

## تحلیلی بر مشخصه های ریزساختاری اتصال FSW شده فولاد A517(B) و ارتباط آن با خواص مکانیکی و رفتار خوردگی

مرتضی انصاری پور\*، عبدالرضا سلطانی پور، علی قاسمی، محمد رضا دهنوی  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۱۱/۰۴)

### چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی شده (FSW) ورق فولاد A517(B) صورت گرفت. پس از دستیابی به اتصال FSW شده با ریزساختار بهینه حاوی کمترین مقدار مارتنزیت، مشخصات اتصال از جنبه خواص مکانیکی و رفتار خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفت. از این رو پس از شناسایی فازی به کمک بررسی های ریزساختاری SEM و پراش سنجی پرتو ایکس (XRD)، خواص مکانیکی اتصال با استفاده از ریزسختی سنجی ویکرز و آزمون کشش عرض جوش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ریزسختی سنجی افزایش جزئی سختی ناحیه اغتشاش (SZ) را در مقایسه با فلز پایه (BM) نشان می دهد؛ اگرچه کاهش حدود ۱۷ درصدی سختی در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) محسوس تر است. این افت سختی در HAZ به صورت افت استحکام کششی پدیدار شد و کاهش حدود ۱۲ درصدی استحکام نهایی و ۱۹ درصدی استحکام تسلیم جوش را در مقایسه با BM به دنبال داشت. این افت را می توان به ایجاد فرابازگشت در ریزساختار اولیه فلز پایه حاوی مارتنزیت و بینیت ارتباط داد. بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه کشش، یک توزیع بای-مودال از دیمپل های کوچک و بزرگ را نشان می دهد که از نرمی HAZ و تفاوت در سایز ریزحفرات حکایت دارد. تحلیل رفتار خوردگی اتصال در محیط آب حاوی ۳/۵ درصد وزنی کلرور سدیم نشان داد که هیچ لایه رویین و پایداری مانع از روند انحلال تشکیل نشده است. رفتار خوردگی مناطق مختلف SZ و فلز پایه، حاکی از نرخ خوردگی نسبتاً مشابه این دو ناحیه است. اختلاف حدود 50mv پتانسیل خوردگی SZ و BM نشان می دهد در شرایط خوردگی گالوانیکی، این اختلاف پتانسیل نسبتاً زیاد می تواند مقاومت به خوردگی ضعیف تری را برای BM پدید آورد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی (FSW)، فولاد A517(B) - مشخصات ریزساختار - رفتار خوردگی

## Analysis of the microstructural characteristics of FSW connection of A517 (B) steel and its relation to mechanical properties and corrosion behavior

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی [mortezaap@yahoo.com](mailto:mortezaap@yahoo.com)

**M. Ansari-pour, A. Soltanpoor, A. Ghasemi, M.R. Dehnavi**  
Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University, Shahin Shahr, Iran

(Received 12 January 2016 ; Accepted 25 January 2016)

### Abstract

The aim of this study was to evaluate the mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welding (FSW) connection of A517 (B) steel plate. Mechanical properties and corrosion behavior of weld zone were evaluated after reaching to optimum FSW microstructure with the lowest martensite phase. Thus, after the identifying phase microstructure by SEM and XRD analysis, mechanical properties were analyzed by micro-hardness and tensile test. Micro hardness data shows slight increases in stir zone (SZ) compared with the base metal (BM); although a reduction of about 17% in hardness of heat-affected zone (HAZ) was sensible. Reduction of hardness in the HAZ was appeared as drop by about 12 percent of the yield strength and 19 percent of ultimate strength compared with BM. SEM images from fracture surface of the tensile sample showed bi-modal distribution of large and small Dimples being sings of softness of HAZ. Comparing corrosion behavior in solution consist of 3.5 wt% of NaCl showed that there was no passive layers to prevent dissolution of the metal in the SZ and BM. while BM and SZ had fairly similar corrosion rates, Difference of 50 mV between corrosion potential of SZ and BM showed that in galvanic condition, corrosion resistance of BM could be lower than SZ.

**Keywords:** friction stir welding, A517(B) steel, microstructural properties, corrosion behavior.

### ۱- مقدمه

شده در فولاد موثر باشد [۲]. ساتا و همکارانش رابطه‌ای بین نرخ سرمایش در فرایند FSW و ریزساختار در یک فولاد پرکربن ارائه نمودند [۳]. اثر دما و نرخ کرنش بر تغییرات ریزساختار توسط گوش و همکارانش بررسی شد [۴]. همچنین نشان داده شده است که در طی FSW فولاد حاوی ۰.۷۲ درصد وزنی کربن می‌تواند با کنترل پارامترهای فرایند از ایجاد فاز مارتنزیت ممانعت کرد. نشان داده شد که با انجام جوشکاری در زیر دمای A<sub>1</sub> و همچنین با کاهش نرخ سرمایش (از طریق کنترل سرعت پیشروی ابزار) می‌تواند از تشکیل فاز مارتنزیت جلوگیری نمود [۵]. رامیرز و همکارانش نشان دادند که در طی FSW فولاد کم کربن API-X80 تغییر در حرارت ورودی به جوش می‌تواند نسبت فاز فریت ویدمن اشتاتن را به فریت بینیتی و مارتنزیت تغییر دهد [۶]. گزارش شده است که جوشکاری به روش FSW در ناحیه پایداری فازی فریت+ آستنیت می‌تواند منجر به ریز کردن ساختار اتصال فولاد کربنی و افزایش استحکام شود [۷]. تغییر در نسبت فازها از طریق تغییر شکل مکانیکی به پدیده شناخته شده پایدارسازی مکانیکی

جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی (FSW) یک شیوه اتصال حالت جامد است که در آن با کمک گرفتن از یک ابزار شانه و بین طرح دار، با ایجاد تغییر شکل پلاستیکی شدید در کنار حرارت اصطکاکی زیاد، اتصال ایجاد می‌شود. در طی فرایند FSW ماده نرم شده در اثر حرارت در زیر ابزار، با فشار اعمال شده در حول ابزار به چرخش در می‌آید و در پشت ابزار فشرده می‌شود. این فرایند باعث می‌شود در اتصال حاصل، یک ریزساختار منحصر به فرد متاثر از پدیده‌های متالورژیکی، تغییر شکل ترمومکانیکی شدید و بازیابی یا تبلور مجدد در دمای بالا شکل بگیرد [۱]. این کارایی FSW می‌تواند به عنوان یک انتخاب برای جایگزینی روش‌های جوشکاری فولادهایی که به ایجاد ترک های سرد در طی فرایندهای جوشکاری ذوبی حساس هستند، مطرح گردد. لذا تلاش‌هایی برای بهبود پارامترهای FSW و تحلیل اتصال از جنبه‌های ریزساختاری و مکانیکی انجام گرفته است. فوجی و همکارانش نشان دادند که سرعت جوشکاری می‌تواند در کنترل ریزساختار اتصال FSW

بدین منظور نمونه اتصال از مقطع عرضی سنباده زنی و پولیش کاری شد و آشکارسازی به کمک محلول ۳ درصد نیتال انجام شد. بررسی های میکروسکپ الکترونی توسط دستگاه SEM مجهز به EDS انجام شد. به منظور آنالیز فازی از دستگاه XRD مجهز به لامپ اشعه ایکس Cu-K $\alpha$  استفاده شد. سختی سنجی بر روی مقطع اتصال توسط دستگاه ریزسختی سنج نوع ویکرز انجام شد. جهت تحلیل خواص کشش عرضی جوش، آماده سازی نمونه مطابق با مشخصات نمونه Sub-Size مندرج در استاندارد ASTM-E8M انجام شد. قبل از انجام آزمون کشش عرضی، نمونه ها سنباده زنی شدند و توسط محلول اچ رقیق، مقطع ماکرو اتصال آشکاری سازی شد (شکل ۱- الف). یک الگوی مشبک بر روی سطح نمونه کشش چاپ شد تا بتوان پس از آزمون کشش، جزئیات بیشتری از رفتار تغییرشکل نواحی مختلف اتصال را مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۱- ب). تست کشش در سرعت پیشروی ثابت فک 1mm/min انجام شد. جهت انجام آزمون خوردگی الکتروشیمیایی محلول استاندارد حاوی  $3.5 \pm 0.1$  درصد وزنی NaCl مطابق با استاندارد ASTM D1193 تهیه شد. آزمون های خوردگی الکتروشیمیایی تافل توسط دستگاه پتانسیو استات/گالوانواستات مدل EG&G-model273A بر روی نواحی مختلف جوش و فلز پایه با نرخ اسکن 1mv/sec انجام گرفته و با یکدیگر مقایسه شد. جهت انجام آزمونها از الکتروود مرجع کالومل اشباع و الکتروود کمکی پلاتین استفاده شد. با تحلیلی که بر روی محصولات خوردگی، رفتار منحنی تافل و اطلاعات بدست آمده از منحنی انجام گرفت، رفتار خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه یابی ریزساختار

شکل ۲ مقطع عرضی اتصال را نشان می دهد. بر اساس الگوهای ریزساختاری مرجع، ریزساختار SEM فلز پایه ساختاری متشکل از فازهای فریت چند وجهی (PF)، بینیت بالایی (UB) و مقداری مارتنزیت (M) شناسایی شد (شکل ۳).

ارتباط داده شده است. در این پدیده توسط تغییرشکل شدید، از استحاله نفوذی ممانعت می شود و بنابراین تشکیل فاز فریت ترغیب می شود [۸]. مطالعات انجام شده نشان می دهد دستیابی به ریزساختار مطلوب در طی FSW فولادهای کربنی با کنترل پارامترهای فرایند قابل انجام است.

در این تحقیق فولاد A517(B) به عنوان یک فولاد کوئنچ-تمپر با استحکام بالا با کاربری فولاد ساختار دریایی، به روش FSW و به کمک ابزار WC جوشکاری شد. در بازه ای از پارامترهای فرایند و در نرخ پیشروی کم (که متناظر با نرخ سرمایش کمتر است)، از ایجاد فاز مارتنزیت در ریزساختار اتصال جلوگیری شد تا عامل ایجاد ترک سرد در جوش این فولاد مرتفع گردد. لازم بود این مشخصه های ریزساختاری از جنبه های مکانیکی و خوردگی مورد ارزیابی قرار گیرد که بدین منظور ضمن بررسی خواص کشش عرض جوش، رفتار خوردگی نواحی مختلف اتصال و فلز پایه از طریق بررسی های الکتروشیمیایی به روش پلاریزاسیون تافل در محیط حاوی ۳.۵ درصد وزنی NaCl مقایسه شد.

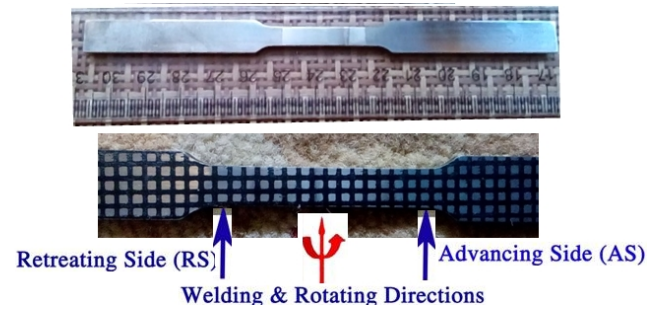
#### ۲- مواد و روش تحقیق

صفحات فولاد A517(B) کوئنچ-تمپر شده با ضخامت 6mm برای انجام جوشکاری FSW استفاده شد. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده، در جدول ۱ آورده شده است. ورق های مورد تست در راستای نورد به ابعاد مورد نظر برشکاری شد و پس از سنگ زنی و حذف لایه اکسید سطحی به منظور حذف کثیفی و روغن، قبل از جوشکاری توسط استن تمیز شد. از گاز آرگون به منظور محافظت از سطح اتصال استفاده شد. جوشکای در سرعت چرخش ثابت 500rpm و سرعت های پیشروی 10mm/min و ۲۰ انجام شد. این نرخ های پیشروی جهت کاهش نرخ سرمایش جوش انتخاب شد. از ابزار پین و شانه از جنس WC با طرح مخروطی کمک گرفته شد. قطر شانه 25mm و قطر پین در راس 6/7mm انتخاب شد. زاویه انحراف ابزار در تمامی شرایط تست به میزان ثابت ۱ درجه تنظیم شد. از میکروسکپ نوری جهت بررسی های ریزساختاری استفاده شد.

اتصال است و لذا بسیار محتمل است که در طی FSW در اثر رخداد تبلور مجدد دینامیکی و نهایتاً تبلور مجدد شبه دینامیکی یا استاتیکی حین خنک سازی، ریزساختار شدیداً تغییر شکل یافته به طور کامل متبلور شده باشد. این احتمال با توجه به انرژی نقص در چیده شدن SFE نسبتاً بالای فاز فریت تقویت می‌شود [۱۰]. از این مشاهدات این گونه برداشت می‌شود که دمای پیک در ناحیه SZ بالاتر از دمای تبلور مجدد این فولاد می‌باشد. همچنین دمای توقف تبلور مجدد آستنیت (RST) که حداقل دمای مورد نیاز برای انجام تبلور مجدد می‌باشد، بر طبق رابطه (۱) [۱۱]، برای فولاد مورد استفاده بالاتر از  $882^{\circ}\text{C}$  محاسبه می‌گردد.

$$\text{RST}(^{\circ}\text{C}) = 887 + 464C + (6645\text{Nb} + 664\sqrt{\text{Nb}}) + (732V - 230\sqrt{V}) + 890\text{Ti} + 363\text{Al} - 357\text{Si} \quad (1)$$

با توجه به روابط تجربی دماهای AC1 و AC3 این فولاد به ترتیب  $728^{\circ}\text{C}$  و  $849^{\circ}\text{C}$  برآورد می‌گردد [۱۲]. مقایسه AC3 و RST نشان می‌دهد که در طی FSW دمای پیک در SZ از AC3 فراتر رفته است و لذا ریزساختار اولیه به طور کامل به آستنیت استحاله یافته است. این برآوردها بدون در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل بر دماهای استحاله بیان شده است. لذا ریزساختار نهایی در SZ محصول استحاله آستنیت پس از انجام فرایند جوشکاری و سرد شدن متعاقب آن خواهد بود. ریزساختار SZ در مرکز (مطابق با شکل ۴-الف) حاوی بینیت پایینی (LB) و بینیت گرانوله (GB) می‌باشد. شایان ذکر است وجود فریت کشیده و سوزنی شکل از مشخصات بینیت پایینی است. در این ساختار اثری از فریت چند وجهی (PF) و ریزساختار پرلیتی مشاهده نمی‌شود. عدم وجود پرلیت با توجه به موقعیت دماغه پرلیت در دیاگرام همدمای این فولاد حاکی از این است که نرخ سرمایش ایجاد شده در طی فرایند خنک شدن اتصال، از ایجاد این فاز ممانعت به عمل آورده است و لذا در نهایت آستنیت در پایان سرمایش به فازهای بینیت (پایینی و گرانوله) تغییر حالت داده است. علاوه بر این اثری از مارتنزیت به عنوان محصول استحاله آستنیت در طی سرمایش سریع مشاهده نشد که نشان می‌دهد انتخاب پارامترها جهت حصول ساختار عاری از مارتنزیت موثر بوده است. شایان ذکر است این محصول

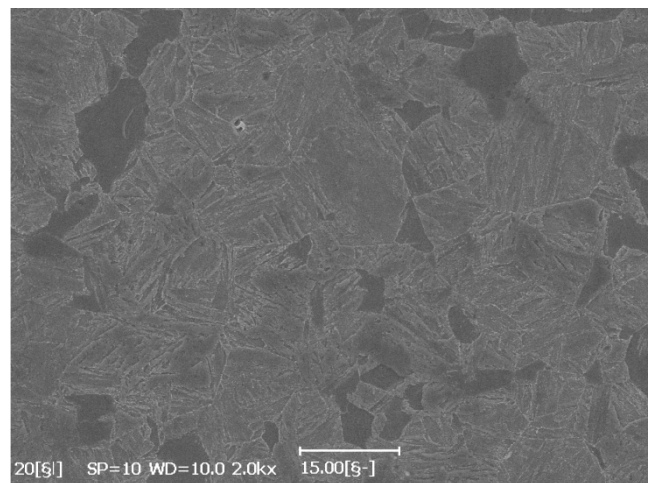


شکل ۱- نمونه کشش؛

بالا: رویه اتصال FSW پس از آماده سازی و اچ شیمیایی رقیق؛ پایین: سطح ریشه پس از ایجاد الگوی مشبک.



شکل ۲- مقطع عرضی اتصال FSW شده ورق فولاد A517.

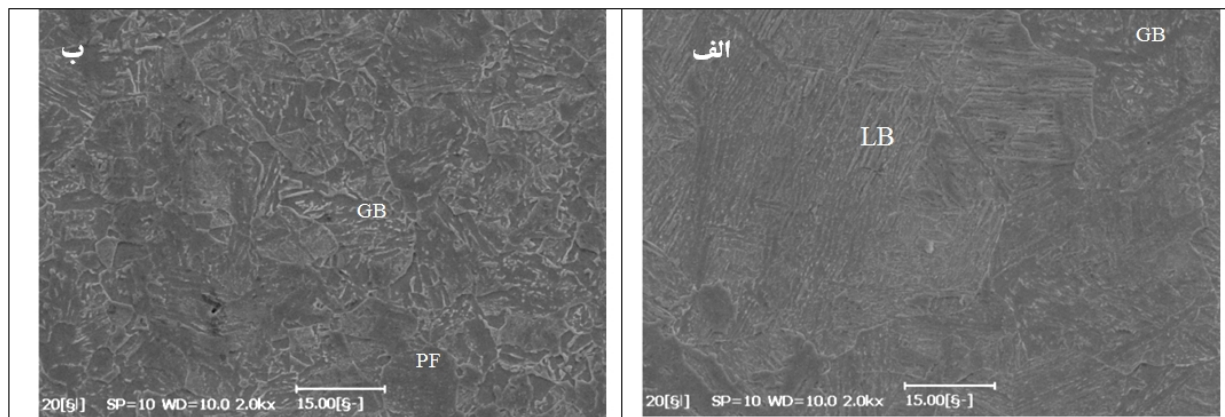


شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فلز پایه عمدتاً حاوی فریت چند وجهی، بینیت بالایی و احتمالاً مارتنزیت. از مشخصات بینیت بالایی لایه‌های فریت تخته ای در داخل مرز دانه های آستنیت اولیه است.

تصویر ریزساختار نواحی جوش FSW شده در شکل (۴) نشان داده شده است. با نگاهی اجمالی مشخص است که اثری از ریزساختار تغییر شکل یافته نظیر باندهای تغییر شکلی و یا دانه‌های کشیده شده در SZ مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است تغییرات ریزساختار در ناحیه اغتشاش (SZ) نتیجه اثرات پیچیده تغییر شکل و دما در طی انجام FSW و مرحله خنک سازی

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ورق فولاد A517(B) مورد استفاده در این تحقیق

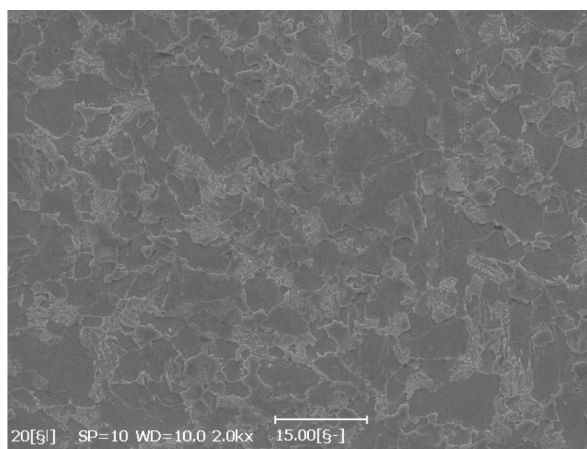
S	P	V	Mo	Cr	Si	Mn	C	عنصر
0.004	0.008	0.05	0.21	0.5	0.18	0.85	0.16	درصد وزنی



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ناحیه جوش در سرعت پیشروی 20 mm/min در دو موقعیت متفاوت SZ: الف: مرکز SZ؛ ب: SZ در نواحی نزدیک به HAZ.

مرکز SZ و تفاوت در نرخ سرمایش این ناحیه از جوش باشد. به عبارتی این گونه می توان نتیجه گیری کرد که در طی جوشکاری دمای پیک در این ناحیه تا محدوده دو فازی آستنیت + فریت هیپووتکتوئید بالا رفته است که این باعث شده در طی سرمایش، آستنیت با نرخ سرمایش کمتر (در مقایسه با مرکز SZ) به فاز های بینیتی (عمدتا بینیت گرانوله) استحاله یابد. لازم به ذکر است با توجه به نرخ سرمایش کمتر، با نفوذ آسان تر کربن در ساختار آستنیت و خروج از شبکه کریستالی، کربن به صورت کاربید رسوب نموده و ساختار بینیت گرانوله را ایجاد کرده است.

ریزساختار HAZ در شکل ۵ نشان داده شده است. یک اختلاف محسوس بین ریزساختار HAZ و BM مشاهده می شود و آن افزایش کسر سطحی فاز PF در HAZ می باشد. این گونه می توان تحلیل نمود که در اثر حرارت ناشی از جوشکاری، در اثر انجام فرابازگشت، صفحات فریتی موجود در ساختار بینیت به دانه های فریت هم محور استحاله یابد. البته در تحقیقات هنوز مشخص نشده است که این رخداد در اثر تبلور مجدد یا رشد دانه بوجود می آید [۸]. بنابراین آنچه به صورت فاز PF مشاهده می شود، نتیجه تبدیل صفحات فریت بینیتی به فریت هم محور می باشد. در اثر این تغییر ریزساختار، افت سریع سختی

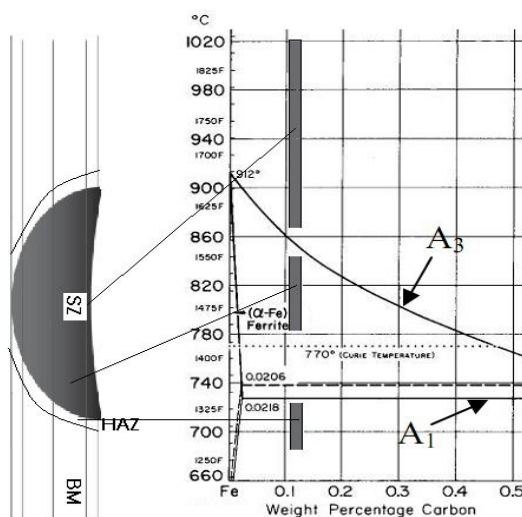


شکل ۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار HAZ اتصال FSW شده در سرعت پیشروی 20mm/min.

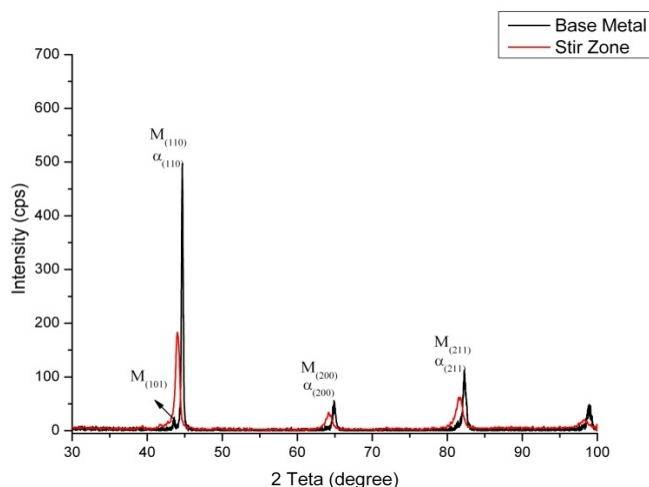
استحاله آستنیت می توانست در سرعت های سرمایش بالاتر (خنک کاری شدیدتر و استفاده از سرعت پیشروی بالاتر) آشکار شود. با وجود این، ریزساختار SZ در تمامی نواحی یکسان نیست به طوری که با فاصله گرفتن از مرکز SZ و نزدیک شدن به HAZ درصد فاز بینیت گرانوله بر بینیت پایینی غلبه می کند (شکل ۴-ب). این در حالی است که بخشی از ریزساختار در این ناحیه را فریت چند وجهی تشکیل می دهد. این اتفاق می تواند نتیجه افت دمای پیک در نواحی دورتر از

قابل پیش‌بینی است. آنچه از ریزساختار اولیه باقی می‌ماند مرزخانه‌های آستنیت اولیه (مرزهای با زاویه زیاد) است که در اثر این بازگشت همچنان حفظ شده است. مابقی ریزساختار در شکل ۵ را بخش‌هایی از ریزساختار اولیه فلز پایه فوق اشباع از کربن (بخش‌های مارتنزیتی) تشکیل می‌دهد که در اثر این حرارت از طریق نفوذ کربن و تشکیل کاربید آهن، به ساختار مارتنزیت فرابازگشت شده استحاله یافته است. از این مشاهدات می‌توان این گونه برداشت نمود که دما در ناحیه HAZ از دمای  $AC_1$  فراتر نرفته است. لذا بر طبق تغییرات ریزساختاری در این تحقیق، موقعیت دمایی نواحی مختلف اتصال FSW مطابق با شکل ۶ پیشنهاد گردیده است.

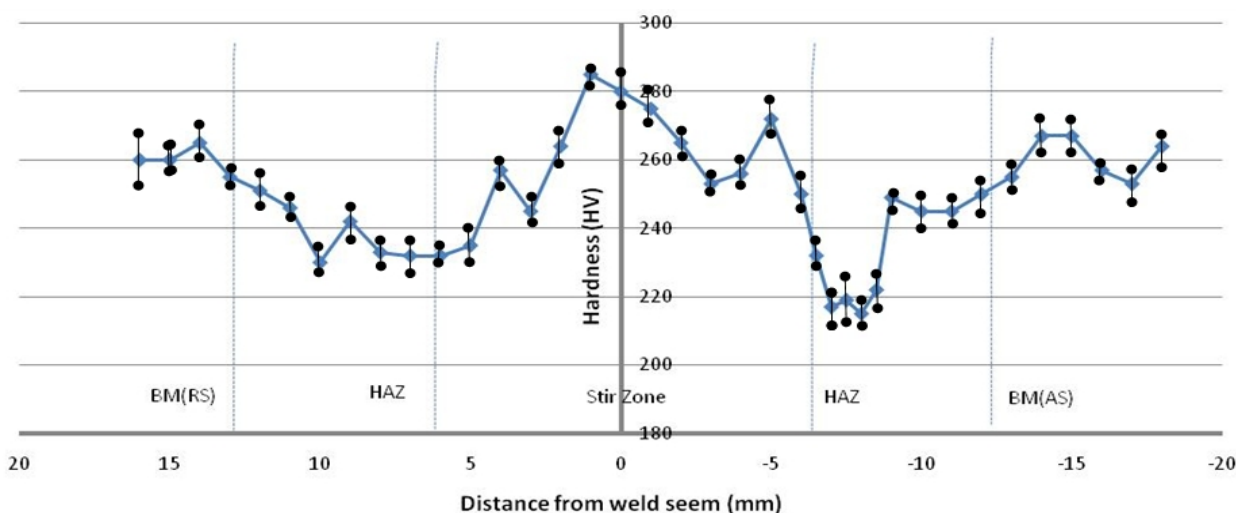
جهت تحلیل بیشتر مشاهدات ریزساختاری، آنالیز پراش پرتو ایکس بر روی فلز پایه و SZ انجام شد. در الگوی XRD ناحیه SZ (شکل ۷)، فاز مارتنزیت شناسایی نشد (در الگوی پراش فلز پایه این فاز به صورت یک پیک قابل تمایز اما چسبیده به پیک صفحه (۱۱۰) فریت قابل شناسایی است). علاوه بر این عرض پیک‌ها در SZ تقریباً دو برابر پیک مشابه در الگوی پراش مربوط به فلز پایه است که این نشان می‌دهد همچنان اثراتی از جوشکاری (به صورت اثرات تغییرشکل میکرونی و تنش‌های باقیمانده) در ساختار قابل پیش‌بینی است. لازم به ذکر است الگوی پیک‌های پراش یافته زمانی پهن می‌شوند که مرزهای فرعی یا کریستالیت‌های خیلی ریزی وجود داشته باشد و یا شبکه کریستالی در اثر عیوب، تحت کرنش یا



شکل ۶- موقعیت دمایی متناظر پیشنهادی برای هر یک از نواحی اتصال FSW شده روی دیاگرام شماتیک Fe-C.



شکل ۷- الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به فلز پایه و جوش (SZ) که مقداری پهن شدگی پیک و جابجایی پیک را در الگوی مربوط به SZ نشان می‌دهد.



شکل ۸- الگوی تغییرات ریزسختی ویکرز در خطی به موازات سطح در مقطع عرضی جوش در سرعت پیشروی 20mm/min

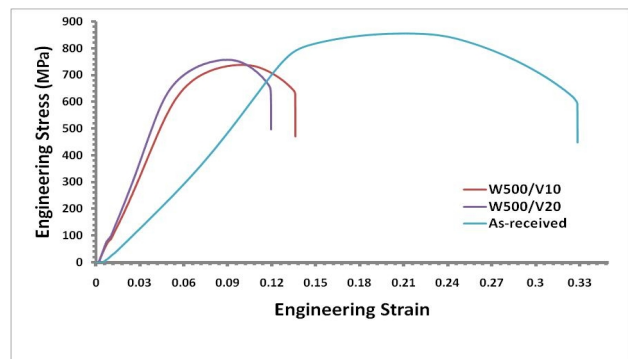


تحقیق رینولدز و همکارانش قابل توجه بوده است [۱۵]، شاید بتوان این اختلاف اندک را در تحقیق حاضر به دو دلیل این گونه توجیه نمود. اول این که سختی فلز پایه با توجه به حضور فازهای سخت مارتنزیت و بینیت بازگشت شده نسبتاً زیاد است. دوم اینکه در ناحیه SZ اثری از فاز استحکام بخش مارتنزیت مشاهده نمی‌شود که این خود باعث گردیده سختی در SZ نتواند به میزان قابل تاملی افزایش یابد. البته ایجاد فازهای بینیتی توانسته همچنان سطح سختی جوش را در حد مطلوبی حفظ نماید. این روند با آنچه در تحقیق کانکل و همکارانش در مورد یک فولاد کوئچ - تمپر شده گزارش شده است همخوانی دارد [۱۶].

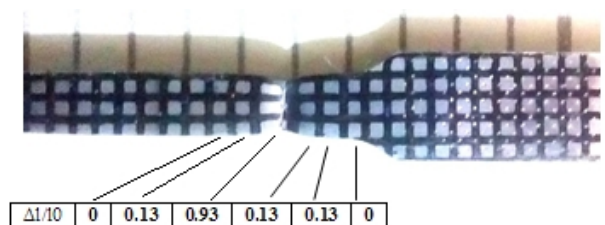
برخلاف این روند، در HAZ به دلیل حرارت انتقال یافته حین فرایند جوشکاری، افت قابل توجهی در سختی پدیدار شده است. شاید این افت سختی را بتوان تاییدی بر اتفاقات ریزساختاری در شکل ۵ (تجزیه فاز کاربرد در ساختار بینیت) دانست. این تفاوت در نواحی HAZ در دو سوی جوش تا حدودی متفاوت است. به دلیل دمای پیک بالاتر در سمت پیشرو (AS) جوش، متناسب با آن حرارت بیشتری به ناحیه HAZ وارد شده است [۱۷-۱۸] و این حرارت با نفوذ به HAZ باعث افت بیشتر سختی در مقایسه با سمت پس رو (RS) شده است. به عبارت دیگر شاید بتوان گفت کمترین میزان سختی در HAZ در جایی اتفاق می‌افتد که SZ در اثر کرنش های تغییرشکلی و حرارت داخلی، دمای پیک بالاتری را تجربه نموده باشد.

در شکل ۹ نمودار تنش - کرنش مهندسی نمونه های کشش عرضی جوش جهت مقایسه با نمونه فلز پایه آورده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد نمونه سازی به نحوی انجام شد تا تمامی نواحی جوش و HAZ در طول نمونه آزمون قرار گیرد و بنابراین در شرایط آزمون کشش، شکست از ضعیف ترین ناحیه اتصال FSW اتفاق خواهد افتاد. نتایج بدست آمده از این آزمونها در جدول ۲ خلاصه شده است. در نگاه اول مشخص است که استحکام جوش در مقایسه با فلز پایه کمتر است. از سویی دیگر درصد ازدیاد طول نمونه

چرخش محسوس قرار گرفته باشد [۱۴-۱۳]. در کنار این پهن مرزهای فرعی یا کریستالیت های خیلی ریزی وجود داشته باشد و یا شبکه کریستالی در اثر عیوب، تحت کرنش یا چرخش محسوس قرار گرفته باشد [۱۴-۱۳]. در کنار این پهن شدگی مقدار جابجایی پیک در الگوی پراش SZ مشاهده شد که این نشان می‌دهد یک تنش باقیمانده همگن احتمالاً ناشی از گرادیان دمایی سرمایش جوش بین SZ و نواحی مجاور آن در جوش به جا مانده است. بررسی و تحلیل مقدار این تنش ها موضوعی است که به عنوان یک تحقیق مجزا می‌تواند مد نظر قرار گیرد. تغییرات ریزساختاری در جوش مذکور منجر به تغییر خواص مکانیکی می‌شود که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد.



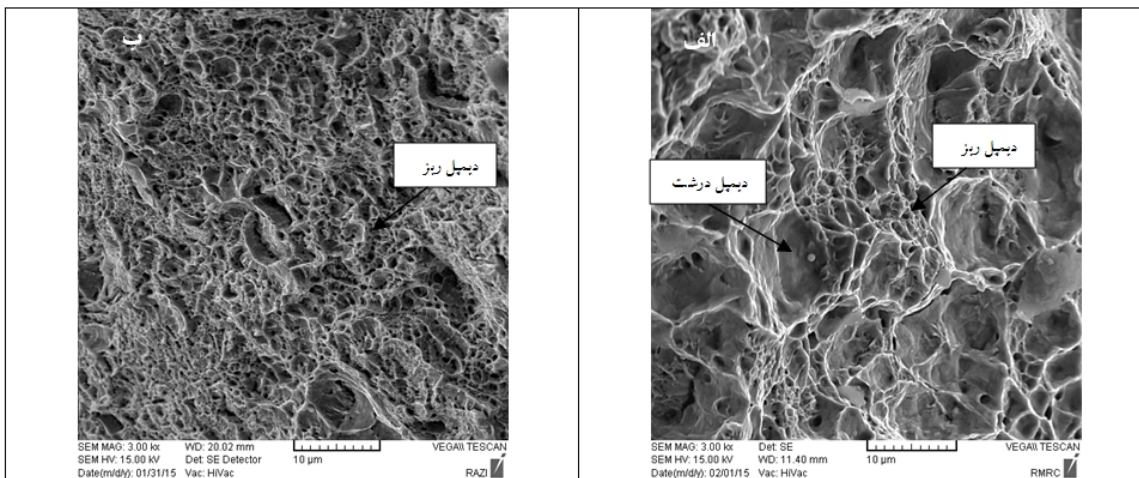
شکل ۹- نمودار های تنش و کرنش مهندسی نمونه های جوش در سرعت های پیشروی 10 mm/min و ۲۰ در کنار فلز پایه .



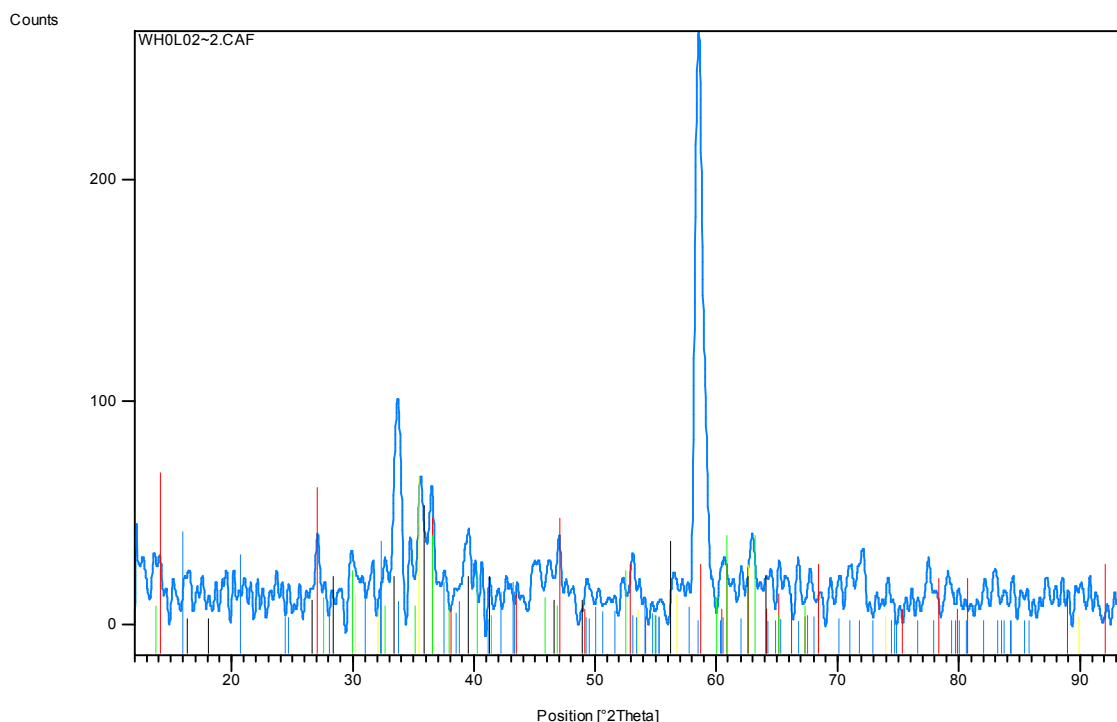
شکل ۱۰- تصویر نمونه کشش جوش (پس از شکست) و کرنش برآورد شده برای المانهای نزدیک به محل شکست .

### ۳-۲- ارزیابی خواص مکانیکی

شکل ۸ الگوی تغییرات ریزسختی را در خطی به موازت سطح ورق در مقطع عرضی (به فاصله ۲ میلیمتری از ریشه جوش) نشان می‌دهد. بالاترین مقدار سختی در SZ اندازه گیری شد که البته این مقدار تفاوت قابل تاملی با سختی در ناحیه فلز پایه ندارد با وجودی که این اختلاف سختی بین SZ و BM در



شکل ۱۱- تصویر میکروسکپی الکترونی الف) از سطح شکست نمونه FSW شده. ب) از سطح شکست BM



شکل ۱۲- الگوی پراش XRD مربوط به رسوبات خوردگی موجود در محلول الکترولیت نمک زدایی شده.

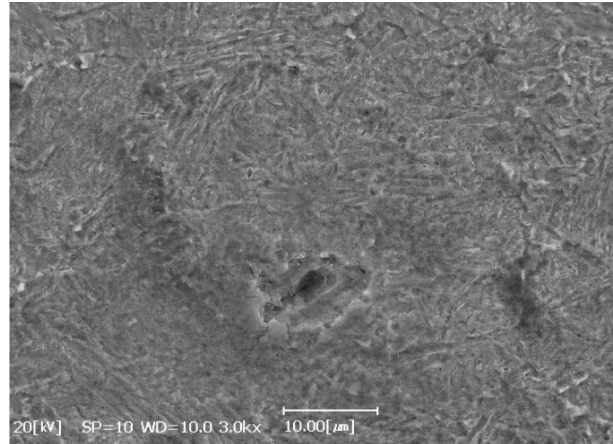
درصد ازدیاد طول کمتر می شود. شکست در تمامی نمونه ها در HAZ و در سمت AS اتصال اتفاق افتاده است. شایان ذکر است بر اساس نتایج ریزسختی سنجی و حداقل میزان سختی در این ناحیه، شکست نمونه کشش از این ناحیه تا حدودی قابل پیش بینی بود؛ مگر اینکه به دلیل نقایص جوش در ناحیه SZ این پیش بینی مخدوش می شد.

جوشکاری شده به میزان قابل توجهی افت کرده است. اختلاف قابل ملاحظه ای بین استحکام کششی نمونه های جوشکاری شده در دو سرعت متفاوت جوشکاری مشاهده نمی شود؛ اگرچه وجود این اختلاف جزئی با نتایجی که ایمام و همکارانش گزارش کرده اند هم خوانی دارد [۱۹]. این روند به گونه ای است که با افزایش سرعت پیشروی، استحکام افزایش و



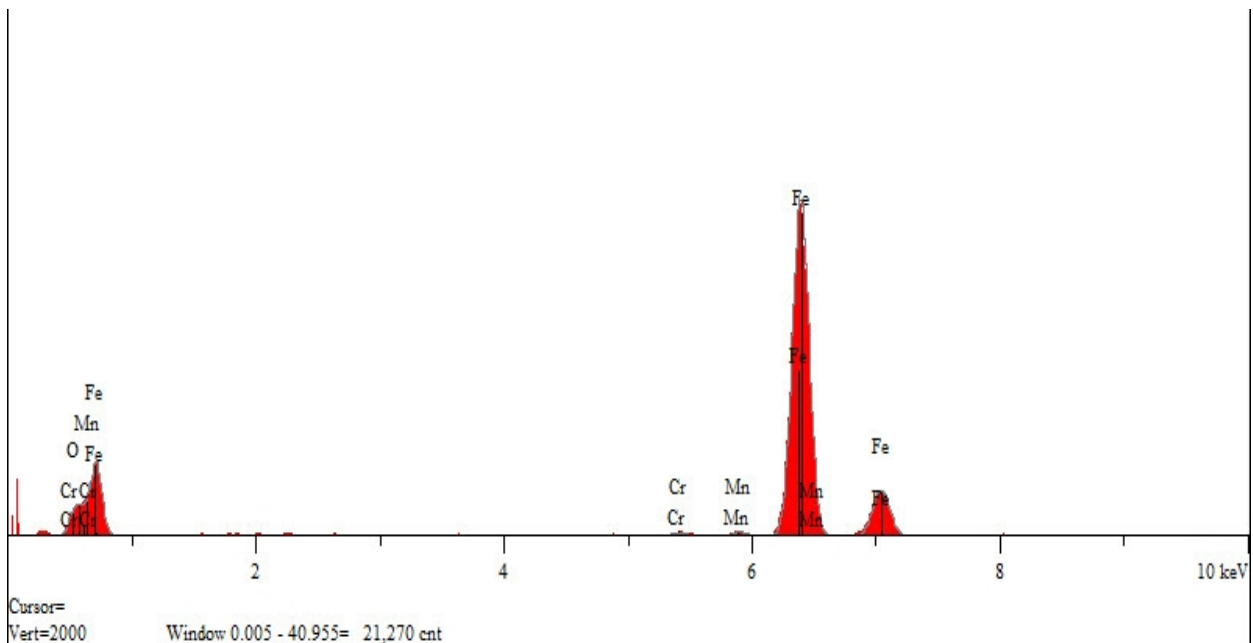
ناهمگنی خواص ریزساختاری و مکانیکی مناطق جوش در طول سنجه منتج شده است و لذا این داده نمی‌تواند بیانگر رفتار کل جوش و قابل مقایسه با نمونه فلز پایه باشد. از طرفی عدم ایجاد کرنش پلاستیک در دیگر المانهای مناطق جوش (به ویژه در SZ) نشان می‌دهد که استحکام مکانیکی جوش از مقدار آن در HAZ به مراتب بیشتر است. این در حالی است که کرنش موضعی شدید ایجاد شده در HAZ نشان از نرمی ساختار فلز در این ناحیه دارد؛ موضوعی که تحلیل سطح شکست توسط SEM آن را تایید می‌کند.

تصویر میکروسکپی الکترونی از سطح شکست نمونه کشش جوش در شکل ۱۱- الف آورده شده است. این تصویر از وجود دیمپل‌های کوچک و بزرگ (مشخصه‌های شکست نرم) و عدم وجود ورقه‌های کلیواژ (Cleavage Facets) حکایت دارد. اختلاف در ابعاد دیمپل‌ها در سطح شکست را می‌توان به تعداد و توزیع میکرو حفرات جوانه زده شده ارتباط داد. اگرچه شکست از ناحیه HAZ در آزمون کشش در استحکامی کمتر از فلز پایه یک عیب برای کل جوش تلقی می‌گردد، وضعیت سطح شکست معرفی چقرمگی و نرمی بالا، مزیتی برای این جوش تلقی می‌شود. لازم به ذکر است سطح شکست در نمونه فلز پایه (شکل ۱۱-ب) شواهدی از وجود دیمپل‌های با ابعاد نسبتاً



شکل ۱۳- تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح نمونه خوردگی در مرکز SZ که نوعی از خوردگی نسبتاً یکنواخت را نشان می‌دهد.

اگرچه نتایج داده‌های استخراج شده در جدول ۲ نشان می‌دهد درصد ازدیاد طول نمونه FSW شده شدیداً افت کرده است، اما تحلیل فواصل شبکه چاپ شده بر روی نمونه در شکل ۱۰ با این نتیجه گیری کاملاً همخوانی ندارد. با توجه به نتایج این شکل (درصد ازدیاد طول المانها در زیر هر المان محاسبه شده است)، تقریباً بیشتر کرنش اعمال شده در نمونه کشش در HAZ متمرکز شده است. در حقیقت درصد ازدیاد طول پایین اندازه گیری شده در نمونه‌های جوشکاری شده اساساً از



شکل ۱۴- منحنی توزیع پراش انرژی (EDS) از سطح نمونه خوردگی در مرکز SZ.

یکنواخت و ریز دارد.

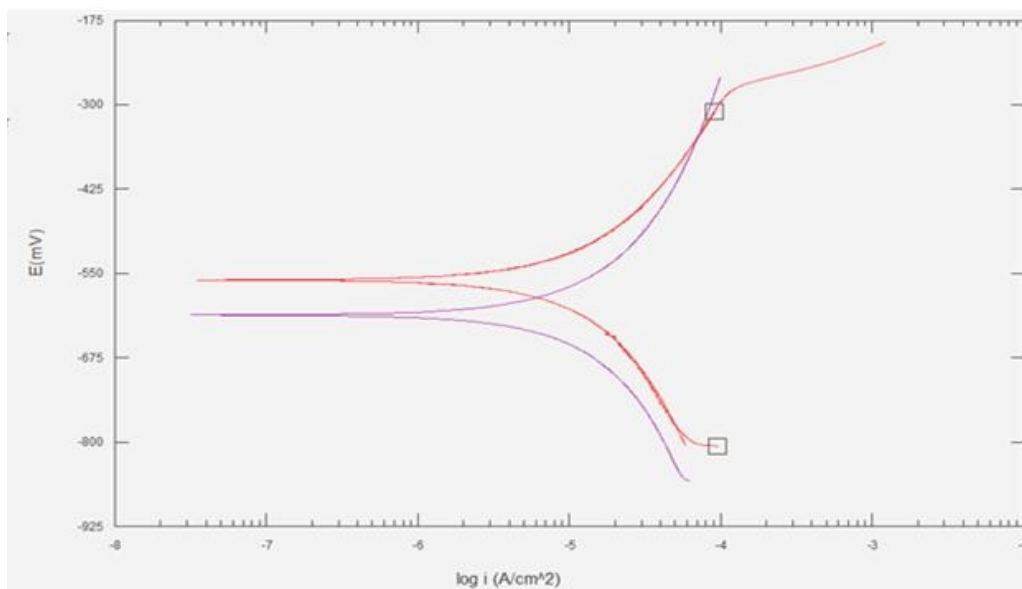
XRD رسوبات باقیمانده را نشان می‌دهد. در این الگو فازهایی نظیر  $\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ،  $\text{FeOOH}$  به عنوان محتمل‌ترین فازها شناسایی شد. اگر چه نمی‌توان از روی رسوبات موجود در محلول الکترولیت واکنش‌های خوردگی را با دقت بالایی پیش بینی نمود، اما از آنجا که طی فرایند خوردگی لایه محافظی بر روی سطح فلز ایجاد نشده است، مکانیزم خوردگی به نحوی که در ادامه آمده است پیشنهاد می‌شود.

تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح نمونه آزمون، رفتاری از خوردگی یکنواخت را نشان می‌دهد؛ به جز در برخی موقعیت‌های اندک از سطح مطابق با مرکز شکل ۱۳ که اندک حفره جزئی و کم عمق مشاهده می‌شود. منحنی طیف سنجی پراش انرژی (EDS) از مساحتی از سطح نمونه خوردگی در SZ در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مقدار بسیار ناچیزی اکسیژن در سطح وجود دارد که این مقدار نمی‌تواند به تشکیل یک فیلم اکسیدی کامل و ضخیم در سطح مربوط باشد. همین رفتار در نواحی دیگر جوش مشاهده شد. به عبارت دیگر عمده انرژی از یک سطح فلزی عاری از لایه اکسیدی مقاوم پراش یافته است. در این الگوی پراش، اثری از وجود کلراید مشاهده نمی‌شود؛ در حالی که در رسوبات خوردگی موجود در الکترولیت، کلرید آهن آبدار شناسایی شد. این نشان می‌دهد در حالت خوردگی

### ۳-۳- تحلیل رفتار خوردگی الکتروشیمیایی

جهت ارزیابی رفتار اولیه خوردگی الکتروشیمیایی قبل از آزمون تافل، آزمون پلاریزاسیون سیکنی روی سطح SZ و فلز پایه انجام شد. این منحنی اطلاعاتی از نحوه تشکیل لایه رویین، نحوه محافظت آن و همچنین استعداد به ایجاد خوردگی حفره‌ای در اختیار قرار می‌دهد. بررسی نمونه‌های مورد نظر نشان داد که تقریباً هیچ لایه رویین /شبه رویینی که بتواند سطح را در مقابل حملات خوردگی در ناحیه آندی (در اختلاف پتانسیل‌های بالاتر نسبت به پتانسیل مدار باز (OCP) حفاظت نماید، تشکیل نگردیده است. این گونه رفتار در انطباق با رفتار خوردگی فولادهای HSLA تشخیص داده شد که در آن با افزایش پتانسیل آندی شدت جریان خوردگی همچنان افزایش می‌یابد [۲۰]. همچنین تقریباً هیچ حلقه پسماندی که حاکی از وجود خوردگی حفره‌ای باشد مشاهده نشد.

جهت تحلیل رفتار خوردگی و مکانیزم‌های احتمالی، رسوبات خوردگی محلول الکترولیت مورد پراش سنجی اشعه ایکس (XRD)، قرار گرفت. قبل از این بررسی، رسوبات نمک طعام (NaCl) فوق اشباع موجود در محلول به کمک فروشویی و تصفیه به کمک فیلتر سانتریفیوژ برطرف شد. شکل ۱۲ الگوی



شکل ۱۵ - مقایسه منحنی پلاریزاسیون تافل مربوط به مرکز SZ و BM (نسبت به الکترومد مرجع کالومل اشباع) در سرعت پیشروی 20mm/min

جدول ۲- داده های استخراج شده از نمودارهای تنش و کرنش جوش و فلز پایه

شرایط نمونه	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation at break(%)	UTS weld/UTS BM (%)	Ys weld/Ys BM (%)
FSW ω(500)-V(10)	661±3	737±1	9.8±0.5	86.4±0.1	84±0.5
FSW ω(500)-V(20)	639±12	751±6	10.1±0.1	88.1±0.7	81±1.5
BM	787±6	853±3	21.6±0.4		

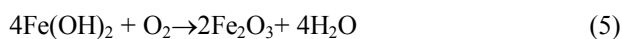
جدول ۳- داده های بدست آمده از منحنی پلاریزاسیون نواحی مختلف جوش و فلز پایه (نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع)

موقعیت	i.corr (μA/cm <sup>2</sup> )	Beta C(mV/dec)	Beta A(mV/dec)	CR (mpy)	OCP (mV)	E corr (mV)
مرکز SZ	140	-204	171	64	-555	-560
BM	126	-335	256	58	-607	-611

رابطه (۳) و (۴) تشکیل شوند [۲۳]:



کلریدهای آهن ناپایدار در تماس با آب هیدرولیز شده و تشکیل  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  و اسید کلریدریک می‌دهد. هیدروکسید آهن طی واکنش زیر در تماس با الکتروولیت (خارج از سطح واکنش خوردگی) به گونه‌های اکسیدی آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  یا  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) تبدیل می‌شوند [۲۴]:



از آنجا که در تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح خوردگی، هیچ گونه خوردگی ترجیحی (در مقیاس اندازه دانه) مشاهده نمی‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در SZ، تفاوت ریزساختار بینیت پایینی و گرانوله نمی‌تواند باعث ایجاد اختلاف پتانسیل خوردگی شود.

نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل مربوط به نواحی SZ و BM در منحنی پلاریزاسیون آندی - کاتدی در شکل ۱۵ مقایسه شده است. نتایج داده های بدست آمده از این منحنی نیز در جدول ۳ خلاصه شده است. مقایسه نرخ خوردگی نواحی مختلف نشان می‌دهد که BM و SZ دارای نرخ نسبتاً مشابهی هستند. البته وجود اختلاف حدود ۵۰mv پتانسیل خوردگی SZ نسبت به BM نشان می‌دهد در شرایط خوردگی گالوانیکی، این اختلاف پتانسیل نسبتاً زیاد می‌تواند مقاومت به خوردگی ضعیف‌تری را

یکنواخت، یون کلر از طریق واکنش با کاتیون‌های آهن موجود در لایه دوگانه فصل مشترک فلز-الکتروولیت و از سویی کاهش نرخ دسترسی به اکسیژن (در حضور کلرید سدیم میزان انحلال اکسیژن در آب کاسته می‌شود [۲۱])، از ایجاد لایه اکسیدی محافظ ممانعت به عمل می‌آورد. بدین طریق کاتیون‌های آهن پس از انحلال بدون وجود لایه ممانعت کننده وارد الکتروولیت شده از طریق واکنش‌های بعدی به رسوبات آهن تبدیل می‌شوند. واکنش‌های مذکور را می‌توان این گونه پیش بینی نمود. در ابتدا انحلال آهن طی رابطه (۱) و احیای اکسیژن طی رابطه (۲) اتفاق می‌افتد. از آنجا که دسترسی به اکسیژن در حضور یون کلر محدود است واکنش کاتدی (۲) نمی‌تواند در ادامه نقشی در روند خوردگی داشته باشد.



یون‌های کلراید موجود در محلول که دارای قطبیت مشابه با OH- است در رقابت با یکدیگر، با کاتیون‌های  $\text{Fe}^{2+}$  واکنش می‌دهند و ترکیبات کلریدی آهن ناپایدار (محلول) تشکیل می‌شود [۲۲] که این نه تنها مانع از ادامه روند انحلال آهن نمی‌شود؛ بلکه واکنش را به سمت انحلال بیشتر پیش می‌برد. در این شرایط آنیون‌های کلریدی در رقابت با یون‌های هیدروکسیل هستند تا با کاتیون‌های آهن ایجاد شده در واکنش آندی ترکیب شوند و از این طریق ترکیبات کلرید آهن مطابق با

برای BM پدید آورد.

#### ۴- نتیجه گیری

از انجام جوشکاری FSW بر روی ورق فولادی A517(B) و تحلیل‌های متالورژیکی این نتایج حاصل شد. در محدوده پارامترهای مورد بررسی در ریزساختار جوش فاز ماتنریت تشکیل نشد. در اثر حرارت ناشی از جوشکاری، HAZ جوش دچار تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی شد. بر اساس نتایج آزمون XRD وجود پدیده پهن شدگی پیک در ناحیه SZ در مقایسه با BM نشان می‌دهد اگرچه ساختار تبلور مجدد شکل گرفته است، اما همچنان اثراتی از تغییر شکل برجا مانده است. در نتیجه تجزیه فاز ماتنریت یا فریت ویدمن اشتهاتن، استحکام و سختی در HAZ در مقایسه با BM و SZ به کمترین مقدار رسیده است و بنابراین باعث شکست نمونه‌های کشش از این ناحیه شده است. البته بررسی‌های سطح شکست نشان داد این شکست به دلیل حضور دیمپل‌های با توزیع دوگانه (درشت و کوچک)، از نوع شکست نرم است. بر پایه نتایج حاصل از آزمون خوردگی الکتروشیمیایی تافل و سیکلی و همچنین مشاهدات SEM از سطح نمونه خوردگی مشخص گردید که در نمونه جوشکاری شده و فلز پایه در محلول حاوی ۳/۵ درصد وزنی NaCl هیچ لایه اکسید مقاومی تشکیل نمی‌شود و بر این اساس مکانیزم خوردگی پیشنهاد گردید. خوردگی از نوع یکنواخت می‌باشد که قطعاً حضور یون کلر در این رفتار نقش داشته است. نتایج بدست آمده از منحنی پلاریزاسیون تافل نشان می‌دهد که با وجود مشابهت نرخ خوردگی BM و SZ به دلیل وجود اختلاف حدود ۵۰mv پتانسیل خوردگی، در شرایط گالوانیکی مقاومت به خوردگی پایین تری برای فلز پایه پیش بینی می‌شود.

#### منابع

- 1- R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Mater. Sci. Eng., Vol. R 50, pp. 1-78, 2005.
- 2- H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata, K. Nogi, "Friction stir welding of carbon steels", Mater. Sci. Eng., Vol. A429, pp. 50-57, 2006.
- 3- Y.S. Sato, T.W. Nelson, C.J. Sterling,
- 4- M. Ghosh, M.D.M. Husain, K. Kumar, S.V. Kailas, "Friction stir-welded dissimilar aluminum alloys: microstructure, mechanical properties, and physical state", J. Mater. Eng. Perform., Vol. 22, pp. 3890-3901, 2013.
- 5- L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nogi, "Friction stir welding of a high carbon steel", Scr. Mater., Vol. 56, pp. 637-640, 2007.
- 6- A.J. Ramirez, T.F.C. Hermenegildo, V.F. Pereira, J.A. Avila, T.F.A. Santos, P.R. Mei, L.P. Carvalho, R.R. Marinho, M.T.P. Paes, "Friction stir welding of steels for the oil and gas industry", Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, Osaka University, Japan, pp. 75-79, November 6-8, 2013.
- 7- H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata, K. Nogi, "Friction stir welding of carbon steel", Mater. Sci. Eng., Vol. A 429, pp. 50-57, 2006.
- 8- H.K.D.H. Bhadeshia, "Bainite in Steels", second Ed., IOM communication Ltd, London, March 2001.
- 9- R.W.K. Honeycombe, H.K.D.H. Bhadeshia, "Steels Microstructure and Properties", second Ed., London, Edward Arnold, 1995.
- 10- K.S. Vecchio, R.W. Hertzberg, "The influence of stacking fault energy on ductile fracture micromorphology", J Mater. Sci., Vol. 23, pp.2220-4, 1988.
- 11- F. Borrato, R. Barbosa, S. Yue, J.J. Jonas, "Effect of chemical composition on the critical temperatures of microalloyed steels". Thermec., Vol. 88, pp. 383-90, 1988.
- 12- A.K. Sinha, "Ferrous Physical Metallurgy", Boston, MA: Butterworth-Heinmann Publishers, pp. 818, March 1989.
- 13- B.E. Warren and B.L. Averbach, "The Separation of cold-work distortion and particle size broadening in X-Ray Patterns", J. Appl. Phys, Vol. 23, pp.497, 1952
- 14-G.K. Williamson and W.H. Hall, "X-ray line broadening from filed aluminum and wolfram", Acta Metall., Vol.1, pp. 22-31, 1953.
- 15- A.P. Reynolds, W.Tang, M. Posada and J. DeLoach, "Friction stir welding of DH36 steel", Science Technology of Welding and Joining, Vol.8, pp. 455-460, 2003.
- 16- P.J. Konkol, J.A. Mathers, "Characterization of friction stir weldments in 500 brinell hardness quenched and tempered steel", Fourth International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, UT, TWI, may (2003).
- 17-Y.C. Chen, H. Fujii, T. Tsumura, Y. Kitagawa, K. Nakata, K. Ikeuchi, K. Matsubayashi, Y. Michishita, Y. Fujiya, J. Katoh, "Banded structure and its distribution in friction stir processing of 316L austenitic stainless steel", J. Nucl. Mater., Vol.420, pp. 497-500, 2012.
- 18- S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S.

American Society of Metals, 1978.

22- P.R. Roberge, "Handbook of corrosion engineering", 1st ed., McGraw-Hill, NewYork ,1999

23- Y. Ma, Y. Li, F. Wang, "Corrosion of low carbon steel in atmospheric environment of different chloride content", Corrosion Science, Vol. 51, pp. 997-1006, 2009 .

24- J. Heuer and J. Stubbins, "An XPS characterization of FeCO<sub>3</sub> film from CO<sub>2</sub> corrosion", Corrosion Science, Vol. 41, pp. 1231-43 , 1999 . of resistance spot welded Fe-31Mn-3Al-3Si TWIP steel, Materials and Design 67 (2015) 571-576.

Hirano and M. Inagaki, "Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding", Scripta Mater. , Vol. 49, pp. 1175-1180, 2003 .

19- M. Imamn , R. Ueji, H. Fujii, "Microstructural control and mechanical properties in friction stir welding of medium carbon low alloy S45C steel" , Materials Science & Engineering , Vol.A 636, pp.24-34, 2015 .

20- K.S. Ghosh, D.K. Mondal, "Effect of grain size on mechanical electrochemical and hydrogen embrittlement behavior of a micro-alloy steel", Mater Sci. Eng., Vol. A 559, pp. 693-705, 2013 .

21-Dexter, S.C., "Metals Handbook", Vol. 1, 9th ed. ,