

## بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی ناحیه اتصال فولاد ساده کربنی جوشکاری شده با فرایند FCAW و مقایسه با فرایند GMAW

نوید خدابنده لو<sup>۱</sup> و حامد ثابت<sup>۱ و ۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹، ش.ص ۱-۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳)

### چکیده

در این تحقیق نمونه‌های از فولاد St37 با دو ضخامت ۴ و ۸ میلی‌متر با دو روش جوشکاری GMAW و FCAW جوشکاری شدند. نمونه‌ها با استفاده از سیم جوش‌های توپر و توپودری به ترتیب برای جوشکاری GMAW و FCAW با ترکیب شیمیایی نزدیک به هم اتصال داده شد. به منظور بررسی ریزساختار اتصال از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز EDS استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد، با افزایش ضخامت در هر دو روش جوشکاری از میزان فریت سوزنی در ساختار منطقه جوش کاسته شده و بر مقدار فازهای ویدمن اشتانن و فریت مرزدانه‌ای افزوده می‌شود. همچنین در فرآیند FCAW به علت مکان‌های مستعد جوانه‌زنی و تشکیل فریت سوزنی بیش‌تر نسبت به فرآیند GMAW، خواص مکانیکی بهتری مشاهده شد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد، بیش‌ترین مقدار خواص کششی در نمونه به ضخامت ۴ میلی‌متر و با روش جوشکاری FCAW به دست می‌آید. نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی نشان داد، بیش‌ترین مقدار سختی در منطقه جوش و متاثر مربوط به نمونه با ضخامت ۴ میلی‌متر و جوشکاری شده با روش FCAW است. از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کم‌ترین میزان آخال در منطقه جوش، در نمونه با ضخامت ۴ میلی‌متر و جوشکاری شده توسط روش GMAW مشاهده شد. نتایج حاصل از شکست نگاری نمونه‌های آزمون ضربه نشان داد، با افزایش ضخامت ورق در هر دو روش جوشکاری سطح شکست نمونه‌ها، ویژگی‌های یک شکست ترد را از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ضخامت، فریت سوزنی، فولاد St-37، GMAW، FCAW.

<sup>۱</sup> - مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

<sup>۲</sup> - دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

\*-نویسنده مسئول مقاله: h-sabet@Kiau.ac.ir

## بیشگفتار

فولادهای ساده کربنی، یکی از پرکاربردترین مواد فلزی مورد استفاده در صنایع مختلف نظیر نفت و پتروشیمی، صنعت حمل و نقل زمینی، صنایع شیمیایی و به ویژه صنعت ساختمان می‌باشند [۱].

اصولا در فولادهای ساده کربنی با افزایش درصد کربن خواصی از قبیل چقرمگی و قابلیت جوش پذیری کاهش و در مقابل استحکام افزایش می‌یابد [۲]. به همین منظور پژوهش‌های گسترده‌ای توسط محققین مختلف روی جوشکاری و بررسی انجماد فلز جوش، ریزساختار فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، استحاله‌های فازی و ناپیوستگی‌های جوشکاری صورت گرفته است [۳ و ۲]. به طور کلی فولادهای ساده کربنی با تمام روش‌های جوشکاری قابل اتصال می‌باشند. فرایند جوشکاری GMAW به دلیل نفوذ بالا و امکان اتصال مقاطع با ضخامت‌های مختلف و با قابلیت ماشینی شدن هم اکنون به طور گسترده‌ای در صنایع لوله سازی، تولید خطوط لوله و صنایع اتومبیل سازی کاربرد دارد [۴]. از طرفی فرایند جوشکاری FCAW به دلیل نرخ رسوب بالا و احتمال جوشی با خواص مکانیکی بهتر و یکنواخت‌تر نسبت به سایر روش‌ها در ضخامت‌های بالا، اخیرا موضوع بسیاری از پژوهش‌ها قرار گرفته است. هنگامی که در فرایند جوشکاری FCAW، از گاز محافظ استفاده گردد، شرایط فرایند مشابه جوشکاری GMAW می‌شود. در یک مقایسه مقدار فاکتور موثر ( $\eta$ ) حرارت ورودی در روش GMAW و FCAW نزدیک به هم و کم‌تر از روش SMAW می‌باشد. ثابت شده است تغییر حرارت ورودی در جوشکاری، سبب به وجود آمدن ساختارهای متفاوت و ایجاد جوش با شکل ظاهری متفاوتی می‌شود. از سوی دیگر زمان و نرخ سرد شدن فلز نیز یک نقش اصلی بر توسعه ریزساختار در هر دو منطقه جوش و متأثر از حرارت بازی می‌کند، لذا مطالعه دقیق تغییرات زمان سرد شدن در این دو نوع روش جوشکاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لازم به ذکر است که مهم‌ترین عامل موثر بر خواص مکانیکی فلز جوش، ریز ساختار میکروسکوپی می‌باشد که خود تابعی از حرارت ورودی و نرخ سرد شدن می‌باشد [۵-۷].

زمان سرد شدن از ۸۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت عنوان زمان  $t_{8/5}$  تعریف می‌شود. گستره دما به این دلیل انتخاب می‌شود که استحاله ساختاری را شامل می‌شود و زمان می‌تواند به راحتی به دیاگرام TTT انتقال یابد. متغیرهای مؤثر بر  $t_{8/5}$  شامل ضخامت ورق، هندسه جوشکاری (نوع اتصال)، حرارت ورودی مؤثر و دمای پیش‌گرم و بین پاسی می‌باشد [۵]. مانگوانان [۷] نشان داد در جوشکاری فولادهای ریز دانه، حرارت ورودی تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی اتصال جوش دارد. پژوهش‌های صورت گرفته در این راستا نشان می‌دهد، افزایش حرارت ورودی، سبب درشت شدن دانه‌ها و کاهش خواص مکانیکی اتصال جوش می‌شود [۸].

تاکنون پژوهش‌های زیادی در ارتباط با اثر متغیرهایی چون جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری انجام شده است و نتایج حاصل از این تحقیقات حاکی از تأثیرات اساسی این متغیرها روی شکل ظاهری و خواص مکانیکی اتصالات است [۹ و ۱۰]. تواری [۱۱] نشان داد، مقدار حرارت ورودی بر عمق نفوذ تأثیر گذار است و بیش‌ترین مقدار عمق نفوذ در یک مقدار مشخص از حرارت ورودی اتفاق می‌افتد. کم‌تر و بیش‌تر از این مقدار، عمق نفوذ کاهش می‌یابد. در پژوهش دیگری گادالله [۱۲] تأثیر ترکیبات گاز محافظ بر فولاد ساده کربنی توسط جوشکاری FCAW بررسی کرد. نتایج آن تحقیق نشان داد، ترکیبات گاز محافظ اثر قابل توجه‌ای در ثبات قوس، نرخ رسوب و خواص مکانیکی جوش فولاد ساده کربنی دارد. چنانچه [۶] نیز اثر حرارت ورودی در جوشکاری GMAW را روی سختی فولاد کربنی بررسی کرد و نشان داد، با افزایش حرارت ورودی جوش، سختی در تمام مناطق جوش و فولاد پایه افت می‌کند.

در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با جوشکاری فولادهای کربنی به روش GMAW و FCAW اثر ضخامت ورق جوشکاری و نوع فلز پرکننده (توپودی و توپیر) کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو تحقیق حاضر در نظر دارد، اثر ضخامت و نوع فلز پرکننده را بر نرخ سرد شدن ناحیه اتصال نمونه‌های جوشکاری شده به دو روش جوشکاری GMAW و FCAW بررسی نماید. ترکیب شیمیایی سیم جوش‌ها در روش GMAW و FCAW نزدیک به یکدیگر است و تنها

بررسی قرار گرفت و میزان درصد حجمی فازهای تشکیل شده با استفاده از نرم افزار آماری Image J محاسبه شد. آزمایش ضربه نیز مطابق استاندارد ASTM E23 صورت گرفت. همچنین برای بررسی دقیق تر سطح ناحیه اتصال و شکست نگاری نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo مجهز به آنالیز EDS<sup>۳</sup> تحت ولتاژ ۲۰ کیلو ولت استفاده شد. همچنین با استفاده از رابطه (۱) و (۲) حرارت ورودی جوشکاری و  $t_{8/5}$  محاسبه شد [۱۳و۵].

$$E = \eta \frac{VI}{S} \quad (1)$$

$$\Delta t_{8-5} = \frac{q/v}{2\pi\lambda\theta_1} \quad (2)$$

که در آن  $q/v$  انرژی مؤثر ورودی به فلز پایه بر حسب  $J/m$ ،  $\lambda$  ضریب جابجایی حرارتی  $W/m^2K$  و  $\theta_1$  پارامتر دمایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{\theta_1} = \left( \frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0} \right) \quad (3)$$

$$T_0 = 210CE + 15/-45 \quad (4)$$

ضریب  $\eta$  در رابطه ۱، ضریب بازدهی جوشکاری است که برای جوشکاری GMAW برابر ۰/۷ و برای جوشکاری FCAW برابر ۰/۸ در نظر گرفته شد [۱۴و۵].  $E$  حرارت ورودی،  $I$  برابر جریان جوشکاری،  $V$  ولتاژ جوشکاری و  $S$  سرعت جوشکاری است. همچنین  $T_0$  دمای پیشگرم بر حسب درجه کلون می باشد.

تفاوت بین آن‌ها در نوع توپودری و توپر بودن آن‌ها می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ورق فولادی St37 با ضخامت‌های ۴ و ۸ میلی‌متر به منظور بررسی اثر ضخامت بر سرعت سرد شدن استفاده شد. جدول شماره ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در جوشکاری را نشان می‌دهد. برای انجام تحقیق نمونه‌هایی با ابعاد  $10 \times 20$  میلی‌متر توسط وایر کات بریده و سطح هر نمونه توسط سنباده کاربرد سیلیکونی آماده سازی شد، سپس ناحیه اتصال ورق‌ها به وسیله چربی‌گیری توسط بخار و اولتراسونیک تمیزکاری شد. جوشکاری با طرح اتصال بر اساس استاندارد AWS D1.1 پخ جناغی دو طرفه با زاویه ۴۵ (Bevel V GROOVE) با الکتروود ER70S-6 (استاندارد AWS 5.18) برای جوشکاری FCAW و فلز پرکننده T1 MJ (استاندارد AWS/ASME SFA-5.20) برای روش GMAW مطابق شرایط جدول ۲ انجام شد.

بررسی استحکام کششی نمونه‌ها، توسط آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 از هر کد (S1، S2 و ...)، سه نمونه آماده شد و نتایج به صورت میانگین گزارش شد. همچنین آزمون کشش با استفاده از دستگاه Instron 4486 در دمای محیط و با نرخ کرنش ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. تعیین مقدار سختی ناحیه اتصال، توسط آزمون ریزسختی سنجی تحت بار ۵۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بر اساس استاندارد ASTM E-384 توسط دستگاه Koopa انجام گرفت. خواص و ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX51M (بعد از حکاکی با محلول نایتال ۲٪) مورد

جدول ۱- درصد(وزنی) عناصر موجود در فلز پایه و فلز جوش

عنصر	% Fe	% C	% Mn	% Si	% S	% P
فلز پایه	۹۸/۷۴	۰/۰۷	۰/۵۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۷
سیم جوش توپر	۹۷/۸۳	۰/۰۶	۱/۴۶	۰/۶۵	۰/۰۲۶۱	۰/۰۱۹۳
فیلر توپودری	۹۷/۹۵	۰/۰۹	۱/۲۸	۰/۶۸	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵۲

جدول ۲- مشخصات و متغیرهای جوشکاری

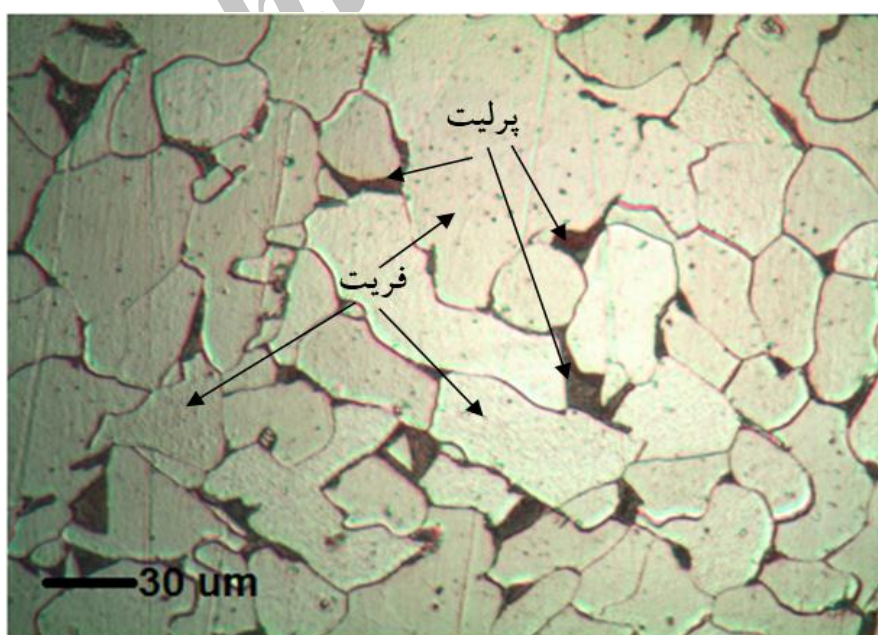
کد نمونه	ضخامت (mm)	تعداد پاس	روش جوشکاری	گاز محافظ	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)
S1	۴	۲	GMAW	CO <sub>2</sub>	۱۰۰	۱۳	۰/۹۱
S2	۸	۲	GMAW	CO <sub>2</sub>	۱۴۰	۱۶	۱
S3	۴	۲	FCAW	CO <sub>2</sub>	۱۰۰	۱۳	۰/۹۱
S4	۸	۲	FCAW	CO <sub>2</sub>	۱۴۰	۱۶	۱

## نتایج و بحث

نمونه‌های فولاد St37 در دو ضخامت ۴ و ۸ میلی‌متر استفاده شد را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز نتایج آنالیز شیمیایی فلز جوش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز جوش در هر دو ضخامت یکسان می‌باشد. درصد مختلف فازهای تشکیل شده در هر دو روش جوشکاری در نمونه‌های آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است.

شکل ۱ ریزساختار فلز پایه (فولاد St37) را نشان می‌دهد. ریزساختار فلز پایه شامل فریت و پرلیت با اندازه دانه میانگین ۵۰ میکرومتر است. جدول ۳،  $t_{8/5}$  محاسبه شده برای نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.

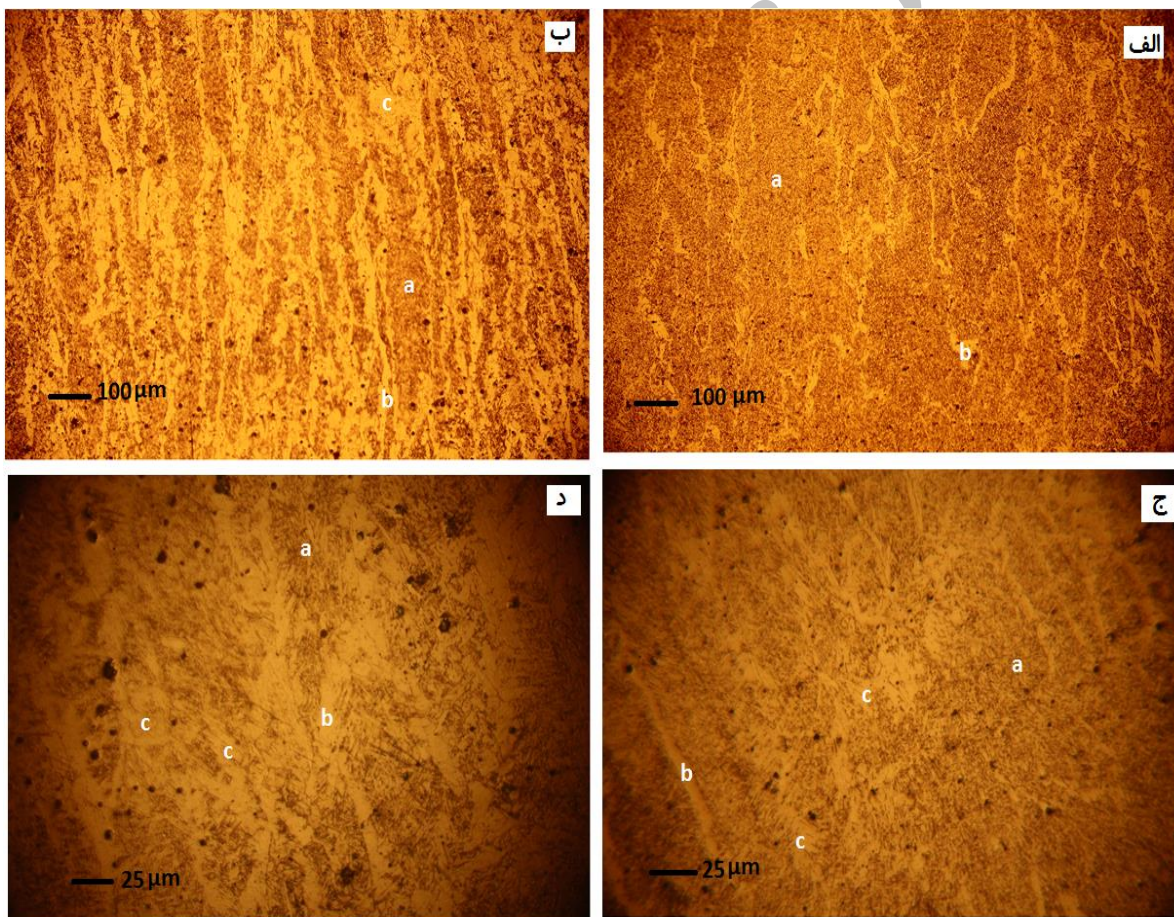
شکل ۲ ریزساختار منطقه فلز جوش فلز پر کننده توپر (جوش GMAW) که به منظور پر کردن درز اتصال



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی از سطح فولاد St37

جدول ۳-  $t_{8/5}$  محاسبه شده برای نمونه‌های جوشکاری شده با فلز پر کننده نوع توپر

شماره نمونه	کربن معادل	دمای پیش گرم محاسبه شده (K)	انرژی موثر ورودی به فلز پایه (Kj/mm)	$t_{8/5}$ (S)
S1	۰/۳۳	۳۴۳	۱	۱۰/۱۴
S2	۰/۳۳	۳۴۳	۱/۵۶۸	۱۵/۹
S3	۰/۳۳	۳۴۳	۱/۱۴۲	۱۱/۵۹
S4	۰/۳۳	۳۴۳	۱/۷۹۲	۱۸/۱



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز جوش حاصل از سیم جوش توپر (روش GMAW): (الف) نمونه S1: ۴ میلی‌متر ضخامت، (ب) نمونه S2: ۸ میلی‌متر ضخامت، (ج) و (د) به ترتیب نمونه S1 و S2 با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر، (a): فریت سوزنی و بینیت، b: فریت مرزدانه ای و c: فریت ویدمن اشتاتن)

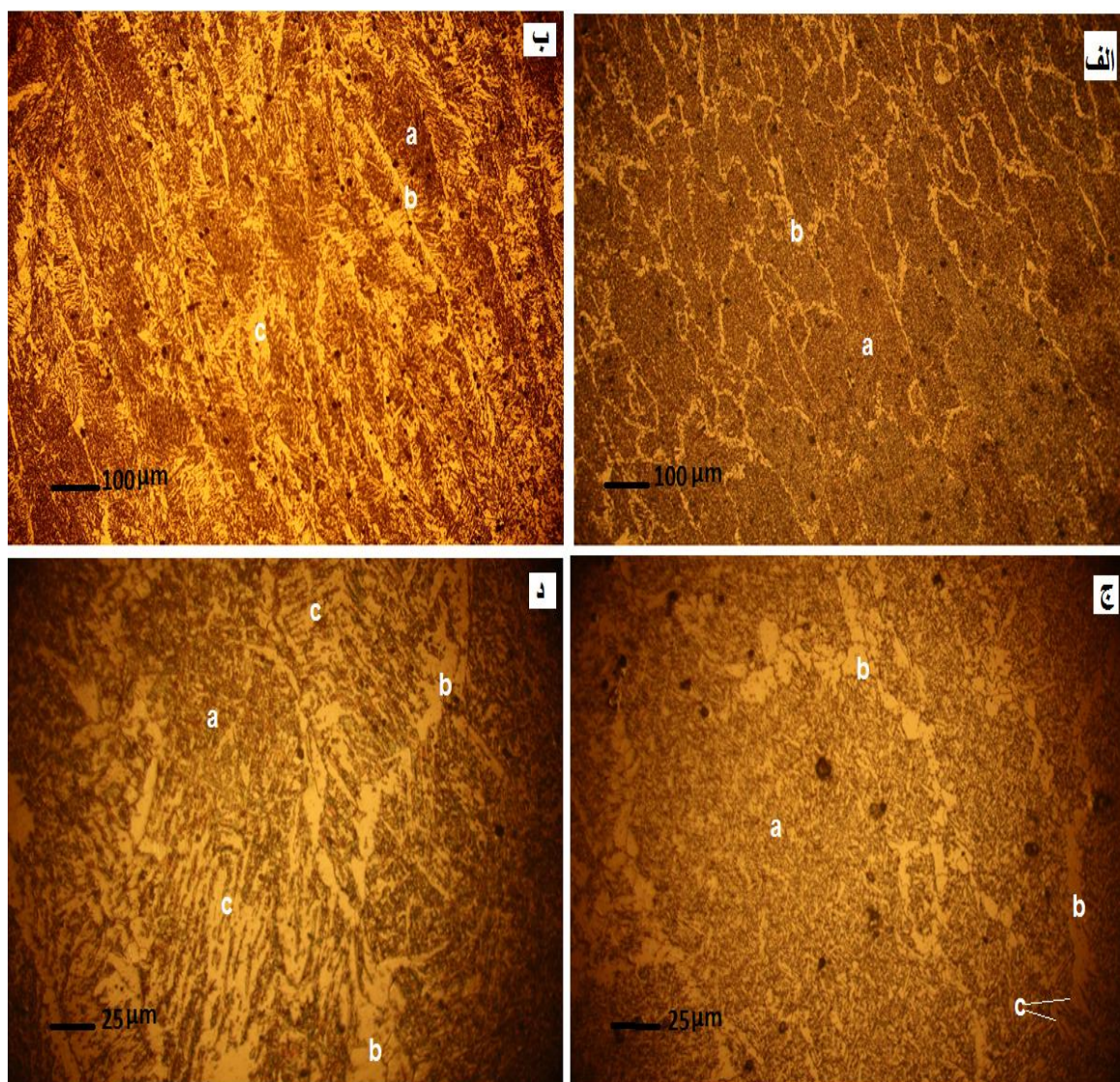
جدول ۴- درصد فازهای مختلف تشکیل شده در منطقه جوش

نوع فاز کد نمونه	تعداد پاس	نوع الکتروود	فریت سوزنی و بینایت	فریت مرزدانه ای	فریت ویدمن اشتاتن	آخال و حفره
S1(4mm)	۲	توپر	۹۰٪	۶٪	۳٪	۱٪
S2(8mm)	۲	توپر	۶۵٪	۱۹٪	۱۴٪	۲٪
S3(4mm)	۲	توپودری	۹۴٪	۲٪	۱٪	۳٪
S4(8mm)	۲	توپودری	۸۷٪	۵٪	۴٪	۴٪

چگالی نسبتا بالایی از نایجاییها و ذرات فاز دوم است، می‌شود [۱۶ و ۱۵].

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه جوش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر می‌توان به روشنی دریافت، میزان آخال‌های اکسیدی در نمونه‌های جوشکاری شده با روش FCAW نسبت به روش GMAW بیشتر می‌باشد. بیشترین مقدار آخال در نمونه S4 مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر متالوگرافی بیشترین مقدار فریت سوزنی در نمونه S2 مشاهده شد. شکل ۵ تصویر حاصل از متالوگرافی نمونه S2 با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. انواع فازهای موجود تشکیل دهنده ناحیه جوش در شکل ۵ نشان داده شده است. نقاط کروی شکل تیره رنگ آخال‌های ناشی از عملیات جوشکاری می‌باشد. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری از آخال موجود در نمونه S2 را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آنالیز عنصری، اکسیدی بودن ماهیت این آخال‌ها تایید می‌شود. آخال‌ها مکان‌هایی مستعد برای جوانه زنی فریت سوزنی می‌باشند [۱۷ و ۱۸].

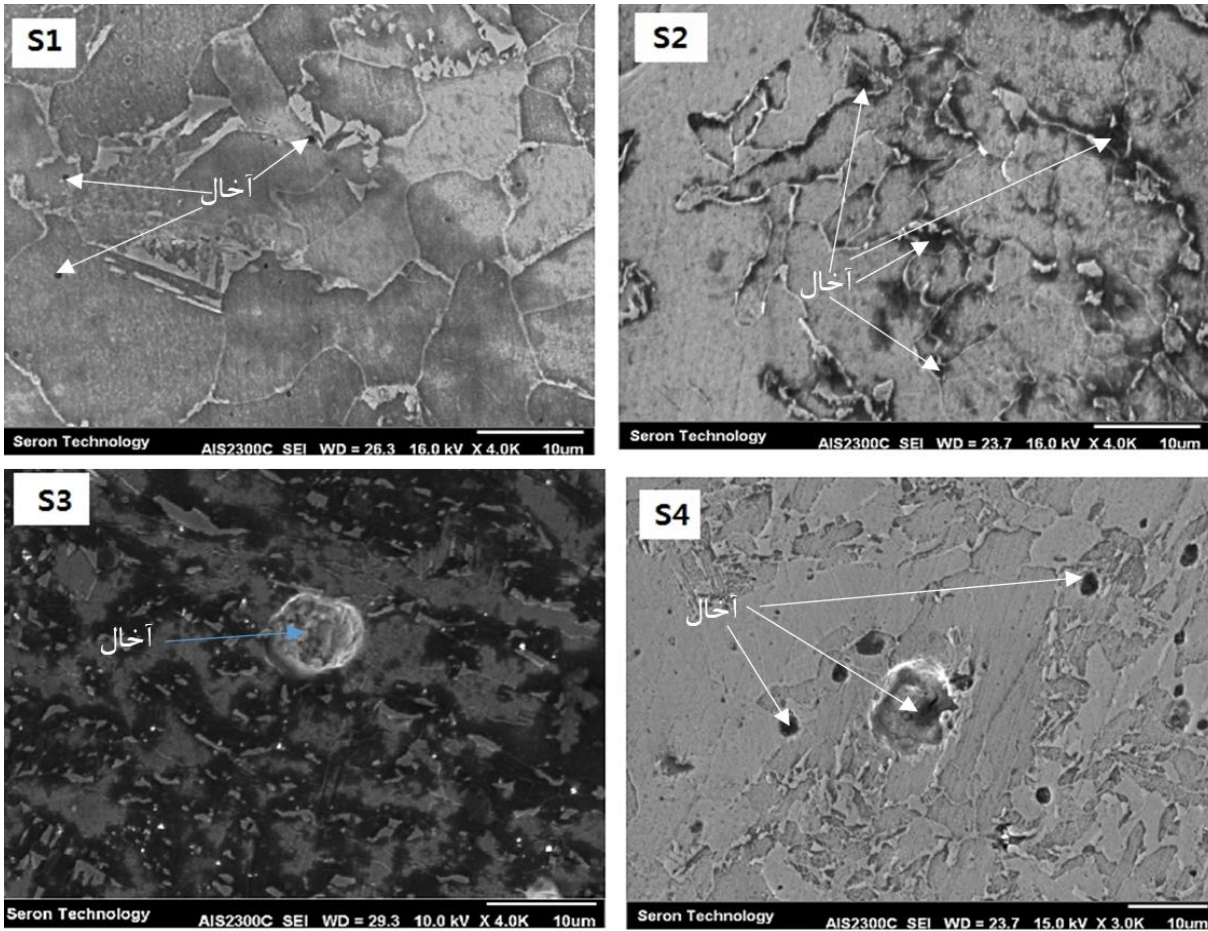
همان‌گونه که در تصویر میکروسکوپ نوری شکل ۲- (ج) و (د) مشاهده می‌شود، با تغییر ضخامت ورق در جوشکاری GMAW، میزان فریت اولیه و فریت ویدمن اشتاتن نیز تغییر می‌کند، بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که با کاهش  $t_{8/5}$ ، ساختار از فریت ویدمن اشتاتن و فریت مرزدانه‌ای به فریت سوزنی و بینایت تبدیل می‌شود. با توجه به شکل ۲ در اثر تغییر ضخامت از ۴ به ۸ میلی‌متر، از مقدار فاز تیره کاسته و به مقدار فاز با رنگ روشن افزوده شده است. در سیم جوش توپر درصد منگنز بیشتر از فیلر توپودری دارد که سبب انتقال منحنی CCT<sup>۴</sup> به سمت راست و جلوگیری از تشکیل پرلیت و کاهش دمای تبدیل آستنیت به فریت می‌شود. شکل ۳ اثر تغییر ضخامت فلز پایه و افزایش حرارت ورودی در ریزساختار ناحیه جوش در جوشکاری FCAW را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار فریت مرزدانه‌ای و ویدمن اشتاتن با افزایش  $t_{8/5}$  افزایش یافته است. میزان فاز فریت سوزنی در نمونه S4 که با روش FCAW جوشکاری شده نسبت به نمونه S2 (S2 و S4 دارای ۸ میلی‌متر ضخامت) که به روش GMAW جوشکاری شده است بیشتر است. از دلایل آن می‌توان به وجود تعداد آخال‌های موجود در منطقه جوشکاری شده و مقدار منگنز بیشتر سیم جوش توپودری نسبت به توپر است. منگنز باعث تشویق تشکیل ریز ساختار فریت سوزنی که حاوی



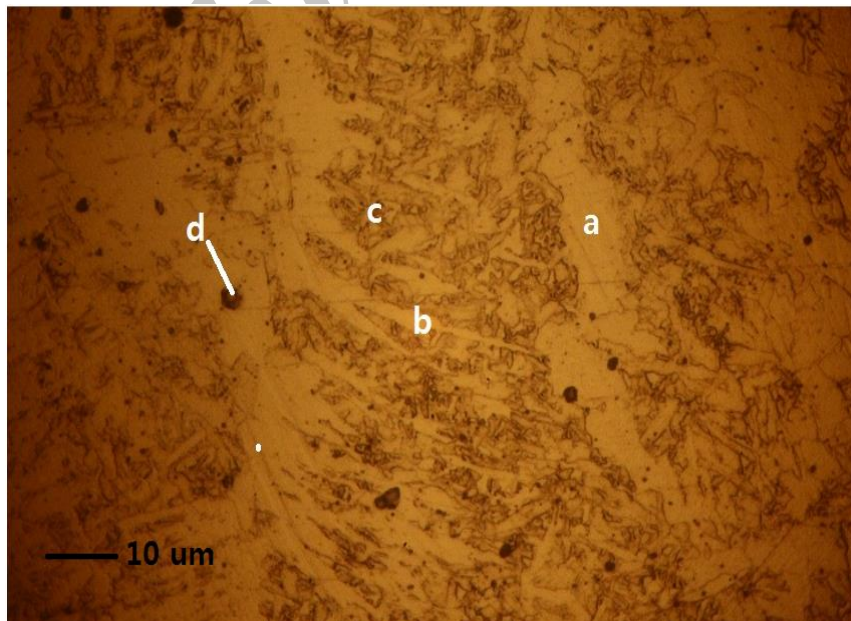
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز جوش حاصل از سیم جوش توپودری (روش FCAW): (الف) نمونه S3: ۴ میلی‌متر ضخامت، (ب) نمونه S4: ۸ میلی‌متر ضخامت، (ج) و (د) به ترتیب نمونه S3 و S4 با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر،  
 a: فریت سوزنی و بینیت، b: فریت مرزدانه ای و c: فریت ویدمن اشتاتین

فیلر توپودری در نمونه جوشکاری شده به روش FCAW نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده با روش GMAW نسبت داد. همچنین با افزایش ضخامت و افزایش عدد سختی برای هر دو روش جوشکاری کاهش یافته است. کاهش سرعت سرد شدن و افزایش حرارت ورودی در نمونه‌ها با ضخامت ۸ میلی‌متر از دلایل افت سختی می‌باشد.

نمودار تغییرات سختی شامل فلز جوش، منطقه متأثر از جوش و سختی فلز پایه برای چهار نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که سختی نمونه‌های جوشکاری شده به روش FCAW در یک ضخامت ثابت، به مراتب بیشتر از سختی نمونه‌های حاصل از GMAW است که با نزدیک شدن به مرز جوش در ناحیه اتصال این سختی بیشتر می‌شود که می‌توان آن را به وجود آخال‌ها، فریت سوزنی ریزدانه و کربن بیشتر

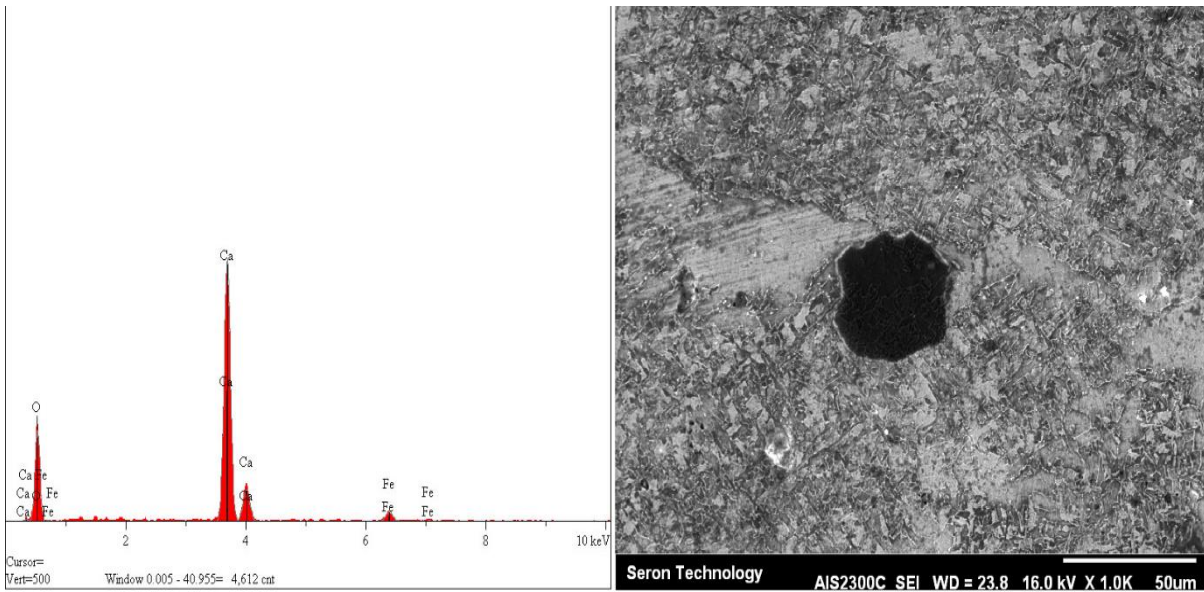


شکل ۴- تصاویر SEM از فلز جوش نمونه ها، S1 و S2: فلز جوش حاصل از سیم جوش توپر به ترتیب با ضخامت ورق ۴ و ۸ میلی متر، S3 و S4: فلز جوش حاصل از سیم جوش توپودری به ترتیب با ضخامت ورق ۴ و ۸ میلی متر

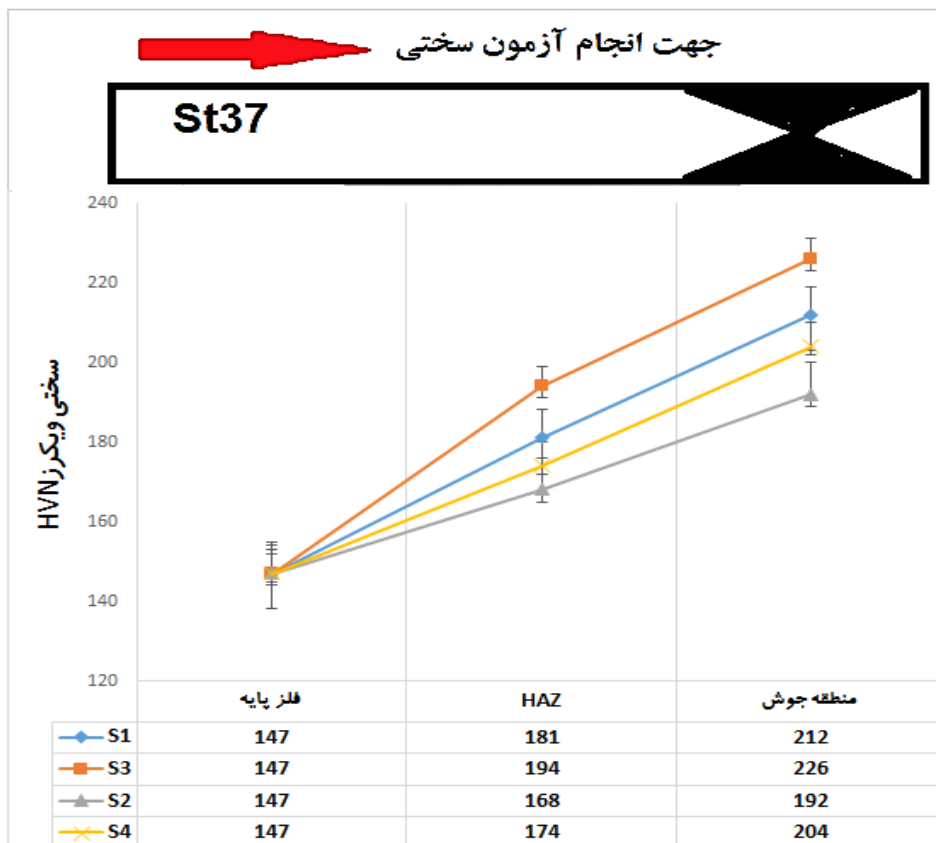


شکل ۵- تصویر متالوگرافی از ناحیه جوش نمونه S2: a: فریت مرزدانه ای، b: فریت ویدمن اشتاتن، c: فریت سوزنی و بینایت و d: آخال اکسیدی





شکل ۶- تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ناحیه جوش نمونه S2 به همراه آنالیز عنصری از آخال نشان داده شده در تصویر



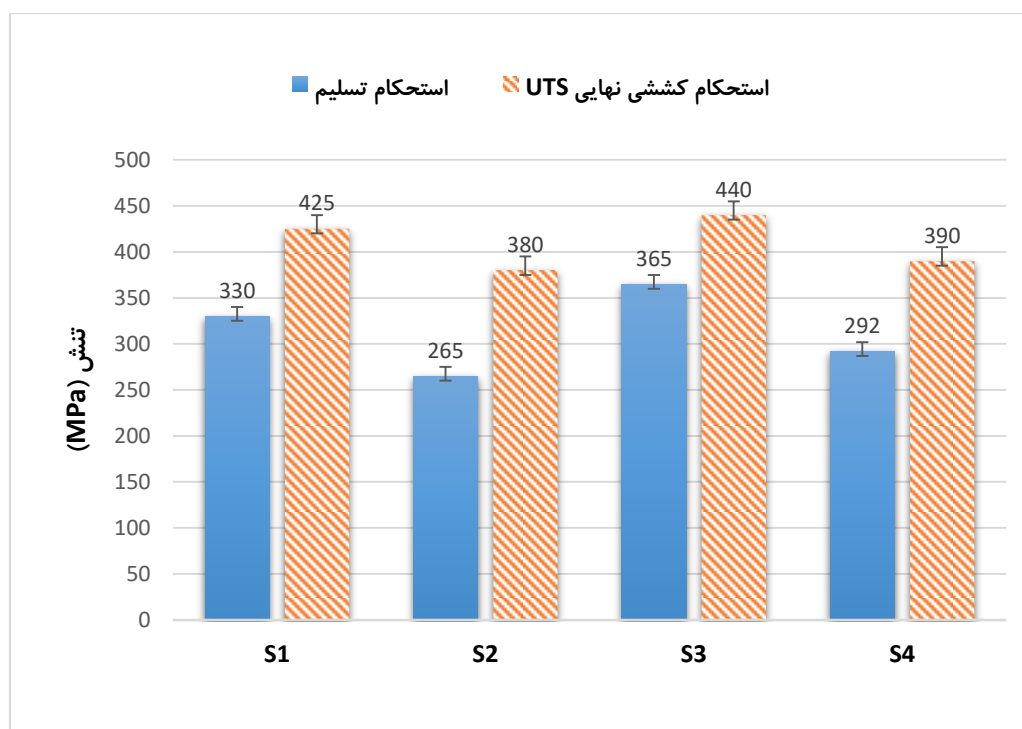
شکل ۷- نتایج آزمون سختی از نمونه های جوشکاری شده فولاد St37

ضربه تاثیر می‌گذارند و موجب کاهش انرژی ضربه می‌شوند. لذا دور از انتظار نیست که نمونه S2 انرژی ضربه کمتری نسبت به نمونه S1 داشته باشد. کاهش فریت سوزنی و در پی آن افزایش فریت ویدمن اشتاتن را می‌توان توسط نمودار شماتیک CCT که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، بررسی نمود. به طور کلی افزایش نرخ سرد شدن میزان فازهای سخت مثل مارتنزیت و بینیت را افزایش می‌دهد. به بیان دیگر افزایش نرخ سرد شدن افزایش سختی را در پی دارد. صفحات ویدمن اشتاتن هنگامی به وجود می‌آیند که فولاد سریع‌تر از حالت تعادلی سرد شود. این سریع سرد شدن تشکیل فریت ویدمن اشتاتن را تشویق می‌کند. بنابراین طبق نمودار فوق با افزایش نرخ سرد شدن نمودار CCT به سمت فازهای سخت‌تر متمایل شده، از میزان فریت سوزنی کاسته شده و مقدار فریت ویدمن اشتاتن افزایش می‌یابد [۴].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱-الف سطح شکست برای نمونه S1 شامل دیمپل‌های بزرگ و عمیق است که نشان می‌دهد، نمونه تحت اعمال فشار کششی در حالتی انعطاف پذیر شکسته است و نشان دهنده شکست کاملاً نرم این نمونه است. شکل ۱۱-ب سطح شکست نمونه S3 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل از عمق دیمپل‌ها کاسته شده است که با نتایج آزمون ضربه مطابقت دارد. شکل ۱۱-ج و شکل ۱۱-د به ترتیب سطح شکست نمونه‌های S2 و S4 را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر مشخص می‌شود، سطح شکست در این دو نمونه به صورت نیمه ترد بوده و تنها در قسمت‌هایی از سطح نمونه S4 شکل ۱۱-ج شمایل یک شکست نرم را می‌توان مشاهده کرد و بیش‌تر آثار شکست بین دانه‌ای را مشاهده نمود.

نتایج آزمایش کشش مربوط به فلزهای پایه و اتصال نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل خواص کششی نمونه‌های جوشکاری شده با ضخامت ۴ میلی‌متر بیش‌تر از نمونه‌های جوشکاری شده با ضخامت ۸ میلی‌متر در هر دو روش جوشکاری می‌باشد. سماوی و همکارانش نشان دادند که بین ضخامت و استحکام کششی یک رابطه مشخصی وجود دارد و با کاهش ضخامت استحکام کششی افزایش می‌یابد [۱۹]. برگ نیز نشان داد، در اثر افزایش ضخامت ورق از ۱۲/۵ به ۸۰ میلی‌متر استحکام به مقدار ۴۰ درصد کاهش می‌یابد [۲۰]. همچنین دلیل افزایش استحکام کششی در نمونه‌های جوشکاری شده با روش FCAW مقدار منگنز بیش‌تر این سیم جوش نسبت به سیم جوش توپر است. منگنز با ریزکردن پرلیت و ایجاد محلول جامد با فریت، موجب افزایش استحکام تسلیم فولادهای ساده کربنی می‌شود [۱۶].

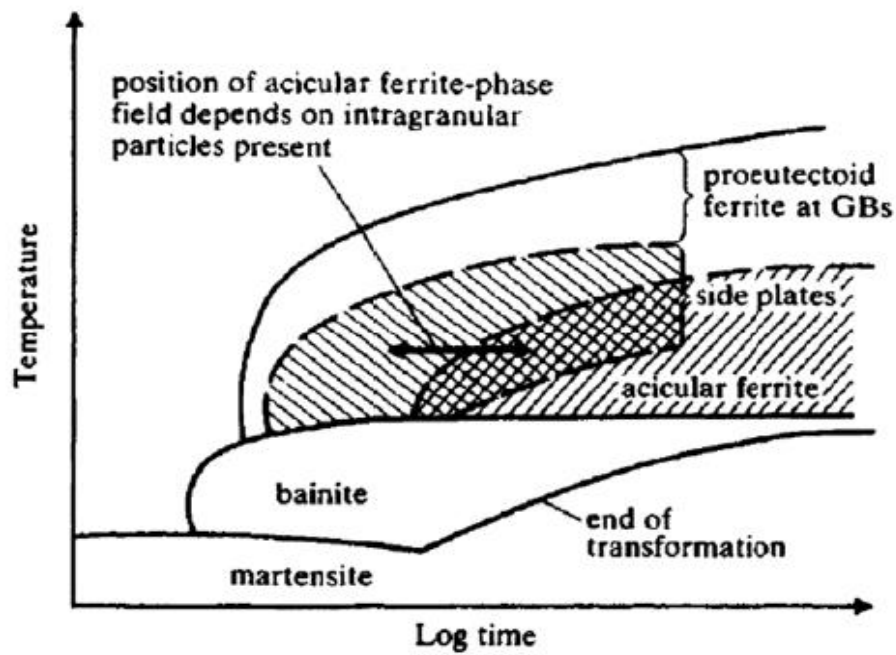
میزان انرژی جذب شده فلز جوش و منطقه HAZ در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، انرژی جذب شده فلز جوش در اتصال نمونه‌ها با ضخامت ۴ میلی‌متر بیش‌تر از نمونه‌هایی آزمایش با ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. فریت‌های سوزنی دلیل افزایش انرژی ضربه در جوش و فریت ویدمن اشتاتن دلیل افزایش سختی در جوش می‌باشد [۲۱ و ۴]. فریت‌های سوزنی از آنجا که بسیار ریز هستند، مانع از رشد ترک می‌شوند؛ اما فریت‌های ویدمن اشتاتن و مرزدانه‌ایی به دلیل مورفولوژی بزرگ‌تر و ساختاری پیوسته در امتداد مرز با سایر فازها، سبب هدایت ترک در قطعه می‌شوند. به همین دلیل با افزایش میزان فریت‌های ویدمن اشتاتن و مرز دانه‌ایی میزان انرژی ضربه کاهش می‌یابد [۴]. بنابراین کاهش انرژی ضربه و افزایش ریزسختی توجیه پذیر است. همچنین مشاهده شده است که مقدار آخال‌ها بر ریزساختار فلز جوش اثر می‌گذارد. این آخال‌ها روی انرژی



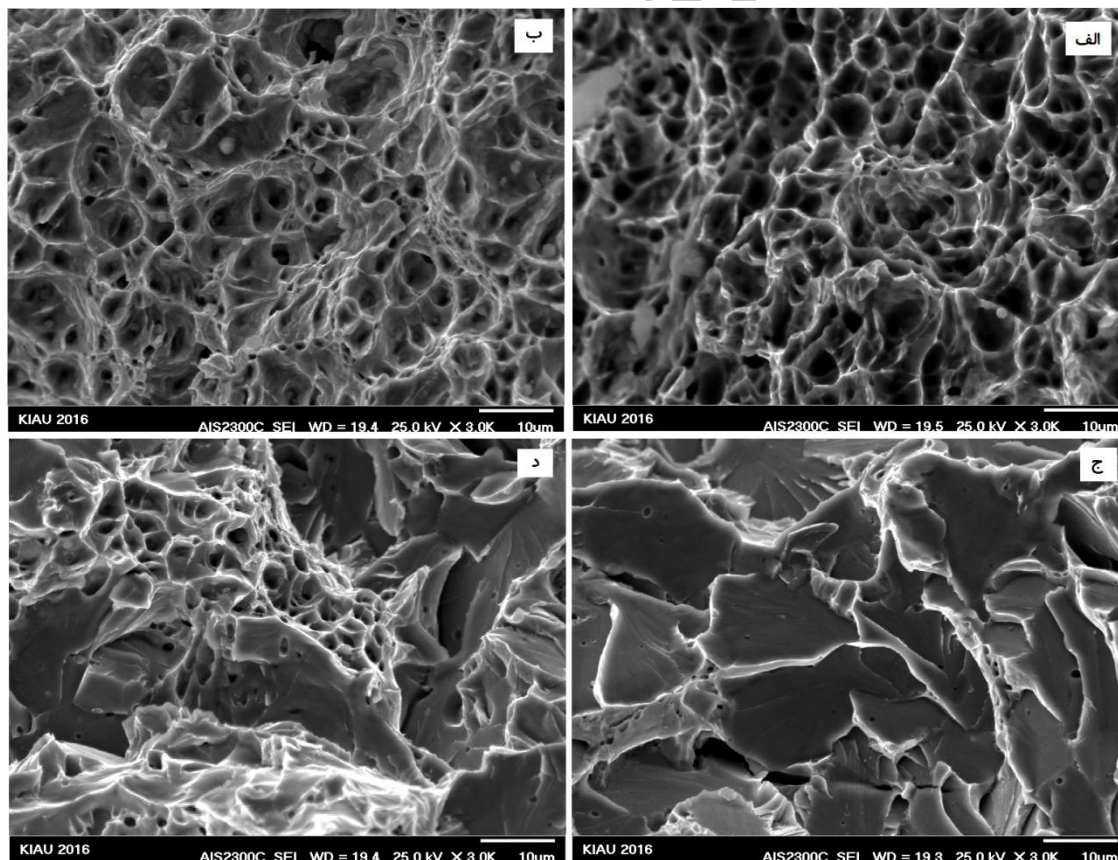
شکل ۸- نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده فولاد St37



شکل ۹- نتایج آزمون شارپی نمونه‌های جوشکاری شده فولاد St37



شکل ۱۰- نمودار شماتیکی CCT برای فولاد St37 [۱۰]



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه در دمای ۲۳ درجه

سانتیگراد: الف) S1، ب) S3، ج) S2 و د) S4

## نتیجه گیری

۴- نتایج آزمون شارپی نشان داد با افزایش ضخامت به دلیل تشکیل بیش تر فازهای فریت ویدمن اشتاتن و فریت مرز دانه‌ایی در نمونه‌های ۸ میلی‌متر، میزان انرژی ضربه افت قابل ملاحظه‌ای یافته است.

۵- نتایج شکست نگاری نمونه‌های آزمون ضربه نشان داد، تنها برای نمونه‌های ۴ میلی متر ویژگی‌های یک شکست نرم را می‌توان مشاهده کرد. سطح شکست برای نمونه‌های ۸ میلی متر ضخامت به صورت نیمه ترد مشاهده شد.

## تشکر و قدردانی

با تشکر از مهندس حمید صفرزاده، مدرس دانشگاه علمی کاربردی جهان پروفیل پارس که در ارائه این مقاله اینجانب را راهنمایی نمودند.

## References:

- 1- J. Slania, B. Slazak, M. Fidali, "Application of fast Fourier transform (FFT) in the analysis of a welding current instantaneous values waveforms during welding with a covered electrode ", Arch. Metall. Mater, Vol. 59 , Pp. 569-573, 2014.
- 2- M. Q. Abdillah, "Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Welded Carbon Steel", Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirement for the Award of the Degree of Bachelor of Mechanical Engineering, University of Malaysia Pahang, 2012.
- 3- C. M. Starling, P. J. Modenesi, T. M. D. Borba, "Bead Characterization of Fcaw of A Rutilic Fluxed Core Wire", J. Welding International, Vol. 25, Pp. 825-837, 2011.
- 4- M. Ebrahimnia, M. Goodarzi, M. Nouri, M. Sheikhi, "Study of the Effect of Shielding Gas Composition on the Mechanical Weld Properties of Steel St 37-2 in Gas Metal Arc Welding", J. Materials And Design, Vol. 30, Pp. 3891-3895, 2009.

۱- با توجه به تصاویر میکروسکوپ نوری و محاسبات آماری، بیش‌ترین مقدار فریت سوزنی در منطقه جوش در نمونه با ضخامت ۴ میلی‌متر و به روش FCAW مشاهده شد.

۲- نتایج آزمون سختی سنجی نشان داد، در یک ضخامت ثابت به دلیل تشکیل فریت سوزنی و آخال بیش‌تر در فلزجوش توپودری نسبت به سیم جوش توپر، مقدار سختی بالاتر می‌باشد.

۳- نتایج آزمون کشش نشان داد با افزایش ضخامت در هر دو فرایند جوشکاری GMAW و FCAW مقاومت کششی کاهش می‌یابد.

5- K. Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", 2<sup>nd</sup> Ed, Butterworth-Heinemann Ltd, 1992.

6- M. B. Chennaiah, P. N. Kumar, K. P. Rao, "Effect of Heat Input and Heat Treatment on the Mechanical Properties of Is2062-Is103 Cr 1Steel Weldments", J. of Advances in Materials Science And Engineering, Vol. 4, Pp. 17-24, 2015.

7- P. L. Mangonon, and M. A. Mahimkar, "A Three Dimensional Heat Transfer Finite Element Model of Submerged Arc Welding of HSLA Steels ", Proc.1st International Conf. Trends in Welding Research, pp 35-46, 1986.

8- A. R. Bahman and E. Alialhosseini, "Change in Hardness, Yield Strength and uts of Welded Joints Produced In St37 Grade Steel", J. Science and Technology Vol. 3, Pp. 1162-1164, 2010.

9- M. Suhaid, M. F. Hasan, P. K. Bharti, "Effect of Welding Speed, Current and Voltage on Mechanical Properties of Underwater Welded Mild Steel Specimen (C, Mn, Si) with insulated electrode

- E6013", J. Mechanical Engineering, Vol. 4, Pp. 120-124, 2014.
- 10- W. Pang, "The Structure and Properties of Heat Affected Zone of Structural Plate Steels welded by high productivity processes", ph. D. Thesis University of Philosophy, University of Wollongong, 1993.
- 11- S. P. Tewari, A. Gupta, J. Prakash, "Effect of Welding Parameters on the Weldability of Material", J. Engineering Science and Technology, Vol. 2, Pp. 512-516, 2010.
- 12- R. Gadallah, R. Fahmy, T. Khalifa, A. Sadek, "Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel", J. Engineering and Technology Innovation, Vol. 2, Pp. 1-12, 2012.
- 13- A. Lesnewich, "Influence of Welding on Steel Weldment Soundness", Welding, Brazing & Soldering, ASM Handbook; Vol. 6, 4th Ed, ASM International, Pp. 408-415, 1997.
- 14- G. H. Majzoubi, R. Seifi, S. Ali-akbar, "Experimental and Numerical Study of Temperature Distribution and Determination of Residual Stresses Due to Welding of Plates", Journal of Modeling in Engineering, Vol.9, No.27, Pp. 49-59, 2012.
- 15- L. Kolarik, M. Kolarikova, P. Vondrous, R. Hrabina, "The Choice of Parameters for Welding of Steel S355nl ", Annals of Daaam for 2012 & Proceedings of The 23rd International Daaam Symposium, Vol. 23, 2012.
- 16- ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol. 1, 1991.
- 17- AWS handbooks , Metals and their weldability , vol 4 , 1976. seventh edition ,pp 2-77.
- 18- S. S. Babu, "The mechanism of acicular ferrite in weld deposits", J. Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 8, Pp. 267-278, 2004.
- ۱۹- ج. سماوی، ع. ر. اکبرزاده، ع. ا. اکبری، "بهینه سازی پارامتری برای استحکام جوش در جوشکاری مقاومتی با استفاده از روش تاگوچی"، هفتمین همایش ملی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، خمینی شهر، اسفند ۱۳۹۳.
- 20- S. Berge, "The Effect of Plate Thickness in Fatigue of Welds ", J. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, Pp. 423-435, 1985.
- ۲۱- ش. شفیع نیا، ش. میردامادی، ح. ثابت، س. امیرآبادی زاده، "تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش"، نشریه مواد نوین، جلد ۶، شماره ۱، ص ۱۹-۳۶، پاییز ۱۳۹۴.