

## Research Paper

# Investigation of microstructure and mechanical properties of welding metal of A516-Grade 70 steel in the presence of TiO<sub>2</sub> by SAW method

Reza Amini<sup>1\*</sup>, Abbas Asadi Rad<sup>2</sup>

1-Assistant Professor of Materials engineering group, Golpayegan college of engineering, Isfahan university of technology, golpayegan, Iran

2-MSc Student of Materials engineering group, Golpayegan college of engineering, Isfahan university of technology, golpayegan, Iran

Received: 2021/03/07

Revised: 2022/02/03

Accepted: 2022/02/07

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2022.27507.1912](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.27507.1912)

### Keywords:

submerged arc welding, A516 steel, acicular ferrite, TiO<sub>2</sub> powder, impact toughness.

### Abstract

**Introduction:** ASTM A516 steel is a carbon-manganese or ferrite steel with high ductility, weldability and toughness. According to ASTM specifications, this steel is used in pressurized tanks and is applied for low temperature applications where toughness is important. The effect of adding TiO<sub>2</sub> powder to flux in the submerged arc welding process on the microstructure and mechanical properties of steel ASTM A516-Gr.70 was investigated in this research.

**Methods:** Microstructural properties have been studied by using the Optical microscope, Scanning Electron microscope, EDS Elemental analysis and X-ray diffraction. Mechanical properties of welding steels were investigated by tensile, hardness and impact tests.

**Findings:** Generally, The microstructural investigation, also exhibited that, increasing of TiO<sub>2</sub> content cause to increase acicular ferrite in the structure. It has found that the yield strength, UTS and elongation will not show a significant change by variation of TiO<sub>2</sub> powder content, because of the broken samples of the metal base, exhibited the same metal base strength. The yield strength of samples is from 420 MPa to 441 MPa, which is in allowed standard range (at least 260 MPa). Also, it has been observed that the ultimate tensile strength is in 550 MPa to 565 MPa range which conforms to standard values (485-620 MPa). The results of impact test showed that welded metal toughness increased from 80 joules to 128 joules by increasing tiO<sub>2</sub> from 0 to 27.54 gr. Also, in the case of weld metal hardness, by increasing of TiO<sub>2</sub> from 0 to 27.54 gr, it decreases from 190 to 169 Vickers. The results showed that the use of TiO<sub>2</sub> powder leads to improvement of mechanical properties, especially failure resistance in welded metal.

**Citation:** Reza Amini, Abbas Asadi Rad, Investigation of microstructure and mechanical properties of welding metal of A516-Grade 70 steel in the presence of TiO<sub>2</sub> by SAW method. Quarterly Journal of New Materials. 2021; 12(45): 1- 20.

\*Corresponding author: Reza Amini

**Address:** Materials engineering group, Golpayegan college of engineering, Isfahan university of technology, golpayegan, Iran

**Tell:** +989131331274

**Email:** reza.amini@mail.ru

## Extended Abstract

### Introduction

ASTM A516 steel is a carbon-manganese or ferrite steel with high ductility, weldability and toughness. According to ASTM specifications, this steel is used in pressurized tanks and is applied for low temperature applications where toughness is important. The effect of adding TiO<sub>2</sub> powder to flux in the submerged arc welding process on the microstructure and mechanical properties of steel ASTM A516-Gr.70 was investigated in this research. Submerged arc welding is one of the most widely used processes for welding this type of steel. Depending on the process variables, different specifications are obtained from the weld metal of this type of steel. Submerged arc welding is one of the melting welding processes used to connect thick steel sections. During the welding operation, the consumable electrode (welding wire) is continuously melted and frozen under a coating of powder, and finally forms a welding metal. Basically, the presence of different alloying elements in the weld metal is a function of the chemical composition of the electrode, the chemical composition of the base metal, the mixing percentage and the type of used powder. The choice of flux is of particular importance in submerged arc welding. The addition of titanium dioxide as an auxiliary powder in the sub-powder welding composition affects the weld metal structure. Also, adding titanium dioxide, which can be reduced, alloying elements are added to the welded metal structure.

### Materials and Methods

In this research, high-strength low-alloy steel sheet (A516Gr70) with dimensions of 22 × 400 × 150 mm was prepared and X-shaped grooves were machined in them. The connection surfaces were thoroughly cleaned. The thickness of the layer of titanium dioxide powder (mm) spread on the surface of the weld metal is considered variable and the equivalent of the thickness of the layer in grams is considered. This powder with code GR-R5566 made in China in terms of thickness (mm) with values of 0,1,2,3,4 mm in terms of grams: zero, 1.705, 6.99, 15.48 and 27.54 g was embedded in the root of the joint. If the thickness of the powder layer is large, it can produce a narrow and convex weld bead. The control sample was prepared without using powder to compare the welding properties. Samples were coded for easy access. In order to check the accuracy and possible defects in the weld metal, non-destructive radiographic test of the samples was performed and also to identify

the microstructure resulting from submerged arc welding, the samples were examined after etching in the 2% nital solution by optical microscopy and scanning electron microscopy. Quantitative analysis of ferrite in the microstructure was performed by Clemex software. Tensile test according to ASTM A370 standard, hardness and impact according to ASTM E23 standard were used to evaluate the mechanical properties of welded specimens.

### Findings

The results showed that with increasing the amount of TiO<sub>2</sub>, the amount of ferrite and especially needle ferrite in the microstructure increases. This also affects the mechanical properties. Increasing the amount of TiO<sub>2</sub> leads to increased toughness. Performing the tensile test, it was determined that the results obtained are within the standard range and are therefore acceptable. The results of Vickers hardness test showed that the presence of ferrite in the microstructure reduces the hardness.

### Discussion

The microstructure of A516 steel consists of coarse ferrites and rows of dark perlite. Studies show that with increasing the amount of TiO<sub>2</sub>, the amount of needle ferrite in the microstructure increases. The reason is that titanium-containing contaminants encourage the formation of this ferrite. This effect occurs with the formation of titanium compounds at the interface between the incandescent and the background. It is observed that the combination of titanium with elements such as carbon, oxygen and nitrogen leads to form of small and large inclusions containing titanium. EDS analysis of disturbances in the weld metal microstructure is given. It is observed that this incubator is rich in titanium, manganese and oxygen. These titanium-rich contaminants absorb manganese from the surrounding field, leaving a manganese-free background and a manganese-free austenite. The formation of manganese-free zones around the titanium-containing athermalite allows the germination of needle ferrite. In fact, the presence of manganese-free regions around the titanium containing acetate increases the conversion temperature of austenite to ferrite and the chemical driving force for the transformation of ferrite, thereby reducing the activation energy of ferrite germination. Tensile test shows that the yield strength of the samples is between 420 MPa and 441 MPa, which is within the allowable standard range (minimum 260 MPa). The final tensile strength is also in the range of 550 MPa to 565 MPa, which is in line with standard values (485-620 MPa). The

specimens are broken in the base metal portion, these values reflect the strength of the base metal, and are very close to each other. In general, by increasing the amount of TiO<sub>2</sub> to 27.54 g (4 mm thick), the impact energy of the weld metal of the specimens increases. As the TiO<sub>2</sub> content increases, the hardness of the samples decreases from 190 Vickers to 169 Vickers. This is because in the presence of TiO<sub>2</sub> the amount of ferrite phase in the microstructure increases and instead the nucleation and growth of perlite decreases. Since the hardness of perlite is higher than the ferrite phase due to the presence of Fe<sub>3</sub>C in its structure, so by increasing the amount of TiO<sub>2</sub> and decreasing the amount of perlite in the structure, the hardness of the samples also decreases.

### Conclusion

In this study, the effect of TiO<sub>2</sub> on the microstructure and mechanical properties of the weld metal was investigated. The following results were obtained by examining the results of mechanical properties and microstructural images: The microstructure resulting from submerged arc welding in the weld metal region for sample A1 includes needle ferrite, Widmann-Staten ferrite and perlite regions. Increasing the

amount of TiO<sub>2</sub> to 27.54 g (4 mm thick), the amount of ferrite and especially needle ferrite in the structure has increased from 49% for sample A1 to 65% for sample A5. The amount of impact energy and toughness of the weld metal increased by 48 joules by increasing the amount of TiO<sub>2</sub> from zero to 27.54 g. The amount of hardness of the weld metal decreases by 21 Vickers with increasing the amount of TiO<sub>2</sub> from zero to 27.54 g.

### Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

No funding.

### Authors' contributions

Design and conceptualization: Reza Amini  
Methodology and data analysis: Reza Amini, Abbas Asadi  
Supervision and final writing: Reza Amini

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

# بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش فولاد A516-Gr70 در حضور $TiO_2$ به روش SAW

رضا امینی<sup>۱\*</sup>، عباس اسدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

## چکیده

**مقدمه:** فولاد ASTM A516 یک فولاد کربن-منگنز یا فریتی که دارای شکل پذیری، جوش پذیری و چقرمگی بالایی است. بر اساس مشخصات ASTM این فولاد در مخازن تحت فشار استفاده می شود و برای کاربردهای در دمای پایین که در آن چقرمگی مهم است کاربرد دارد. در این پژوهش تاثیر میزان پودر دی اکسید تیتانیوم بر خواص مکانیکی جوش فولاد ۷۰-Gr.۵۱۶A ایجاد شده به روش جوشکاری قوس زیرپودری مورد بررسی قرار گرفت.

**روش:** مشخصات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز عنصری EDS و پراش اشعه ایکس و خواص مکانیکی فولادهای جوشکاری شده با انجام آزمون کشش، سختی و ضربه بررسی شد.

**یافته‌ها:** بررسی‌های ریزساختاری نیز نشان داد که با افزایش مقدار  $TiO_2$  مقدار فریت سوزنی درون ساختار افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که با تغییر مقدار پودر  $TiO_2$  استحکام تسلیم و کششی و ازدیاد طول نمونه‌ها تغییر چندانی نمی‌کند چرا که نمونه‌های شکسته شده از قسمت فلز پایه همان استحکام فلز پایه را نشان می‌دهد. مقدار استحکام تس

لیم نمونه‌ها بین ۴۲۰ MPa و ۴۴۱ MPa است که در محدوده مجاز استاندارد (حداقل ۲۶۰ MPa) قرار دارد. همچنین مشاهده شد که استحکام کششی نهایی در محدوده ۵۵۰ MPa تا ۵۶۵ MPa قرار دارد که با مقادیر استاندارد (۴۸۵-۶۲۰ MPa) هم‌خوانی دارد. نتایج تست ضربه نشان داد که تافنس فلز جوش با افزایش مقدار  $TiO_2$  از صفر تا ۲۷/۵۴ گرم، از ۸۰ ژول به ۱۲۸ ژول افزایش می‌یابد. سختی فلز جوش نیز با افزایش مقدار  $TiO_2$  از صفر تا ۲۷/۵۴ گرم، از ۱۹۰ ویکرز به ۱۶۹ ویکرز کاهش یافت.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد استفاده از پودر  $TiO_2$  منجر به بهبود خواص مکانیکی به خصوص مقاومت به شکست در فلز جوش می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2022.27507.1912](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.27507.1912)

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری قوس زیرپودری، فولاد A516، فریت سوزنی، پودر  $TiO_2$ ، چقرمگی ضربه

\* نویسنده مسئول: رضا امینی

نشانی: گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

تلفن: ۰۹۱۳۱۳۳۱۲۷۴

پست الکترونیکی: reza.amini@mail.ru

## مقدمه

فولاد ASTM A516 یک فولاد کربن-منگنز یا فریتی که دارای شکل پذیری، جوش پذیری و چقرمگی بالایی است. بر اساس مشخصات ASTM این فولاد در مخازن تحت فشار استفاده می شود و برای کاربردهای در دمای پایین که در آن چقرمگی مهم است کاربرد دارد. با توجه به کاربردهای مختلف فولاد ASTM A516 به عنوان فولاد مخازن تحت فشار در شرایط دمایی، جوشکاری این فولاد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. جوشکاری قوس زیرپودری یکی از فرآیندهای پر کاربرد برای جوشکاری این نوع فولاد است. با توجه به متغیرهای فرآیند مشخصات متفاوتی از فلز جوش این نوع فولاد حاصل می شود.

جوشکاری قوس زیرپودری<sup>۱</sup> یکی از فرآیندهای جوشکاری ذوبی است که جهت اتصال مقاطع ضخیم فولادی استفاده می شود. در طی عملیات جوشکاری، الکتروود مصرفی (سیم جوش) به طور مداوم در زیر پوششی از پودر ذوب و منجمد می شود و در نهایت فلز جوش را تشکیل می دهد [۱]. اصولاً حضور آلیاژی مختلف در فلز جوش تابعی از ترکیب شیمیایی الکتروود، ترکیب شیمیایی فلز پایه، درصد امتزاج و نوع پودر مصرفی است [۲]. انتخاب فلاکس در جوشکاری قوس زیرپودری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳]. با در نظر گرفتن تنوع فلاکس‌ها در جوشکاری قوس زیرپودری و ترکیبات گوناگون آن‌ها، برای داشتن انتخاب درست و منطقی ترکیب فلاکس لازم است دقت شود که چه ویژگی‌هایی برای قطعه مورد نظر مطلوب هستند [۴]. ترکیب فلاکس و بازیسته آن بر روی انتقال عناصر از فلز جوش به سرباره و بالعکس و همچنین ریزساختار فلز جوش، نوع و شکل آخال‌ها و در نهایت خواص مکانیکی فلز جوش مؤثر است. افزودن دی اکسید تیتانیم به عنوان پودر کمکی در ترکیب جوشکاری زیر پودری بر روی ساختار فلزی جوش ایجاد شده تأثیرگذار است، همچنین با افزودن دی اکسید تیتانیم که امکان احیاء شدن دارد، عناصر آلیاژی به ساختار فلزی جوش افزوده می شود [۵].

شماتیک فرآیند جوشکاری قوس زیرپودری در شکل ۱ نشان داده شده است.

تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است به عنوان مثال در پژوهشی سینق (Singh) و همکاران تأثیر افزودنی‌های CaF<sub>2</sub>، FeMn و NiO بر روی استحکام و سختی ورق‌های فولاد کم کربن در روش جوشکاری قوس زیرپودری مورد مطالعه قرار گرفته است. در پژوهش مذکور فلاکس‌های حاوی CaO، SiO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به عنوان فلاکس پایه در نظر گرفته شده است و پودرهای CaF<sub>2</sub>، FeMn و NiO در مقادیر مختلف به این فلاکس افزوده شده است. مشخص شده است که CaF<sub>2</sub> و FeMn عوامل مؤثری در استحکام ضربه به شمار می‌روند در حالی که واکنش بین CaF<sub>2</sub> و NiO بر روی سختی منطقه جوش تأثیر می‌گذارد. نتایج این پژوهش نشان داده است که استحکام ضربه برای جوش‌های حاوی حد متوسط افزودنی (۵٪)، کمترین مقدار

است [۶]. در پژوهش پو (Pu) و همکاران پودرهای آلیاژی Zr-Ti به فلاکس افزوده شد [۷]. آخال‌ها، ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌های جوشکاری شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داده که ساختار آخال‌ها به گونه‌ای است که هسته آخال‌ها ترکیبی از اکسیدهای Zr، Al، Ti، Si و Mn است و لایه سطحی آن از TiO<sub>2</sub>، ZrO<sub>2</sub> و MnS تشکیل شده است. اولین رسوب ZrO<sub>2</sub> می‌تواند به عنوان محل جوانه‌زنی اکسیدهای Al، Ti، Si و Mn عمل کند و کسر آخال‌هایی با اندازه کمتر از یک میکرومتر را افزایش دهد. به سبب این ریزدانه شدن و افزایش آخال‌ها، کسر فریت سوزنی به طور قابل توجهی افزایش یافته و در عوض کسر فریت مرزدانه‌ای درون ریزساختار کاهش می‌یابد. خواص کششی فلز جوش و انرژی چقرمگی آن با افزایش مقدار فریت سوزنی افزایش می‌یابد.

تأثیر تیتانیم و منگنز بر خواص جوش فولاد HSLA در پژوهش آقای بنگ (Bang) نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. مشخص شده است که بهترین خواص مکانیکی در دو ترکیب ۰.۰۲٪Mn-۱.۹۲٪Ti و ۰.۰۸٪Mn-۱.۴۰٪Ti به دست می‌آید. نتایج نشان داده است که با افزودن تیتانیم، مقدار فریت سوزنی درون ریزساختار افزایش می‌یابد. همچنین منگنز به ریزدانه شدن و یکنواختی ساختار جوش کمک می‌کند. همچنین مشخص شده است که با افزایش تیتانیم چقرمگی ضربه بهبود می‌یابد. در پژوهشی که توسط هال (Hall) صورت گرفته است، تأثیر متغیرهای جوشکاری قوس زیرپودری بر روی خواص مکانیکی فولاد A516-Gr.70 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که بالاترین مقدار سختی مربوط به منطقه تحت تأثیر حرارت درشت دانه و پس از آن فلز جوش و پایین‌ترین مقدار آن مربوط به فلز پایه است. همچنین مشخص شده است که منطقه تحت تأثیر حرارت بالاترین چقرمگی ضربه را در تمامی سرعت‌های جوشکاری دارد. در این پژوهش نتایج نشان داده‌اند که سرعت جوشکاری تأثیر اندکی بر استحکام و چقرمگی ضربه‌ی منطقه تحت تأثیر حرارت دارد و تنها ۹ ژول تفاوت بین سرعت‌های مختلف جوشکاری به دست آمده است [۹].

در این پژوهش تأثیر میزان پودر دی‌اکسید تیتانیم بر خواص مکانیکی جوش فولاد ۷۰-Gr.۵۱۶A ایجاد شده به روش جوشکاری قوس زیرپودری مورد بررسی قرار گرفت.

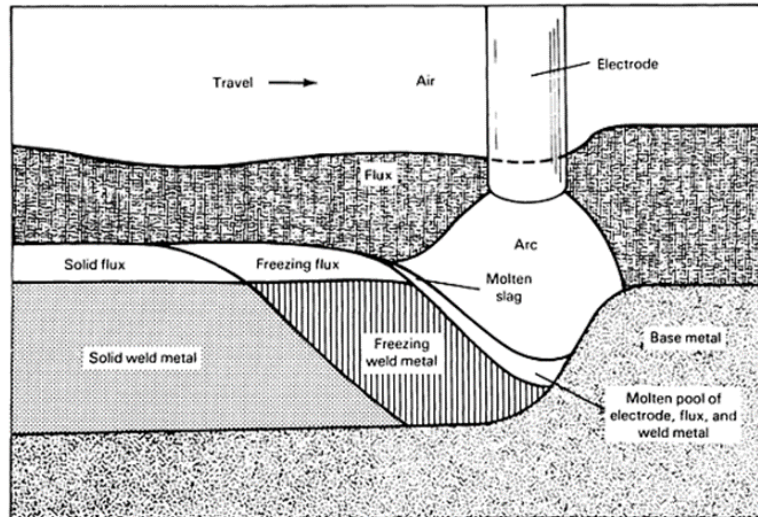
## مواد و روش‌ها

### مواد اولیه

در این تحقیق ورق فولاد کم آلیاژ استحکام بالا (A516Gr70) به ابعاد ۲۲×۴۰×۱۵ میلی‌متر تهیه و شیارهای X شکل در آن‌ها ماشین کاری شد. تمیزکاری سطوح اتصال به طور کامل صورت گرفت. ضخامت لایه‌ی پودر دی‌اکسید تیتانیم (میلی متر) که در سطح فلز جوش پخش شده است، متغیر در نظر گرفته شده و معادل آن ضخامت لایه به گرم در نظر گرفته شده است. این پودر با کد GR- R5566 ساخت کشور چین بر حسب ضخامت (میلی متر) با مقادیر ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴

ترکیب شیمیایی ورق فولادی مورد استفاده در جدول ۱ و همچنین ترکیب شیمیایی سیم جوش در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۱]. نمونه‌ها جهت دسترسی آسان کدگذاری شدند. نحوه کدگذاری و شرایط جوشکاری نمونه‌های مختلف در جدول ۳ به طور خلاصه ارائه شده است.

میلی متر به ترتیب بر حسب گرم: صفر، ۱/۷۰۵، ۶/۹۹، ۱۵/۴۸ و ۲۷/۵۴ گرم در ریشه اتصال تعبیه شد. اگر ضخامت لایه پودر زیاد باشد میتواند مهره جوش باریک و قوزدار (برآمده) تولید نماید [۱۰]. نمونه شاهد بدون استفاده از پودر جهت مقایسه خواص جوش آماده شد.



شکل ۱- طرح شماتیک از فرآیند SAW

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولادی A516-Gr70

C	Mn	Si	S	P	Cr	Fe
۰/۰-۱/۲۲	۱/۱۴	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰-۰/۳	باقی مانده

جدول ۲- ترکیب شیمیایی سیم جوش

C	Mn	Si	S	P	Cu	Fe
۰/۰-۰/۶۱۵	۰/۱-۸/۲۵	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳۵	باقی مانده

جدول ۳- کد گذاری نمونه‌ها در شرایط مختلف

کد نمونه	مقدار $TiO_2$ بر اساس ضخامت (mm)	مقدار $TiO_2$ بر اساس وزن (gr)	شدت جریان (A)	اختلاف پتانسیل (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)
A1	۰	۰	۵۸۰	۲۸	۲/۱
A2	۱	۱/۷۰۵			
A3	۲	۶/۹۹			
A4	۳	۱۵/۴۸			
A5	۴	۲۷/۵۴			

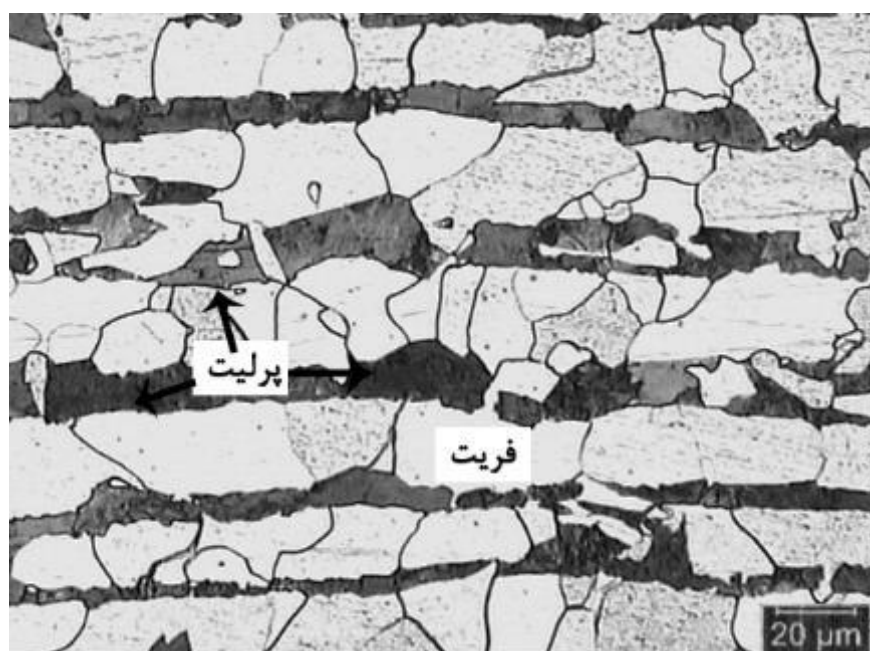
## آنالیز نمونه‌ها

به منظور بررسی صحت و وجود عیوب احتمالی درون فلز جوش، آزمون غیر مخرب رادیوگرافی از نمونه‌ها به عمل آمد و همچنین جهت شناسایی ریزساختار حاصل از جوشکاری قوس زیرپودری، نمونه‌ها پس از اچ در محلول نایتال ۲٪ توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شدند. آنالیز کمی فریت در ریزساختار توسط نرم افزار کلمکس (Clemex) انجام شد. برای ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده از آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM A370، سختی و ضربه مطابق استاندارد ASTM E23 استفاده گردید.

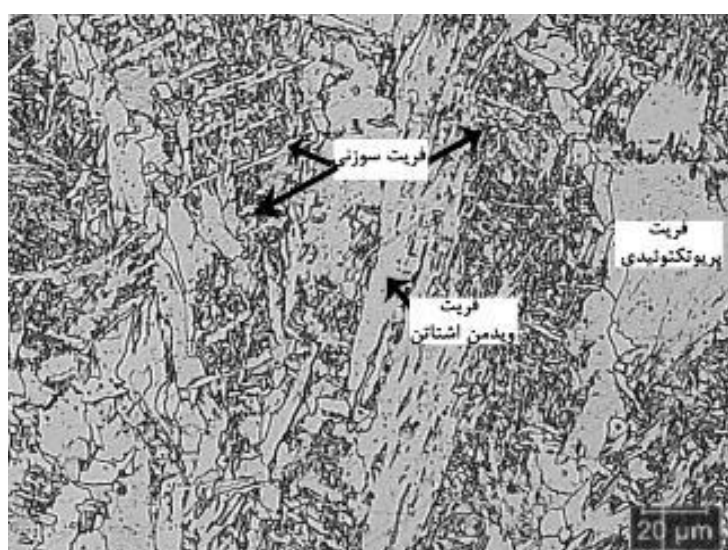
## نتایج

### بررسی ریزساختار

ریزساختار فولاد A516 در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این تصویر مشخص است، ریزساختار شامل فریت‌های درشت (F) به رنگ روشن و ردیف‌های پرلیت (P) به رنگ تیره است. ریزساختار منطقه جوش برای نمونه A1 در شکل ۳ نشان داده شده است. این ریزساختار طبق مطالعات آقای دین (Deen) و همکاران، شامل کسر زیادی فریت سوزنی (AF)، فریت پروتکتوئیدی و فریت ویدمن اشتاتن است [۱۲].



شکل ۲- ریزساختار فلز پایه نمونه A1



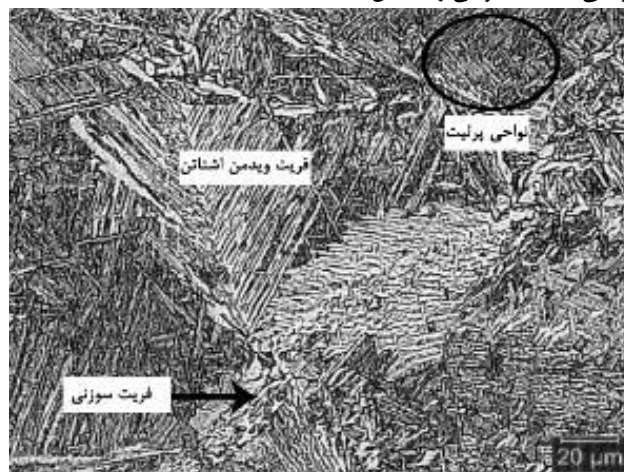
شکل ۳- ریزساختار فلز جوش نمونه A1

این امر آن است که با ثابت نگه داشتن متغیرهای جریان جوشکاری، ولتاژ و سرعت جوشکاری مقدار حرارت ورودی نیز برای نمونه‌های مختلف ثابت خواهد ماند و در نتیجه ریزساختار این ناحیه از نمونه‌ها ثابت می‌ماند و با تغییر مقدار  $TiO_2$  فلاکس تغییری در آن ایجاد نمی‌شود.

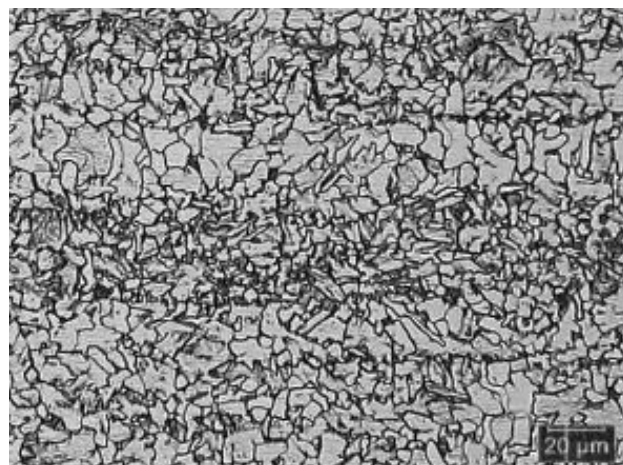
در شکل (۸) ریزساختار فلزجوش نمونه‌ها با مقادیر مختلف افزودنی  $TiO_2$  نشان داده شده است. ریزساختار نمونه A1 که بدون افزودن  $TiO_2$  است در شکل (۸) (الف) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، ریزساختار این نمونه شامل فریت سوزنی (قسمت‌های سفید و ریز که جهت‌گیری خاصی نداشته و به طور نامنظم درون زمینه پخش شده‌اند)، فریت ویدمن اشتاتن (قسمت‌های سفید که به صورت صفحات بزرگ موازی مشخص هستند) و مناطق پرلیتی (قسمت‌های تیره) است [۱۳]. در شکل (۸) (ب)، (ج)، (د) و (ه) به ترتیب ریزساختار نمونه‌های A2، A3، A4 و A5 نشان داده شده است. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که با افزودن  $TiO_2$  از مقدار مناطق پرلیتی کاسته و مناطق سفید رنگ که مربوط به فریت است افزوده شده است.

ریزساختار ابتدای ناحیه HAZ (چسبیده به حوضچه جوش) نمونه A1 در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از فریت سوزنی، فریت ویدمن اشتاتن و نواحی پرلیتی تشکیل شده است. ریزساختار انتهای HAZ (چسبیده به فلز پایه) در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود که در ابتدای ناحیه HAZ که نزدیک حوضچه مذاب قرار دارد به دلیل آنکه دما بالاتر است بنابراین ساختار دارای پرلیت بیشتر و همچنین درشت‌تر است که این ناحیه HAZ درشت‌دانه نامیده می‌شود. اما در انتهای HAZ که در تماس با فلز پایه با دمای به مراتب پایین‌تر است، ساختار نسبت به فلز پایه ریزدانه‌تر است که HAZ ریزدانه نامیده می‌شود.

در شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار منطقه ابتدای HAZ و انتهای HAZ برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود این ریزساختارها شبیه ریزساختار نمونه A1 بوده و از لحاظ ظاهری تفاوت آشکاری از نظر اجزای ریزساختار و اندازه آن با یکدیگر نمی‌کنند. به نظر می‌رسد دلیل

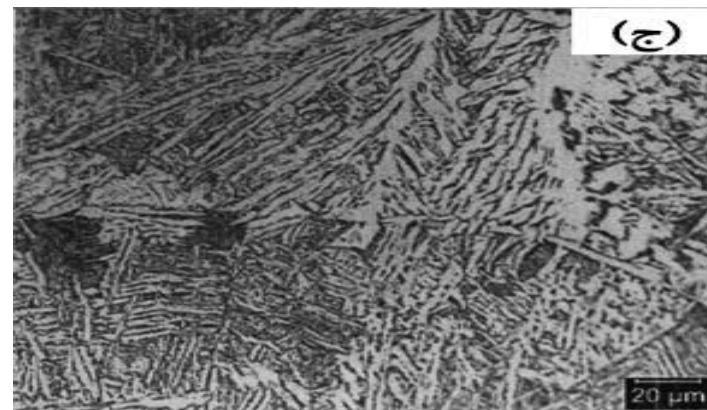
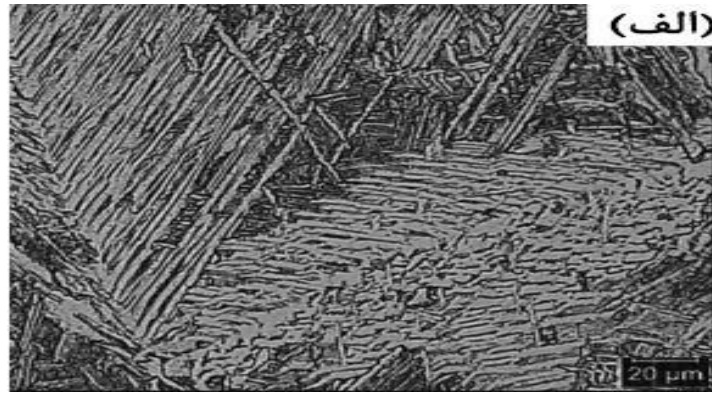


شکل ۴- ریزساختار ناحیه ابتدا HAZ (نزدیک به حوضچه جوش) برای نمونه A1

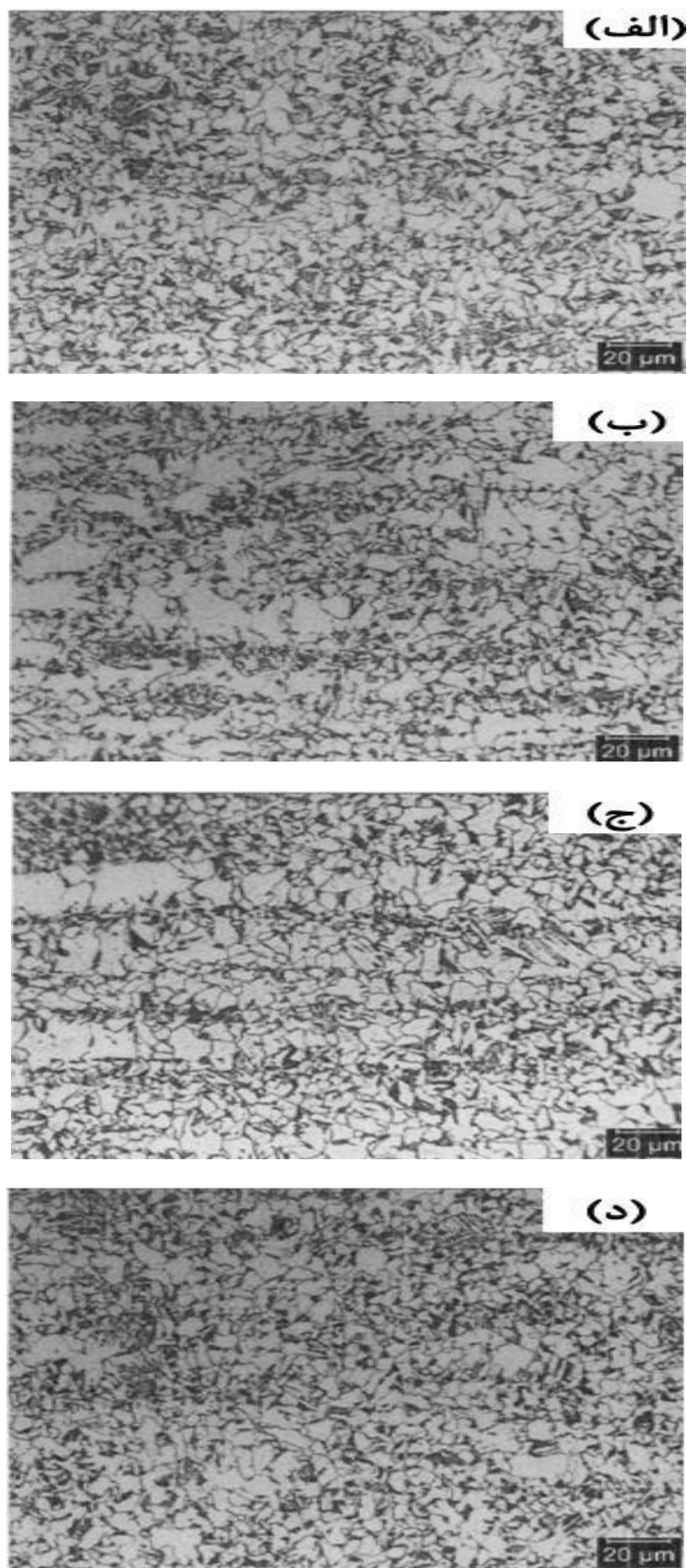


شکل ۵- ریزساختار ناحیه انتهای HAZ (نزدیک به فلز پایه) برای نمونه A1

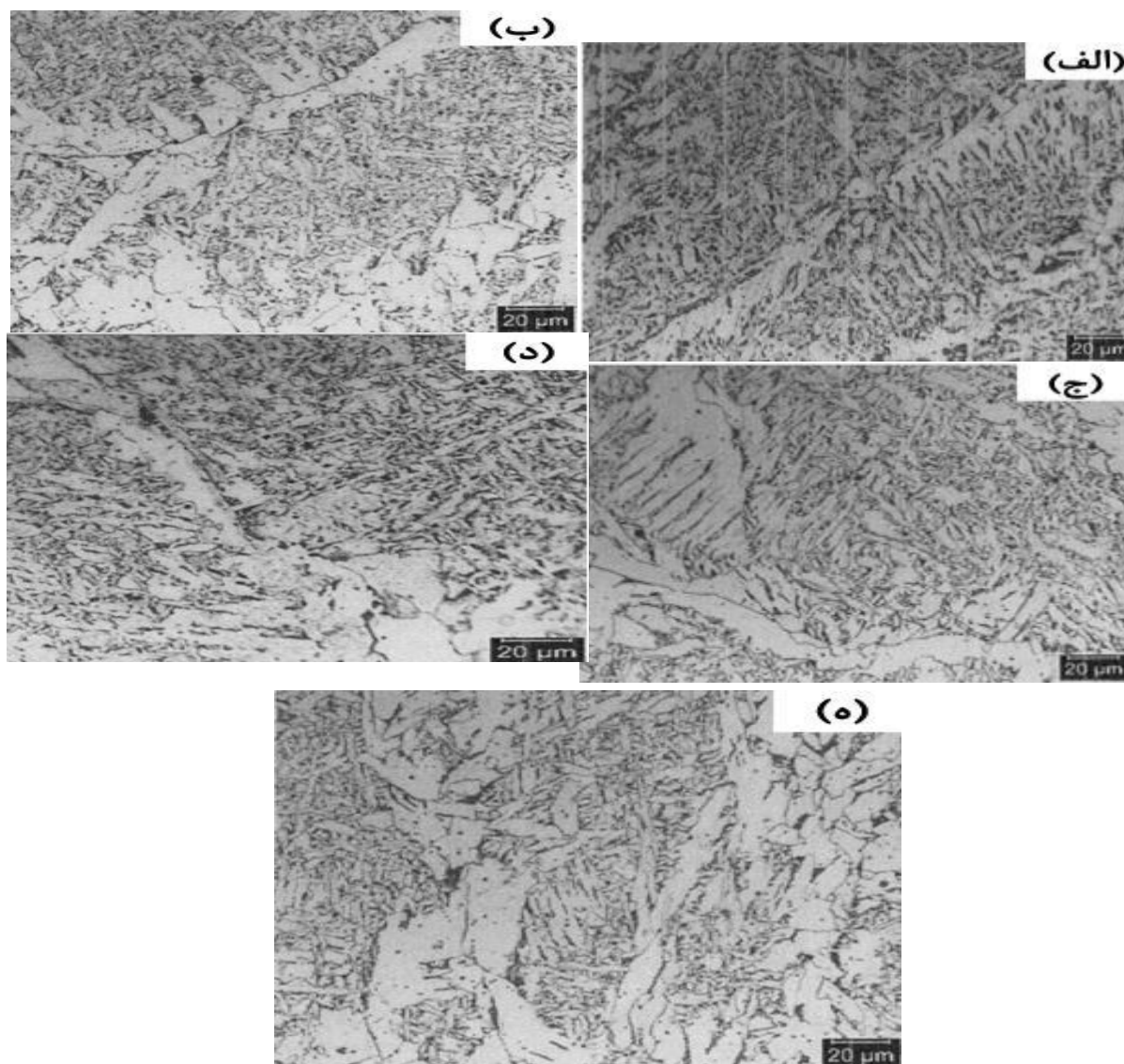




شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار منطقه ابتدای HAZ (نزدیک فلز جوش) برای نمونه‌های مختلف: (الف) A2، (ب) A3، (ج) A4 و (د) A5



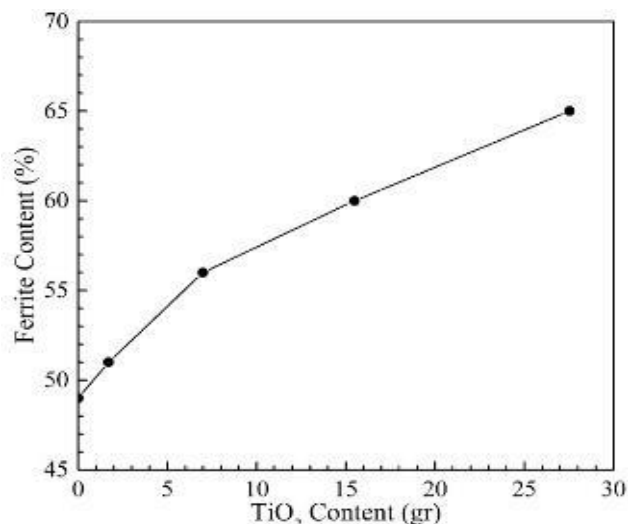
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار منطقه انتهای HAZ (نزدیک فلز پایه) برای نمونه‌های مختلف: الف) A2، ب) A3، ج) A4 و د) A5



شکل ۸- میکروگراف نوری از ریزساختار فلز جوش نمونه‌های: الف) A1، ب) A2، ج) A3، د) A4 و ه) A5

به منظور بررسی بهتر و واضح‌تر ریزساختار نمونه‌های مختلف تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد. در شکل ۱۰ ریزساختار فلز پایه، HAZ و فلز جوش نمونه A1 نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در ریزساختار فلز پایه مناطق پرلیتی به صورت لایه لایه مشخص است و مناطق فریتی صاف هستند. همچنین در ریزساختار فلز جوش قسمت‌های پرلیتی و فریت سوزنی در شکل مشخص شده است. مشاهده می‌شود که از فلز پایه به سمت فلز جوش اجزای ریزساختار، مورفولوژی و اندازه آن‌ها تغییر می‌کند. در فلز پایه فریت درشت‌دانه مشاهده می‌شود و در عوض اثری از فریت سوزنی نیست و در مقابل در فلز جوش فریت اغلب به صورت سوزنی ظاهر شده است.

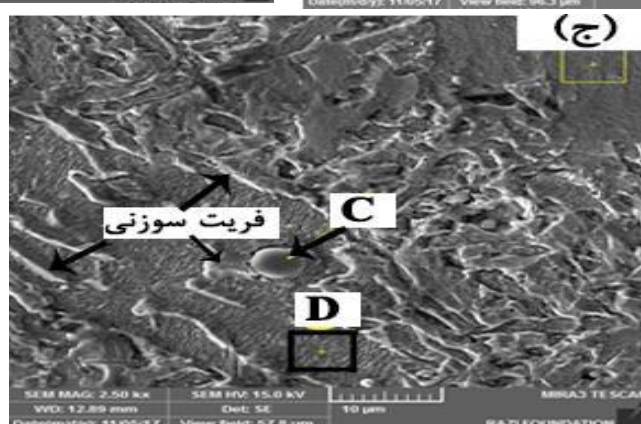
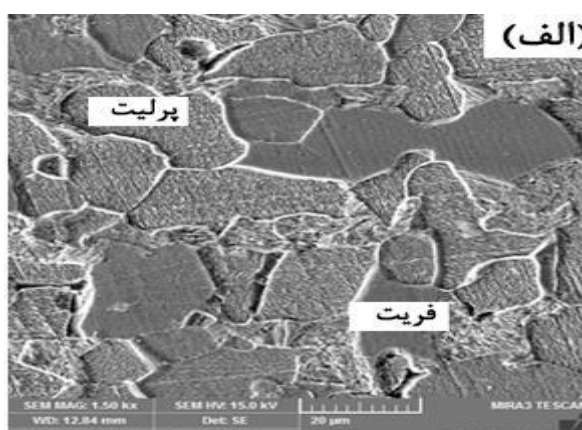
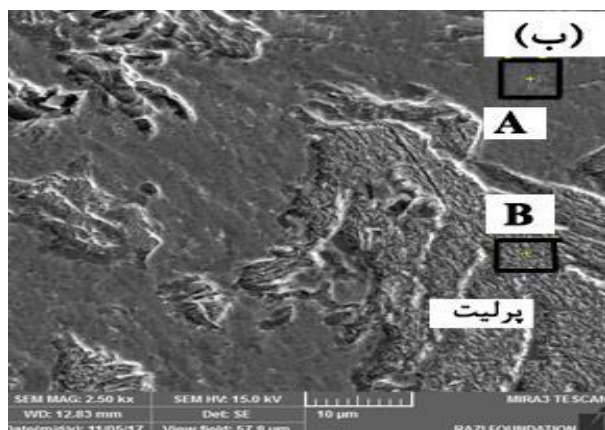
شکل (۹) مقدار فریت ریزساختار بر حسب  $TiO_2$  را نشان می‌دهد، که این مقدار برای نمونه بدون  $TiO_2$  (A1) ۴۹٪ و برای نمونه حاوی ۲۷/۵۴ گرم  $TiO_2$  ۶۵٪ است. در واقع اختلاف بین نمونه با بیشترین مقدار  $TiO_2$  و نمونه بدون افزودن  $TiO_2$  ۱۶٪ است که این امر نشان دهنده تشکیل بیشتر فاز فریت در حضور  $TiO_2$  است. همین افزایش مقدار فاز فریت در فلز جوش در نمونه A5 موجب افزایش مقدار انرژی ضربه این نمونه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار  $TiO_2$  مقدار فریت سوزنی در ریزساختار افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که آخال‌های حاوی تیتانیوم تشکیل این فریت را ترغیب می‌کنند. این تأثیر با تشکیل ترکیبات تیتانیوم در فصل مشترک بین آخال و زمینه صورت می‌گیرد. مشخص شده است که ترکیب تیتانیوم با عناصری نظیر کربن، اکسیژن و نیتروژن منجر به تشکیل آخال‌های ریز و درشت حاوی تیتانیوم می‌شود.



شکل ۹- مقدار فریت ریزساختار بر حسب مقدار TiO<sub>2</sub>

نکته قابل توجه در مورد آنالیز نقطه D آن است که مقدار منگنز در آن نسبت به آنالیز همین عنصر در نقاط A و B کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر آن است که نقطه D در ریزساختار فلز جوش واقع شده و با توجه به فعل و انفعالات و واکنش‌های مذاب با سرباره مقداری از منگنز زمینه کاهش پیدا می‌کند.

آنالیز عنصری قسمت‌های مشخص شده شکل ۱۰، در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. نقطه A مربوط به فریت، B و D مربوط به پرلیت و C یک آخال موجود در ریزساختار را نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز عنصری نقاط A، B و D مشاهده می‌شود که ترکیب شیمیایی تقریباً همان فولاد زمینه است.



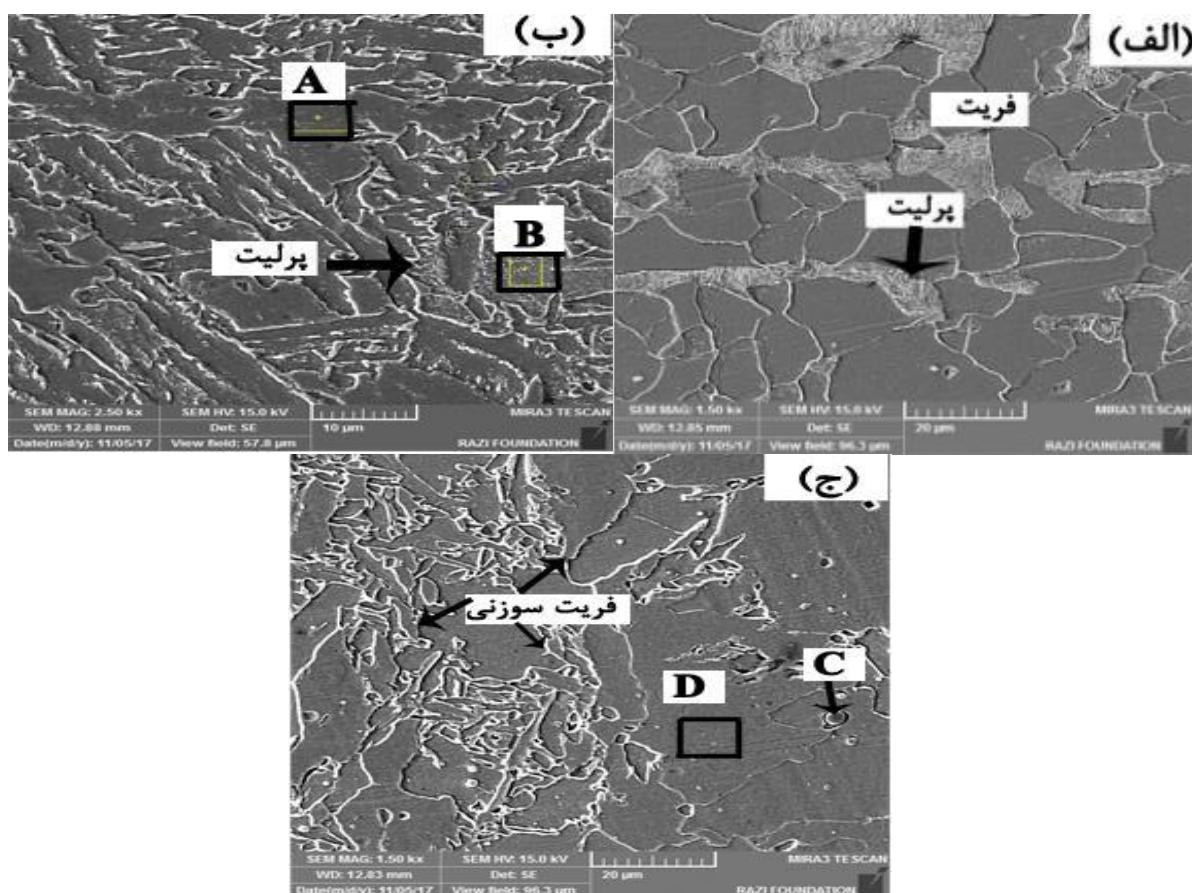
شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار نمونه A1: (الف) فلز پایه، (ب) منطقه HAZ و (ج) فلز جوش

جدول ۴- آنالیز شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل ۱۰

درصد وزنی عنصر/(wt%)	A	B	C	D
O			۴۴/۹۷	
Al	۰/۰۵	۰/۱۹	۹/۷۸	۰/۰۷
Si	۰/۴۲	۰/۴۷	۱۴/۶۴	۰/۵۲
Ti			۳/۰۱	
Mn	۱/۰۲	۱/۰۸	۲۴/۶۹	۰/۶۸
Fe	۹۸/۵۱	۹۸/۲۶	۲/۲۶	۹۸/۷۳

مورد آن بحث خواهد شد. آنالیز عنصری نقاط مشخص شده در شکل ۱۱ در جدول ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با توجه به ترکیب شیمیایی نقاط مشخص شده، نقاط A و B که در قسمت HAZ قرار دارند آنالیز فولاد پایه را دارند. نقطه C یک آخال را در فلز جوش نشان می‌دهد. با مقایسه آنالیز این نقطه با نقطه C در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مقدار Ti در آن افزایش یافته است که این به دلیل افزودن پودر TiO<sub>2</sub> به پودر جوش است.

در شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه A2 که حاوی مقدار ۱/۷۰۵ گرم TiO<sub>2</sub> است نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به طور کلی اجزای ریزساختار در این نمونه نیز نظیر نمونه A1 است؛ به این صورت که فلز پایه ریزساختاری درشت دارد که از فریت و مناطقی پرلیت تشکیل شده است و منطقه HAZ دارای ساختار فریتی و اندکی پرلیتی است. در مقایسه با ریزساختار منطقه جوش نمونه A2 با نمونه A1 مشاهده می‌شود که در نمونه A2 فریت سوزنی بیشتر و در عوض پرلیت کمتر مشاهده می‌شود. علت این پدیده نقش افزودنی TiO<sub>2</sub> است که باعث تغییر اجزای ریزساختار می‌شود که در ادامه در



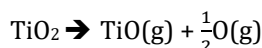
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار نمونه A2: (الف) فلز پایه، (ب) منطقه HAZ و (ج) فلز جوش

جدول ۵- آنالیز شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل ۱۱

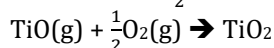
عنصر،/ (wt)	A	B	C	D
O			۴۵/۷۷	
Al	۰/۲۰	۰/۱۲	۱۱/۱۰	۰/۰۹
Si	۰/۶۴	۰/۴۹	۱۲/۲۶	۰/۰۹
Ti			۴/۶۵	
Mn	۰/۹۵	۰/۷۰	۲۲/۵۲	۱/۰۳
Fe	۹۸/۲۱	۹۸/۶۸	۳/۶۹	۹۸/۳۰

دو آخال با اندازه متفاوت، یکی بزرگتر و دیگری کوچکتر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فریت‌های سوزنی اطراف آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. همان گونه که مشاهده می‌شود در اطراف آخال کوچکتر فریت سوزنی به صورت یکپارچه بوده و کل آخال را در بر گرفته است. در عوض در مورد آخال مشاهده می‌شود که فریت‌های جوانه زده بر روی آن به صورت ستاره‌ای هستند که با یکدیگر ارتباط دارند و به صورت یک شبکه درآمده‌اند.

دی اکسید تیتانیوم نقش حفاظت از مذاب جوش را به عهده دارد. به نظر می‌رسد در نزدیکی پلاسمای جوشکاری همه اکسیدها مستعد تجزیه و تولید اکسیژن هستند [۱۶]، بنابراین واکنش تجزیه دی اکسید تیتانیوم بصورت زیر است:



پس از آن آهن موجود در اکسید آهن سرپاره احیا شده و به فلز جوش باز می‌گردد، اکسید تیتانیوم با اکسیژن واکنش داده و دی اکسید تیتانیوم تولید می‌شود:



مقداری از تیتانیوم و سایر عناصر موجود در پودر فلاکس ممکن است وارد فلز جوش شود و تشکیل آخال بدهد.

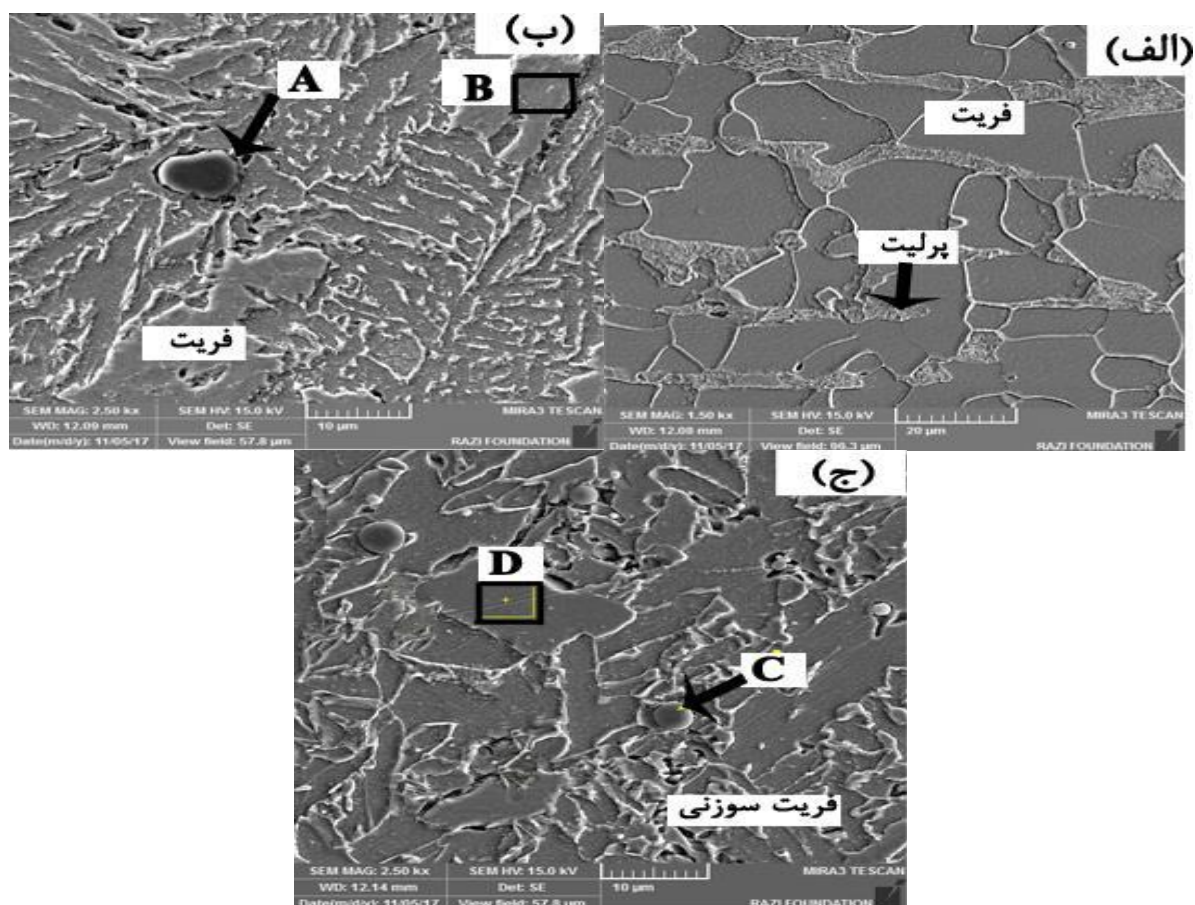
در جدول ۹ نمونه‌ای از آنالیز EDS آخال‌های موجود در ریزساختار فلز جوش آورده شده است. مشاهده می‌شود که این آخال غنی از تیتانیوم، منگنز و اکسیژن است. این آخال‌های غنی از تیتانیوم، منگنز را از زمینه اطراف جذب کرده و زمینه خالی از منگنز می‌شود و آستینت خالی از منگنز به وجود می‌آید. تشکیل مناطق خالی از منگنز در اطراف آخال حاوی تیتانیوم اجازه جوانه‌زنی فریت سوزنی را می‌دهد. بنابراین ترکیب شیمیایی مناطق اطراف این آخال‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع وجود مناطق خالی از منگنز اطراف آخال حاوی تیتانیوم دمای استحاله آستینت به فریت و نیرو محرکه شیمیایی برای استحاله فریت را افزایش می‌دهد و در نتیجه آن انرژی فعال‌سازی جوانه‌زنی فریت کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه A3 نشان داده شده است. اجزای ریزساختار در شکل قابل تشخیص است. مشاهده می‌شود که ریزساختار این نمونه شبیه نمونه A2 است. آنالیز عنصری نقاط مشخص شده در شکل ۱۲، در جدول ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود آخالی که در قسمت فلز جوش وجود دارد نسبت به نمونه قبلی از تیتانیوم غنی‌تر شده که این عمل در اثر افزودن مقدار  $\text{TiO}_2$  بیشتر است.

ریزساختار قسمت‌های مختلف نمونه A4 و A5 نیز به ترتیب در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان داده شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی مناطق مشخص شده این دو نمونه نیز به ترتیب در جدول ۷ و جدول ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار  $\text{TiO}_2$  از نمونه A1 تا نمونه A5 آخال‌های حاضر در قسمت فلز جوش از تیتانیوم غنی‌تر شده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته جی امانای و همکاران (J. Amanie)، چهار مکانیزم اساسی برای تشریح جوانه‌زنی فریت سوزنی قابل بیان است [۱۴]. در تحقیق اس.اس. بابو (S.S.Babu) نیز این موضوع بیان شده است. به نظر می‌رسد در مکانیزم اول آخال‌ها به عنوان سطوح بی اثر عمل می‌کنند و باعث کاهش انرژی اکتیواسیون شده و جوانه‌زنی فریت را تشویق می‌کنند. در مکانیزم دوم، شبکه آخال و فریت به خوبی با یکدیگر مطابقت دارد و باعث می‌شود که انرژی فصل مشترک آخال/فریت نسبت به انرژی فصل مشترک آخال/آستینت کاهش یابد. در مکانیزم سوم، آخال‌ها عناصر سخت‌کننده نظیر کربن، منگنز و سیلیسیم را از آستینت دور می‌کنند. این دور کردن باعث افزایش نیرو محرکه موضعی برای جوانه‌زنی فریت از آستینت روی سطح آخال می‌شود. در مکانیزم چهارم، به خاطر تفاوت ثوابت انبساط حرارتی آستینت و آخال‌ها، کرنش‌های حرارتی می‌توانند در فصل مشترک آخال/آستینت ایجاد شوند و انرژی اکتیواسیون برای تشکیل جوانه‌های فریت کاهش یابد. به طور کلی با کاهش نرخ سرد کردن و افزایش افزودنی‌های آلیاژی و اندازه دانه آستینت، فریت مرزدانه‌ای و فریت ویدمن اشتانن به فریت سوزنی و بینیت تبدیل می‌شود [۱۵].

در شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش نمونه A3 در بزرگنمایی بالا نشان داده شده است. در این تصویر



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار نمونه A3: (الف) فلز پایه، (ب) منطقه HAZ و (ج) فلز جوش

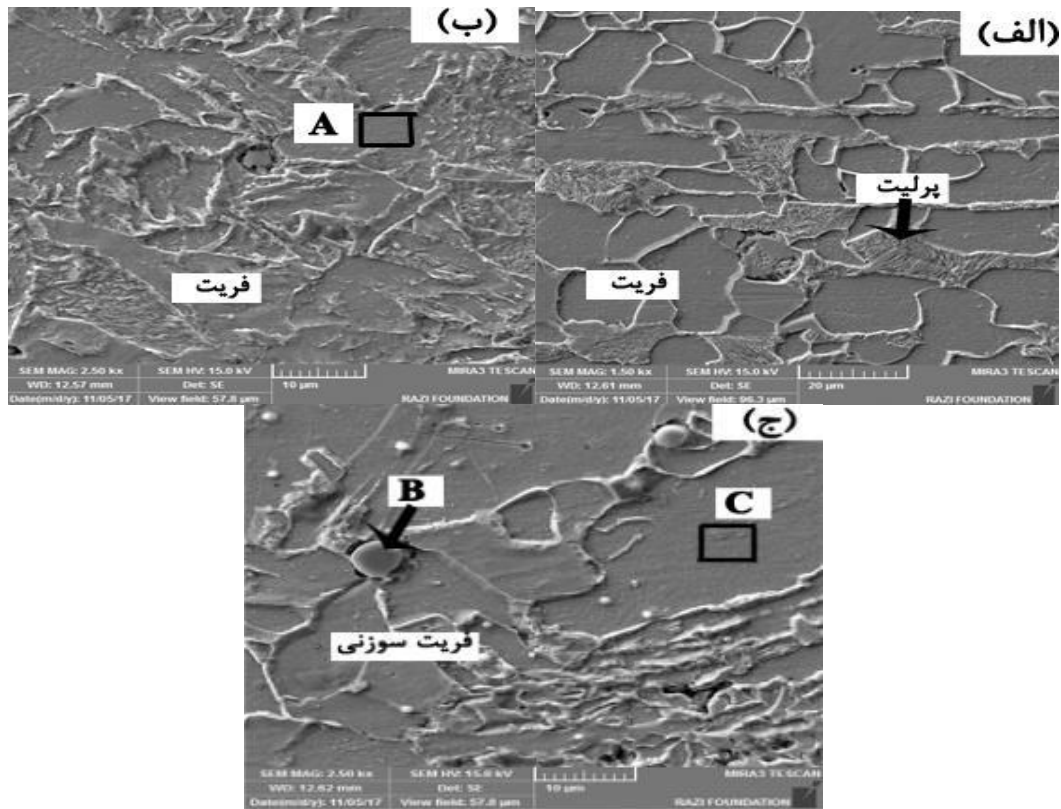
جدول ۶- آنالیز شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل ۱۲

D	C	B	A	درصد وزنی عناصر/(wt)
	۴۸/۸۲		۵۰/۴۹	O
۰/۰۷	۹/۹۴	۰/۱۳	۴۵/۳۷	Al
۰/۵۵	۷/۶۰	۰/۴۸	۰/۲۱	Si
	۷/۷۲		۰/۰۶	Ti
۰/۹۷	۱۴/۱۳	۱/۰۸	۰/۱۰	Mn
۹۸/۳۵	۱/۷۹	۹۸/۳۱	۰/۹۱	Fe

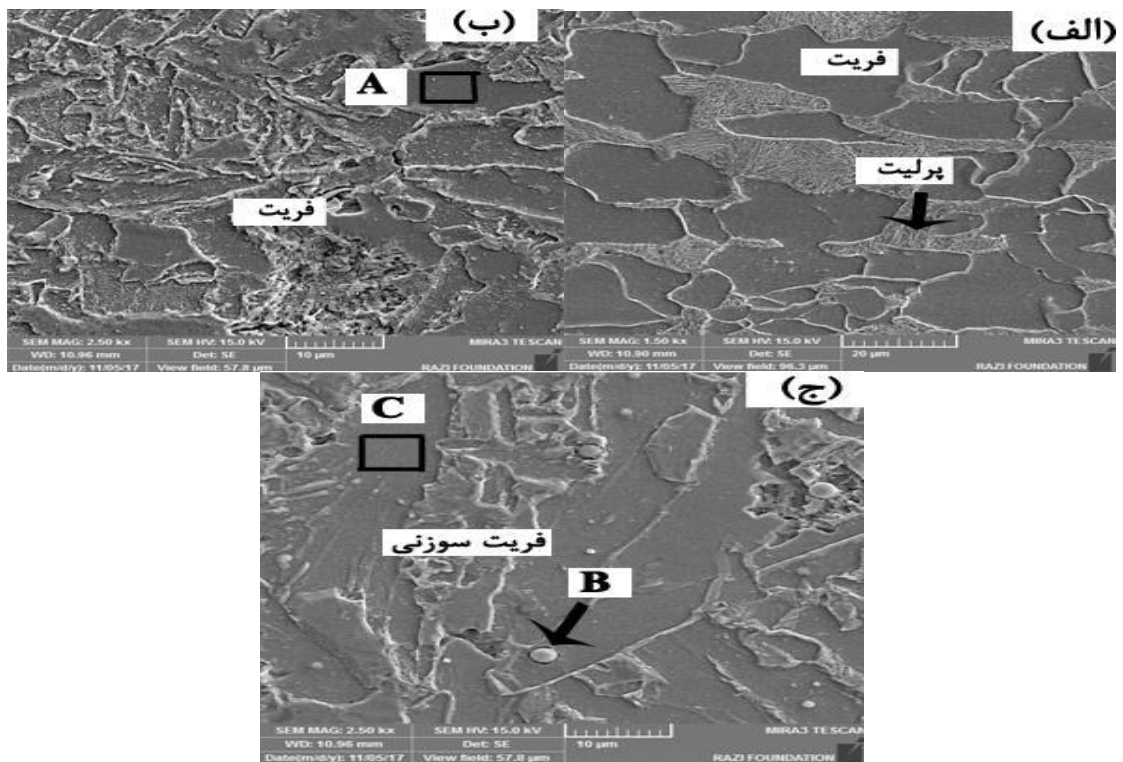
### آزمون کششی

مجاز استاندارد (حداقل ۲۶۰ MPa) تطابق دارد. در شکل (۱۷) نیز مشاهده می‌شود که استحکام کششی نهایی در محدوده ۵۵۰ MPa تا ۵۶۵ MPa قرار دارد که با مقادیر استاندارد (۴۲۰-۴۸۵ MPa) هم‌خوانی دارد. به دلیل آنکه نمونه‌ها در قسمت فلز پایه شکسته‌اند این مقادیر، منعکس‌کننده استحکام فلز پایه بوده، و بسیار به هم نزدیک هستند.

شکل (۱۶) استحکام تسلیم (YS)، شکل (۱۷) استحکام کششی نهایی (UTS) محاسبه شده برای نمونه‌های مختلف با مقدار مشخص TiO<sub>2</sub> نشان می‌دهد. شکل (۱۶) و شکل (۱۷) به خوبی تغییرات اندک استحکام‌های تسلیم و کششی را بر حسب تغییرات مقدار TiO<sub>2</sub> نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که مقدار استحکام تسلیم نمونه‌ها بین ۴۲۰ MPa و ۴۴۱ MPa است که در محدوده



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار نمونه A4: (الف) فلز پایه، (ب) منطقه HAZ و (ج) فلز جوش



شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار نمونه A5: (الف) فلز پایه، (ب) منطقه HAZ و (ج) فلز جوش



جدول ۷- آنالیز شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل ۱۳

درصد وزنی عناصر/(wt)	A	B	C
O		۴۷/۸۵	
Al	۰/۱۱	۹/۱۳	۰/۱۷
Si	۰/۵۰	۱۱/۴۹	۰/۶۰
Ti	۰/۰۶	۹/۷۶	
Mn	۰/۸۵	۲۰/۱۱	۰/۸۰
Fe	۹۸/۴۰	۱/۵۳	۹۸/۴۳

جدول ۸- آنالیز شیمیایی مناطق مشخص شده در شکل ۱۴

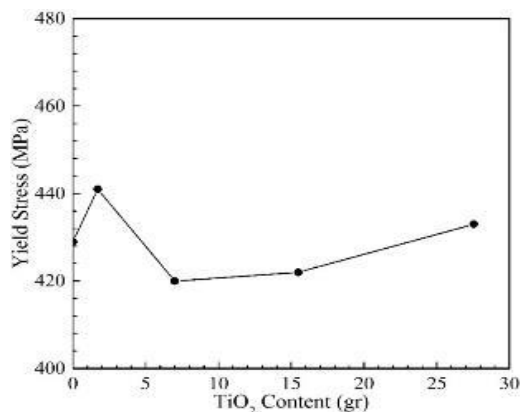
درصد وزنی عناصر/(wt)	A	B	C
O		۴۷/۷۱	
Al	۰/۰۷	۷/۳۵	
Si	۰/۵۰	۱۱/۰۹	۰/۴۱
Ti		۱۰/۰۳	
Mn	۱/۱۳	۲۰/۸۶	۰/۷۶
Fe	۹۸/۳۱	۲/۹۱	۹۸/۸۳



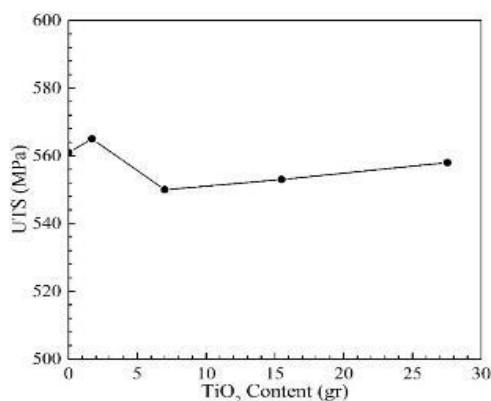
شکل ۱۵- میکروگراف الکترونی ریزساختار فلز جوش نمونه A3، AF: فریت سوزنی

جدول ۹- آنالیز شیمیایی آخال موجود در شکل ۱۵

درصد وزنی عناصر/(wt)	آخال
O	۴۸/۸۲
Al	۹/۹۴
Si	۷/۶۰
Ti	۱۷/۷۲
Mn	۱۰/۱۳
Fe	۱/۷۹



شکل ۱۶- استحکام تسلیم بر حسب مقدار پودر TiO<sub>2</sub>



شکل ۱۷- استحکام کششی نهایی بر حسب مقدار پودر TiO<sub>2</sub>

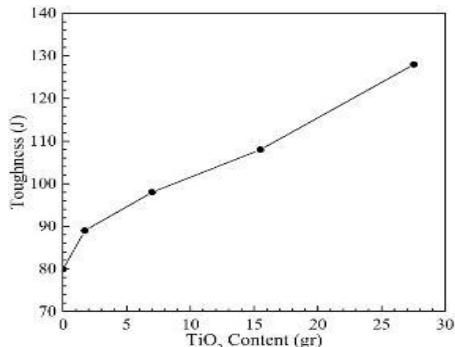
بنابراین چقرمگی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

#### سختی سنجی

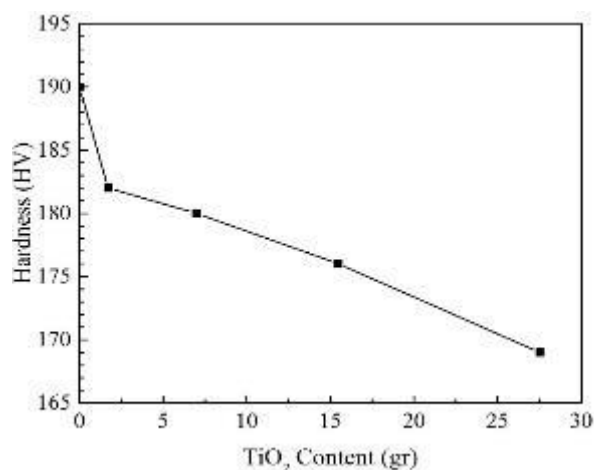
در شکل (۱۹) تغییرات سختی ناحیه فلز جوش برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub>، سختی نمونه‌ها از ۱۹۰ ویکرز به ۱۶۹ ویکرز کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در حضور TiO<sub>2</sub> مقدار فاز فریت درون ریزساختار افزایش و در عوض جوانه‌زنی و رشد پرلیت کمتر می‌شود. از آنجا که سختی پرلیت با توجه به حضور Fe<sub>3</sub>C در ساختار آن بیشتر از فاز فریت است بنابراین با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> و کاهش مقدار پرلیت درون ساختار، سختی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد.

#### آزمون ضربه

تأثیر مقدار TiO<sub>2</sub> بر چقرمگی منطقه فلز جوش در شکل (۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> تا ۲۷/۵۴ گرم (۴ میلی متر ضخامت) انرژی ضربه فلز جوش نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که در مورد نمونه A1 مقدار انرژی ضربه ۸۰ ژول، نمونه A2 ۸۹ ژول، نمونه A3 ۹۸ ژول، نمونه A4 ۱۰۸ ژول و نمونه A5، ۱۲۸ ژول به دست آمده است. دلیل این امر آن است که با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> جوانه‌زنی فریت سوزنی که حضور آن در ریزساختار ناحیه فلز جوش نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار چقرمگی دارد افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> تا ۲۷/۵۴ گرم (۴ میلی متر ضخامت) مقدار فریت سوزنی در ریزساختار افزایش می‌یابد و



شکل ۱۸- تأثیر مقدار TiO<sub>2</sub> بر انرژی ضربه فلز جوش



شکل ۱۹- تغییرات سختی بر حسب مقدار TiO<sub>2</sub>

### پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود تاثیر میزان پودر TiO<sub>2</sub> در حضور سایر پودرها مورد بررسی قرار گیرد.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: رضا امینی؛  
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: رضا امینی، عباس اسدی  
نظارت و نگارش نهایی: رضا امینی.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### References:

1.A. I. H. Committee and D. L. Olson, ASM handbook: Welding, brazing, and soldering. ASM International, 1993.

2.S. P. Kumaresh Babu and S. Natarajan, "Influence of heat input on high temperature

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر TiO<sub>2</sub> بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش پرداخته شد. بررسیها نشان داد که مقدار پودر TiO<sub>2</sub> بر خواص مناطق مختلف جوش تاثیر می‌گذارد. با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> تا ۲۷/۵۴ گرم (۴ میلی متر ضخامت) مقدار فریت و بالآخص فریت سوزنی در ساختار افزایش یافت. بنابراین خواص نهایی مناطق مختلف وابسته به مقدار فریت و خواص فریت است. فریت فازی نرم است که سختی کمی دارد. فریت در کنار پرلیت انرژی ضربه ای را افزایش می‌دهد و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. بطور کلی با بررسی نتایج خواص مکانیکی و تصاویر ریزساختاری نتایج زیر حاصل شد.

۱- ریزساختار حاصل از جوشکاری قوس زیرپودری در منطقه فلز جوش برای نمونه A1 شامل فریت سوزنی، فریت ویدمن اشتاتن و مناطقی پرلیت مشاهده شد.

۲- با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> تا ۲۷/۵۴ گرم (۴ میلی متر ضخامت) مقدار فریت و بالآخص فریت سوزنی در ساختار افزایش یافت به گونه‌ای که از مقدار ۴۹٪ برای نمونه A1 به ۶۵٪ برای نمونه A5 رسید.

۳- مقدار انرژی ضربه و چقرمگی فلز جوش با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> از صفر به ۲۷/۵۴ گرم، ۴۸ ژول افزایش یافت.

۴- مقدار سختی فلز جوش با افزایش مقدار TiO<sub>2</sub> از صفر به ۲۷/۵۴ گرم، ۲۱ ویکرز کاهش یافته است. گرچه افزودن TiO<sub>2</sub> موجب کاهش سختی فلز جوش میشود، ولی در مقایسه با بدست آوردن نتایج حاصل از انرژی ضربه فلز جوش، توجه پذیر است

weldment corrosion in submerged arc welded power plant carbon steel," Materials & Design, vol. 29, no. 5, pp. 1036-1042, 2008.

3.P. Peasura, "Investigation of the Effects of Submerged Arc Welding Process Parameters on the Mechanical Properties of Pressure

- Vessel Steel ASTM A283 Grade A," *Journal of Engineering*, vol. 2017, pp. 1-8, 2017.
- 4.B. Beidokhti, A. H. Koukabi, and A. Dolati, "Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties," *Materials Characterization*, vol. 60, no. 3, pp. 225-233, 2009.
- 5.S. K. Parwar, J. D. Barma, and A. Majumder, "Study of the Effect of Inclusion of TiO<sub>2</sub> in Active Flux on Submerged Arc Welding of Low Carbon Mild Steel Plate and Parametric Optimization of the Process by Using DEA Based Bat Algorithm," *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 698-703, 2015.
- 6.B. Singh, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, and S. Maheshwari, "Effect of CaF<sub>2</sub>, FeMn and NiO additions on impact strength and hardness in submerged arc welding using developed agglomerated fluxes," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 667, pp. 158-169, 2016.
- 7.S. f. Y. J. Pu, and Y. y. Li, "Effects of Zr-Ti on the microstructure and properties of flux aided backing submerged arc weld metals," *Alloys and Compounds*, vol. 692, no. 351-358, 2017.
- 8.K.-s. Bang, C. Park, H.-c. Jung, and J.-b. Lee, "Effects of flux composition on the element transfer and mechanical properties of weld metal in submerged arc welding," *Metals and Materials International*, vol. 15, no. 3, pp. 471-477, 2009.
- 9.A. Hall, "The Effect of Welding Speed on The Properties of ASME SA516 Grade 70 Steel," MSc, Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Canada, 2010.
- 10.K. Weman, "10 - Submerged arc welding," in *Welding Processes Handbook (Second edition)*, ed: Woodhead Publishing, pp. 105-117, 2012.
- 11.ASTM A516 / A516M-05, Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service, 2005.
- 12.K. M. Deen, R. Ahmad, I. H. Khan, and Z. Farahat, "Microstructural study and electrochemical behavior of low alloy steel weldment," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 3051-3055, 2010.
- 13.R. A. Farrar and P. L. Harrison, "Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: An overview," *Journal of Materials Science*, journal article vol. 22, no. 11, pp. 3812-3820, November 01 1987.
- 14.J. Amanie, I. N. A. Oguocha, and S. Yannacopoulos, "Effect of submerged arc welding parameters on microstructure of SA516 steel weld metal," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51, no. 1, pp. 48-57, 2013.
- 15.S. S. Babu, "The mechanism of acicular ferrite in weld deposits," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 8, no. 3, pp. 267-278, 2004/06/01/ 2004.
- 16.N.D. Pandey, A. Bharti, S.R. Gupta, "Effect of submerged arc welding parameters and fluxes on element transfer behaviour and weld-metal chemistry", *Journal of Materials Processing Technology*, V.40, pp. 195-211, 1994.