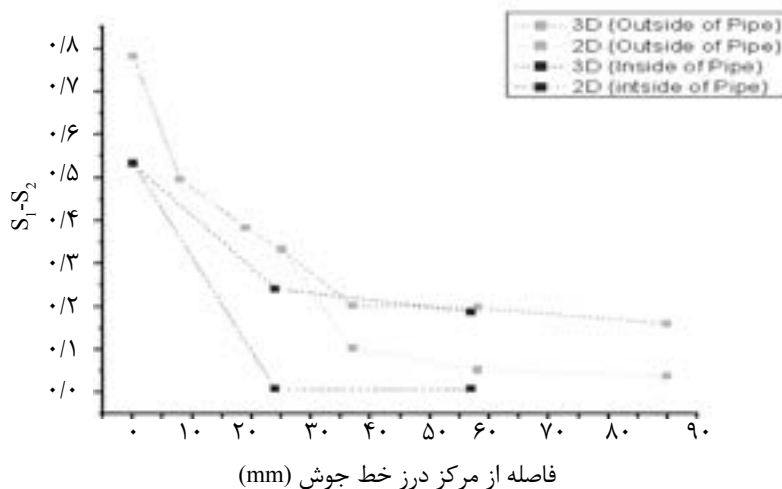
شکل ۶ تغییر مقاومت تسلیم و نسبت جمع تنش‌های پسماند سطحی بر مقاومت تسلیم در سطوح داخلی و خارجی لوله.



شکل ۷ مقایسه اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت استاتیکی سازه در سطوح داخلی و خارجی لوله.



شکل ۸ تغییر مقاومت نهایی و نسبت تفاضل تنش‌های پسماند سطحی بر مقاومت نهایی در سطوح داخلی و خارجی لوله.



شکل ۹ مقایسه اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت به ضربه در سطوح داخلی و خارجی لوله.

### بحث و بررسی

#### ارتباط نتایج سختی‌سنجی با نتایج آزمون‌های کوانتومتری و

#### متالوگرافی

همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، میزان سختی از پاس ریشه به طرف پاس‌های بعدی افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از عواملی همچون افزایش قطر الکتروود، شدت جریان الکتریکی، سرعت جوشکار و به صورت مجموع حرارت ورودی باشد. همچنین با افزایش تعداد پاس‌ها، تعداد جهات و نرخ فروکش حرارتی هم تغییر می‌نماید. سختی از نقطه‌ای به فاصله ۵ mm از پاس ریشه به نقطه بعدی در فاصله ۷ mm، دارای نرخ رشد قابل ملاحظه‌ای است که ناشی از افزایش گرید الکتروود ۶۰۱۰ از پاس اولیه به ۸۰۱۰ در پاس بعدی است. همچنین در فاصله ۱۲ mm از پاس ریشه، افت شدید ۱۷٪ در کاهش سختی دیده می‌شود. در این منطقه عرض منطقه امتزاج جوشکاری به صورت ناپیوسته و ناگهانی با افزایش

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شیب نمودار  $R_{ym}$  نسبت به  $R_{ya}$  در منطقه جوش تندتر است.

در داخل لوله تنها در یک نقطه محل، تنش پسماند محیطی به صورت کششی است. شکل (۸) تغییر مقاومت نهایی و عدد بی‌بعد  $R_{u2}^1$  در سطوح داخلی و خارجی لوله را با فاصله گرفتن از درز جوش نشان می‌دهد. این عدد بی‌بعد معرف نسبت تفاضل تنش‌های پسماند دو بعدی بر مقاومت نهایی به دست آمده از آزمون سختی است. به منظور مقایسه بهتر اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت به ضربه سازه، عدد بی‌بعد  $R_{u3}^2$  (نسبت تفاضل تنش‌های سه بعدی بر مقاومت نهایی) با  $R_{u2}$  در سطوح داخلی و خارجی لوله در شکل ۹ رسم شده است. در درز جوش و مناطق اطراف جوش، نمودارهای المان‌های دو بعدی و سه بعدی بر هم منطبق است و با فاصله گرفتن بیشتر از درز جوش نمودار دو بعدی کاهش بیشتری از خود نشان می‌دهد.

1. Residual Stress, Ultimate Strength, Difference

2. Residual Stress, Yield Strength, Maximum



یکنواخت تشکیل شده است [۴]. این نواحی نشان دهنده مناطق پر انرژی است که تحت اثر محلول حکاکی (در شرایط یکسان) 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. جالب است که در نقاط نزدیک به هم (که در شرایط پاسی یکسانی ایجاد گردیده)، نیز این حالت مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه آزمون سختی سنجی در نقطه معینی صورت می‌گیرد، متفاوت بودن نتایج آن در نواحی اطراف محل آزمون کاملاً محتمل است (جدول ۲).

استفاده از نتایج آزمون سختی جهت تخمین مقاومت در نواحی جوش و متاثر از حرارت، اهمیت ویژه‌ای دارد. در فولاد پایه با توجه به ساختار تقریباً همگون متالورژیکی، استفاده از آزمون کشش برای به دست آوردن مقاومت‌های تسلیم و کششی کافی است. در نواحی جوش و متاثر از حرارت، ساختارها و فازهای متنوعی با مقاومت ذاتی متفاوت وجود دارد. استفاده از آزمون‌های کشش با نمونه‌های کوچک‌تر نیز به دلیل تفاوت ساختارهای متالورژیکی در نقاط بسیار نزدیک به یکدیگر، فایده زیادی نخواهد داشت. بنابراین، در این نواحی آزمون کشش تنها حداقل مقاومت (در نواحی و فازهای متفاوت) را مشخص می‌نماید. با این توصیف تبدیل نتایج آزمون سختی سنجی به مقاومت‌های تسلیم و نهایی (با استفاده از روابط مشخص) بهترین روش تخمین مقاومت ماده در نواحی مختلف جوش و متاثر از حرارت می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشخص است، در ناحیه متاثر از حرارت کنار جوش، کمترین مقاومت تسلیم دیده می‌شود. کاهش مقاومت تسلیم در این ناحیه را می‌توان به وجود سیکل‌های حرارتی شدید و از بین رفتن شرایط اولیه مقاومت بخشی عناصر میکروآلیاژی نسبت داد. در مرکز درز جوش این مقاومت حدود ۳۰٪ نسبت به ناحیه متاثر از حرارت، بیشتر است. با اینکه این منطقه

زاویه‌ای در حدود ۳۰ درجه همراه است. با توجه به اینکه در پاس‌های نهایی از بزرگ‌ترین قطر الکتروود استفاده شده و سرعت جوشکاری به علت نهایی بودن پاس متفاوت است؛ تاثیرات عملیات حرارتی و بازیابی در این قسمت مشهودتر می‌باشد. پایین بودن میزان سختی در نقطه آخر را می‌توان به قرار گرفتن آن در منطقه گرده جوش و تفاوت در حرارت ورودی و نرخ تغییرات انتقال حرارت نسبت داد. شکل (۵) نمودار روند تغییرات سختی در منطقه متاثر از حرارت را نشان می‌دهد. در منطقه پاس ریشه در ارتفاع Y برابر ۱ mm با افزایش فاصله از منطقه جوشی (لبه درز جوش)، مقدار سختی کاهش می‌یابد. نتایج در منطقه گرم و پرکن نیز همین روند را دنبال می‌کند. دقت در بررسی نتایج سختی سنجی فواصل Y برابر ۶ و ۱۰ mm موید این ادعاست. توجه شود تغییر فاصله حداقل سختی X به علت طراحی V شکل اتصال می‌باشد و فاصله از منطقه جوشکاری (لبه درز جوش) یکسان است. هر کدام از این مناطق تحت تاثیر مکانیزم‌های حرارتی اولیه ناشی از جوشکاری در پاس مجاور و ثانویه ناشی از جوشکاری پاس بعدی و عملیات حرارتی پاس قبلی قرار گرفته‌اند. چنانچه سختی منطقه متاثر از حرارت در مناطق مجاور به پاس‌های مختلف ارزیابی گردد؛ مشاهده می‌شود که میزان سختی در مناطق اطراف پاس ریشه دارای محدوده پایین‌تری است. در این منطقه با توجه به فقدان فروکش حرارتی در جهت ضخامت لوله، حرارت تنها می‌تواند مسیر کناری را برای انتقال حرارت انتخاب کند. این میزان حرارت با توجه به سرعت جوشکاری پایین و حرارت ورودی بالا قابل توجه است. همچنین با توجه به اینکه این پاس اولین پاس جوشکاری است، بیشترین تعداد پاس و عملیات حرارتی ناشی از آن روی این منطقه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد کمترین مقدار سختی در همان منطقه‌ای قرار گرفته که گسست آزمایش کشش در آن اتفاق افتاده است. تصاویر درشت ساختار از نقاط تاریک و روشن با توزیعی غیر

بر خواص استاتیکی سازه برای اولین بار معیار  $R_{ya}$  حاصل از تقسیم متوسط تنش پسماند (به منظور وضوح بیشتر و مقایسه با معیار  $R_{ym}$  از ضریب ۰/۵ جهت تعیین متوسط تنش‌های پسماند در یک نقطه استفاده نشده است) بر مقاومت تسلیم سازه (در نقطه آزمون‌های کرنش سنجی سوراخ و سختی سنجی) طراحی گردید و منحنی آن (پس از ارزیابی در نقاط سطوح داخل و خارج لوله) در شکل (۶) ترسیم شد. همان‌طور که در این منحنی مشخص است؛ این عدد بی‌بعد طراحی شده در محدوده  $+۰/۶$  تا  $-۰/۶$  تغییر می‌کند و حداکثر و حداقل این معیار به ترتیب در مرکز درز جوش سطح خارجی لوله و منطقه متاثر از حرارت سطح داخلی لوله اتفاق افتاده است. همچنین اختلاف حداکثر و حداقل معیار  $R_{ya}$  بر روی سطح خارجی لوله در حدود ۰/۴ است، در صورتی که این اختلاف در سطح داخلی لوله به حدود ۰/۸ می‌رسد. بنابراین حالت بحرانی پیش‌خور شدن مقاومت استاتیکی از نظر مقداری در سطح خارجی لوله (مرکز درز جوش) اتفاق افتاده است. شکل (۶) مقاومت تسلیم منطقه جوش را کمتر از منطقه متاثر از حرارت نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد از نظر تغییر شرایط کیفی و کمی، منطقه داخل لوله حالت بحرانی‌تری دارد. در این منطقه از نظر کیفی تغییر علامت داده است (متوسط تنش‌ها از حالت کششی به حالت فشاری در آمده) و از نظر کمی تقریباً ۲ برابر سطح خارج لوله تغییر داشته است. مقایسه بین نمودار  $R_{ya}$  و مقاومت تسلیم در سطح خارج لوله (با توجه به اینکه تعداد نقاط آزمون بیشتری دارد)، نیز قابل توجه است. بیشترین اختلاف مقاومت تسلیم در این سطح بین مناطق متاثر از حرارت و فلز پایه است در حالی که معیار  $R_{ya}$  بیشترین اختلاف را در نواحی جوش و متاثر از حرارت شناسایی می‌نماید. از نظر کیفی نیز نمودار  $R_{ya}$  نسبت به نمودار مقاومت تسلیم، دارای یکنواختی بیشتری است که نشان دهنده روند

از نظر عناصر میکرو آلیاژی تغییرات گسترده‌تری دارد، اما وجود کربن (ناشی از ذوب الکتروودهای پرکننده) در درز جوش و تحول مارتنزیت متعاقب آن باعث شده این منطقه از نظر مقاومت استاتیکی شرایط بهتری داشته باشد. با این وجود نسبت مقاومت تسلیم مرکز درز جوش به فولاد پایه در حدود ۰/۸ است. با توجه به اختلاف  $۲۲۰ \text{ MPa}$  ناحیه متاثر از حرارت و فولاد پایه می‌توان استنباط کرد که وجود کربن و استحاله مارتنزیت، حدود نیمی از این اختلاف را کاهش داده است. در شکل‌های ۶ الی ۹ با توجه به محدود بودن آزمایش کرنش سنجی سوراخ در سطح داخلی لوله، ارزیابی نتایج در ۳ نقطه (بر خلاف ارزیابی ۷ نقطه در سطح خارجی لوله) صورت گرفته است. در این منطقه افزایش مقاومت تسلیم نقطه میانی از مرکز درز جوش نسبت به نقطه متناظر آن در سطح خارجی لوله، به این دلیل است که فاصله لبه‌های جوش در شعاع داخلی لوله کمتر بوده (درز جوش سطح داخل لوله از یک پاس و درز جوش سطح خارج لوله از ۳ پاس موازی تشکیل شده است) و ناحیه متاثر از حرارت کنار جوش آن (کاهش مقاومت تسلیم) در منطقه نزدیک‌تری نسبت به مرکز درز جوش اتفاق افتاده است. با این وجود مقاومت تسلیم در مرکز درز جوش و ناحیه دور از جوش ( $۵۷ \text{ mm}$ ) از مرکز درز جوش (سطوح خارج و داخل لوله تقریباً برابر است و می‌توان روند تغییر مقاومت تسلیم در این سطوح را یکسان در نظر گرفت.

#### معیارهای جدید

معیارها برای اولین بار از بی‌بعد سازی نسبت تنش‌های پسماند استحکام محلی (از تخمین معیارهای حداکثر تنش قائم و ترسکا استفاده شده است [۱۱]). این مقادیر از نسبت نتایج آزمون تجربی کرنش سنجی سوراخ به استحکام فلز (ناشی از تخمین مقاومت با بهره‌گیری از نتایج تجربی آزمون سختی سنجی) در نقاط مختلف استنتاج گردیده است. جهت ارزیابی اثر تنش‌های پسماند

بر مقاومت نهایی سازه (در نقطه آزمون‌های کرنش سنجی سوراخ و سختی سنجی) معرفی گردید و منحنی آن پس از ارزیابی در نقاط سطوح داخل و خارج لوله به همراه منحنی تغییر مقاومت نهایی در شکل (۸) ترسیم شد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، منحنی مقاومت نهایی روندی مشابه با منحنی مقاومت تسلیم (شکل ۶) را دنبال می‌نماید و تنها مقدار آن تا حدی افزایش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان برای مقاومت نهایی همان تحلیل مقاومت تسلیم را در نظر گرفت. محدوده این عدد بی بعد بین صفر و  $0/8$  می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، این معیار در درز جوش سطح خارجی لوله بیشترین مقدار را دارد و مقدار آن با فاصله گرفتن از درز جوش با شیب بسیار تندی می‌یابد. این شیب کاملاً با روند تصاعدی کاهش مقاومت به ضربه در جدول ۴ مطابقت دارد و نشان دهنده اثر بیشتر تفاوت تنش پسماند (در نقطه آزمون کرنش سنجی سوراخ) بر خواص ضربه‌پذیری نواحی درز جوش، منطقه متأثر از حرارت و فولاد پایه است و با توجه به تغییر مقاومت کششی، کاهش چقرمگی سازه رابه دنبال دارد. مقاومت نهایی نشان دهنده حداکثر تحمل تنش کششی در سازه و یکی از پارامترهای تعیین کننده چقرمگی در ماده است. این کاهش در داخل لوله نیز همین روند را دنبال می‌نماید. روش کرنش سنجی سوراخ، توانایی ارزیابی تنش‌های سطحی را دارد و ارزیابی تنش‌ها در راستای ضخامت امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر با توجه به جدار نازک بودن لوله و ارزیابی تنش‌ها به صورت صفحه‌ای، می‌توان از این تنش‌ها صرف نظر کرد. به نظر می‌رسد همین مقدار اندک نیز در اثر حرارت کاهش می‌یابد. بنابراین در حالت سه بعدی، تنش سوم صفر نیز به دو تنش ارزیابی شده به وسیله آزمون کرنش سوراخ اضافه می‌شود.  $R_{u3}$  بر اساس اختلاف تنش‌های پسماند حداکثر و حداقل سه بعدی، بر مقاومت نهایی فلز طراحی

با ثبات‌تر میزان تغییر پیش خور شدن مقاومت تسلیم سازه (ناشی از تنش پسماند) نسبت به تغییر مقاومت اولیه (ناشی از سیکل حرارتی جوشکاری) می‌باشد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر تنش‌های پسماند بر پیش خور شدن مقاومت تسلیم سازه، معیار دیگری به نام  $R_{ym}$  (حاصل تقسیم حداکثر تنش پسماند بر مقاومت تسلیم سازه) در نقطه آزمون‌های مذکور تعریف شد و جهت مقایسه همراه معیار  $R_{ya}$  در نمودار شکل (۷) ترسیم گردید. افزایش مقدار این معیار نشان دهنده کاهش خواص مکانیکی استاتیکی همچون مقاومت تسلیم و نزدیکی مقدار تنش‌های پسماند به تنش‌های جریان پلاستیک می‌باشد. سطح مقادیر  $R_{ym}$  در منطقه جوش و متأثر از حرارت کنار جوش از نمودار  $R_{ya}$  بیشتر و در فواصل بیشتر از درز جوش، کمتر است. به نظر می‌رسد با توجه به ماهیت هیدروستاتیکی تنش‌های پسماند  $R_{ya}$  معیار مناسب‌تری است، اما با مد نظر قرار دادن اهمیت تنش‌های کششی و مشخص نبودن اثر دقیق تنش‌های پسماند بر رفتار استاتیکی سازه، معیار  $R_{ym}$  نیز می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین برای پیروی از رویه ضریب اطمینان بیشتر در مهندسی، استفاده همزمان معیارهای  $R_{ym}$  (در مناطق درز جوش و اطراف آن) و  $R_{ya}$  (در نواحی دورتر از درز جوش) در ارزیابی پیش خور شدن مقاومت استاتیکی سازه، ایمنی بیشتری به همراه خواهد داشت. در آزمون کشش، شکست در منطقه متأثر از حرارت جوش (در بین نواحی فولاد پایه) اتفاق افتاده است که منطبق با ناحیه حداکثر معیار  $R_{ym}$  می‌باشد. این مسأله تایید می‌نماید که تنش‌های پسماند علاوه بر ماهیت هیدروستاتیک، بر رفتار استاتیکی سازه نیز اثر می‌گذارند. در سطح داخلی لوله تنها نقطه ارزیابی شده در معیار اخیر نیز بیشتر از معیار اولیه است.

جهت بررسی اثر تنش‌های پسماند بر خواص ضربه‌پذیری (ارزیابی چقرمگی) سازه برای اولین بار معیار  $R_{u2}$  حاصل از تقسیم اختلاف تنش پسماند

بعدی افزایش می‌یابد و کمترین میزان سختی در منطقه متأثر از حرارت مجاور جوش مشاهده می‌شود.

۲- کاهش عناصر میکرو آلیاژی همچون تیتانیوم و وانادیم از پاس ریشه به طرف پاس نهایی، سبب کاهش سختی در درز جوش می‌شود. اما افزایش کربن و فاز مارتنزیت، کاهش سختی را تا حدودی جبران نموده است.

۳- افزایش قابل توجه مقدار فاز مارتنزیت در پاس نهایی بر مقدار سختی ناحیه جوش بسیار تاثیرگذار است.

۴- در فولاد پایه با توجه به ساختار تقریباً همگون متالورژیکی، استفاده از آزمون کشش برای به دست آوردن مقاومت‌های تسلیم و کششی کافی است. اما در نواحی جوش و متأثر از حرارت به دلیل ساختارها و فازهای متنوع متالورژیکی، آزمون کشش تنها حداقل مقاومت را مشخص می‌نماید. استفاده از آزمون سختی سنجی (و تبدیل آن به مقاومت‌های تسلیم و نهایی به وسیله روابط مشخص) بهترین روش تخمین مقاومت ماده در نواحی مختلف جوش و متأثر از حرارت می‌باشد. در ناحیه متأثر از حرارت کنار جوش، کمترین مقاومت تسلیم دیده می‌شود. ۵- حداکثر و حداقل معیار  $R_{ya}$  به ترتیب در مرکز درز جوش سطح خارجی لوله و منطقه متأثر از حرارت سطح داخلی لوله اتفاق افتاده است. بنابراین حالت بحرانی کاهش مقاومت استاتیکی از نظر مقداری در مرکز درز جوش سطح خارجی لوله روی دهد که با نتایج آزمون کشش مطابقت دارد. از نظر تغییر شرایط کیفی و کمی، در منطقه داخل لوله، شرایط بحرانی‌تر است. در این منطقه  $R_{ya}$  از نظر کیفی تغییر علامت داده و اختلاف حداکثر و حداقل معیار  $R_{ya}$  بر روی سطح داخلی لوله دو برابر سطح خارجی آن است.

۶- افزایش معیار  $R_{ym}$  نشان دهنده کاهش خواص مکانیکی استاتیکی همچون مقاومت تسلیم و نزدیکی مقدار تنش‌های پسماند حداکثر به تنش‌های

گردید و منحنی آن جهت مقایسه با  $R_{u2}$  در شکل ۹ رسم شد. همان‌طور که مشخص است، در نقطه جوش و نواحی نزدیک به جوش در سطح خارجی لوله، با توجه به علامت مختلف تنش‌های محیطی و محوری، ۲ معیار بر هم منطبق است. اما در این دو پارامتر در فواصل دور تر از هم فاصله گرفته و نمودار  $R_{u3}$  با شیب کمتری کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول (۴)، می‌توان گفت با توجه به اثر تنش‌های صفحه‌ای در لوله‌های جدار نازک، معیار  $R_{u2}$  برای بررسی روند کاهش مقاومت به ضربه و ارزیابی چقرمگی معیار مناسب‌تری است اما برای بررسی دقیق‌تر لازم است تعداد محل‌های آزمون ضربه با فاصله گرفتن از درز جوش، بیشتر شود.

### نتیجه‌گیری

برای دستیابی به اتصال یکپارچه در جوش محیطی لوله‌های قطور انتقال گاز طبیعی، خواص مناطق جوش و فلز پایه باید حتی الامکان به هم نزدیک باشد. با وجود اینکه آزمایش‌های مختلف مطابق با استاندارد، کیفیت و سلامت جوش را تایید می‌نماید، اما به منظور بررسی و تحلیل دقیق‌تر، ارتباط نتایج آزمون سختی سنجی با خواص متفاوت متالورژیکی و مکانیکی در جوش مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با مد نظر قرار دادن توزیع تنش‌های پسماند در مناطق جوش و متأثر از حرارت، نیاز به پارامترهای جدیدی که بیان‌کننده رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه باشد، به شدت احساس می‌شود. بر این اساس برای اولین بار معیارهای  $R_{u2}$ ،  $R_{ym}$ ،  $R_{ya}$  و  $R_{u3}$  با استفاده از نتایج آزمون سختی سنجی (و تبدیل آن به مقاومت‌های تسلیم و نهایی) جهت تحلیل بهتر اثر تنش‌های پسماند جوشی بر خواص مکانیکی ماده معرفی شده و مورد بررسی قرار گرفت.

این نتایج را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- میزان سختی از پاس ریشه به طرف پاس‌های

از درز جوش با شیب بسیار تنیدی کاهش می‌یابد. این شیب کاملاً با روند تصاعدی کاهش مقاومت به ضربه در جدول (۴) مطابقت داشته و نشان دهنده اثر بیشتر تفاوت تنش پسماند بر خواص ضربه‌پذیری مناطق درز جوش، منطقه متأثر از حرارت و فولاد پایه است.

شایان ذکر است تبدیل برنیل به ویکرز با محدودیت‌هایی رو به رو است. با توجه به اینکه این مقادیر در محدوده مشخصی قرار دارد و مطالعه ما حساسیتی در این محدوده ندارد، این مسأله در مقاله مورد بررسی قرار نگرفت.

جریان پلاستیک می‌باشد. سطح مقادیر نمودار  $R_{ym}$  در منطقه جوش و متأثر از حرارت کنار جوش از نمودار  $R_{ya}$  بیشتر و در فواصل بیشتر از درز جوش کمتر از است. در آزمون کشش، شکست در منطقه متأثر از حرارت جوش (در بین نواحی فولاد پایه) اتفاق افتاده است که منطبق با ناحیه حداکثر معیار  $R_{ym}$  می‌باشد. بنابراین، تنش‌های پسماند علاوه بر ماهیت هیدروستاتیک بر رفتار استاتیکی سازه نیز اثر می‌گذارند.

۷- معیار  $R_{u2}$  در درز جوش سطح خارجی لوله بیشترین مقدار را دارد و مقدار آن با فاصله گرفتن

## مراجع

- [1]. Lu J. "Handbook of measurement of residual stress," Society for Experimental Mechanics, 1<sup>st</sup> ed., pp. 2-7, 1996.
- [2]. Bose-Filho W. W., Carvalho A. L. M. and Strangwood M., "Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds," Materials Characterization, Vol. 58, pp. 29-39, 2007.
- [۳] فروزان م. ر.، حیدری ع.، 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، اصفهان، ۱۳۸۸.
- [۴] سبک روح م.، هاشمی س. ح.، فراهانی م. ر.، بررسی تجربی ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنش‌های پسماند ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران، نشریه پژوهش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، سال بیست و سوم، شماره ۷۶، ص. ۶۵-۷۹، تهران، ۱۳۹۲.
- [5]. Hammond, J., Blackman, S. and Hudson, M., "Challenges of girth welding X100 linepipe for gas pipelines," Pipe Dreamer's Conference, Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments, Pacifico, Yokohama, 2002.
- [6]. Hudson M., Blackman S., Hammond J. and Dorling D., "Girth welding of X100 pipeline steels," International Pipeline Conference IPC02, Calgary, 2002.
- [7]. Ruibin G., Yiliang Z., Xuedong X., Liang S. and Yong Y., "Residual stress measurement of new and in-service X70 pipelines by X-ray diffraction method," NDT&E International, Vol. 44, pp. 397-393, 2011.
- [8]. Paddea S., Francis J. A., Paradowska A. M., Bouchard R. P. J. and Shibli I. A., "Residual stress distributions in a P91 steel-pipe girth weld before and After post weld heat treatment," Materials Science and Engineering, Vol. 534, pp. 663-672, 2012.
- [9]. Hashemi S. H., "Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel," Materials Science and Engineering, Vol. 528, pp.1648-1655, 2011.
- [10]. Benham P. P., Crawford R. J., Armstrong C. G., "Mechanics of engineering materials," Longman Group, 1996.
- [11] Chakrabarty J., "Theory of plasticity," 3<sup>rd</sup> ed., Elsevier, Heinemann, 2006.