



# Investigation of Behavior and Failure Mechanism of Welding ST52 Steel Structures at Negative Temperature

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Mohammadi Soleymani M.<sup>1\*</sup>,  
Mehrabani Gohari E.<sup>2</sup>,  
Khorami S.<sup>3</sup>

### How to cite this article

Mohammadi Soleymani M, Mehrabani Gohari E, Khorami S, Investigation of Behavior and Failure Mechanism of Welding ST52 Steel Structures at Negative Temperature. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(08):533-543.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Master of Structural Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

mmsoleymani@pnu.ac.ir

### Article History

Received: October 4, 2024

Accepted: November 10, 2024

ePublished: November 27, 2024

## ABSTRACT

In this research, two examples of ST-52 steel welding joints were performed by the SMAW welding method using low-hydrogen alkaline electrodes E7018 and E8018. The hardness, tensile strength, and impact toughness of weld were examined and studied at ambient temperature and -29 °C. The hardness test results showed that the highest hardness at the weld metal region belonged to the welding metal E8018. The hardness values for the base metal and the heat-affected area also indicated that the similar weld metal-like behavior is the same in the two samples. The impact test results demonstrated that the mean impact energy of the weld metal E7018 at ambient temperature was higher than E8018. Also, the mean impact energy at -29 °C for the weld metals E8018 and E7018 was equal to 56 J and 73 J, respectively. According to the results, the weld metal E8018 at a temperature of -29 °C shows a more brittle fracture behavior and lower impact toughness than the E7018 weld metal. The results of the weld tensile test revealed that the final weld strength of both filler metals was higher than 546 MPa so that the tensile sample failed from the ST-52 base metal site. According to the Tenth Article of the National Building Regulations of Iran as well as the Seismic Rules of the Regulation AISC 341-10, filler metals E7018 and E8018 meet the requirements of the weld final strength and impact toughness at ambient temperature and -29 °C.

**Keywords** Fracture Mechanism, Welding Areas, Impact Test, St52 Steel, Negative Temperat

## CITATION LINKS

1- Thermal Analysis of Laser Welding in Joint of Stainless Steel to Low Carbon Steel Using .... 2- Numerical and Experimental Investigation on Bonding Strength Optimization of .... 3- Experimental Investigation of the Annealing Effect on .... 4- Effect of Low Temperatures on Charpy Impact Toughness of .... 5- Charpy Impact Properties of Stainless Steel Weldment in Liquefied Natural Gas Pipelines: Effect of .... 6- Properties Evaluation of Shielded Metal Arc Welded Medium Carbon Steel Material. 7- Mechanical Properties and Microstructure of SMAW Welded and .... 8- The Effects of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Welding on the Mechanical Characteristics with .... 9- Investigation on Mechanical Properties of Welded Material under Different Types of .... 10- Experimental Investigation and Analysis of SMAW Processed Carbon Steel Pipes. 11- Optimization of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Process for Mild Steel. 12- Effect of Welding Variables on Mechanical Properties of Low Carbon Steel Welded Joint. 13- Low Temperature Impact Toughness of High Strength Structural Steel. 14- Charpy Impact Energy Correlation with Fracture Toughness for .... 15- Experimental Study on Impact Toughness of Structural Steel and Its Butt-Welded Joint at .... 16- Low Temperature Impact Toughness of Structural Steel Welds with .... 17- Influence of Welding Interpass Temperature on Charpy V-Notch Impact Energy of .... 18- Relationships among Charpy Impact Toughness, Microstructure and Fracture Behavior in .... 19- Microstructure and Tribological Performance of Ti-6Al-4V Cladding with .... 20- In Situ Observations of the Formation of Fine-Grained Mixed Microstructures of Acicular Ferrite and Bainite in .... 21- Effect of Acicular Ferrite Formation on Grain Refinement in the Coarse-Grained Region of Heat-Affected Zone. 22- Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of .... 23- Metallurgical Characterization of the HAZ in A516-70 and Evaluation of Fracture Toughness Specimens. 24- Key Concepts in Welding Engineering. 25- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. 26- Designing and Implementing Steel Buildings. 27- Fracture Toughness of Type 304 and 316 Stainless Steels and Their Welds. 28- Specification for Structural Steel Buildings

## بررسی رفتار و مکانیزم شکست جوش سازه‌های فولادی St52 در دمای منفی

مسلم محمدی سلیمانی<sup>۱\*</sup>، احسان مهرابی گوهری<sup>۲</sup>، سمانه خرمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران

### چکیده

در این پژوهش دو نمونه اتصال جوش فولاد ST-52 با استفاده از الکتروود قلبیایی کم هیدروژن E7018 و E8018 به روش جوشکاری SMAW انجام و سختی، استحکام کششی و مقاومت به ضربه جوش در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج سختی‌سنجی نشان داد بالاترین سختی در ناحیه فلز جوش مربوط به فلز جوش E8018 است. مقادیر سختی‌سنجی برای فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت نیز نشان می‌دهد رفتار مشابه مانند فلز جوش در دو نمونه یکسان است. نتایج آزمون ضربه نشان داد میانگین انرژی ضربه فلز جوش E7018 در دمای محیط بیشتر از میانگین انرژی ضربه فلز جوش E8018 است، همچنین میانگین انرژی ضربه در دمای منفی ۲۹ درجه سلسیوس برای فلز جوش E8018، ۵۶J و فلز جوش E7018، ۲۳J است. نتایج نشان می‌دهد که فلز جوش E8018 در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد رفتار شکست ترد و مقاومت به ضربه کمتری نسبت به فلز جوش E7018 دارد. نتایج حاصل از آزمایش کشش عرضی جوش نشان داد استحکام نهایی جوش هر دو فلز پرکننده بالاتر از ۵۴۶ مگا پاسکال است به طوری که نمونه کششی از محل فلز پایه ST-52 دچار شکست شد. براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و همچنین ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC341-10 فلزات پرکننده E7018 و E8018 الزامات استحکام نهایی و مقاومت به ضربه جوش در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد را تأمین می‌نمایند.

**کلیدواژه‌ها:** مکانیزم شکست، مناطق جوش، آزمون ضربه، فولاد St52، دمای منفی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

\* نویسنده مسئول: mmsoleymani@pnu.ac.ir

### ۱- مقدمه

فولادهای ساختمانی به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی و قابلیت جوشکاری خصوصاً در دماهای زیر صفر، به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف به خصوص ساخت سازه‌های فولادی به کار گرفته شده‌اند. جوشکاری فولادهای ساختمانی در سازه‌های مقیاس بزرگ اجتناب ناپذیر است. از آنجا که سازه‌های فولادی که به هم متصل می‌شوند در اندازه‌های بزرگ هستند، عموماً گرمای ورودی جوشکاری بالایی به کار گرفته می‌شود<sup>[1,2]</sup>. استفاده ایمن و طولانی مدت از سازه‌های فولادی در مناطق سرد مستلزم مطالعاتی در مورد چقرمگی فولاد سازه در دمای پایین بوده که اهمیت این پژوهش را نشان می‌دهد. آزمون شارپی همواره به‌عنوان یک روش کنترل کیفی مقرون به صرفه برای تعیین چقرمگی در مقابل ضربه و حساسیت به شیار (Notch) در مواد مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است<sup>[3]</sup>. تأثیر دماهای پایین بر

چقرمگی ضربه شارپی آهن‌های داکتیل در ۲۰۰۲ انجام گرفت. مشخص شد که کاهش چقرمگی ضربه برای تمام گریدهای ADI زمانی که کاهش محتوای آستنیت باقی‌مانده و کاهش دمای آزمایش، از دمای اتاق به منفی ۶۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد<sup>[4]</sup>. در یک مطالعه<sup>[5]</sup>، یک لوله فولادی زنگ نزن آستنیتی برای انتقال گاز طبیعی مایع (LNG) با قوس تنگستن گازی با ضخامت دیواره ۱۵/۱ میلی‌متر جوش داده شده است. آزمایش‌های ضربه‌ای در دمای پایین برای بررسی تأثیر دماهای پایین بر چقرمگی شکست ناحیه جوش (WZ)، منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) انجام شد و از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی مورفولوژی سطح شکست نمونه‌های دارای بریدگی V استفاده شد. نتایج نشان داد که انرژی جذب شده WZ کمی بیشتر از BM و HAZ در نمونه‌های لوله جوش داده شده با ساختار بلوری FCC بود. محمد و همکاران<sup>[6]</sup> پژوهشی را روی مقادیر سختی و کشش اتصالات فولاد با کربن متوسط با تمرکز بر فلز پرکننده، فلز اصلی و ناحیه تحت تأثیر حرارت انجام دادند. نتایج حاصل حاکی از آن بود که مقدار استحکام کششی اتصال فولاد با کربن کم در HAZ تأثیر کمتری بر استحکام داشت و مقادیر بالاتر، سختی و استحکام کششی را نسبت به فلز جوشکاری و فلز اصلی نشان داد. اما به دلیل افزایش سختی، این فلز شکننده‌تر بود. دی ژسوس خورخه و همکاران<sup>[7]</sup> مقایسه شرایط فرآوری حرارتی مختلف را در ارتباط با فولاد HSLA-80 با استفاده از عملیات حرارتی قبل یا بعد از جوشکاری بر خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه نشان داد. نتایج حاصل نمایانگر آن بود که عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار تأثیر کمی دارد. نمونه بدون روند پیش گرم سازی سختی بالاتری داشت. چقرمگی برای حالت بدون روند گرم کردن قبل یا بعد از عملیات بیشتر بود.

عباس و همکاران<sup>[8]</sup> به تجزیه و تحلیل تأثیر عملیات حرارتی بر فولاد S45 C پس از جوشکاری SMAW پرداخت. تحلیل وایرانس Anova برای سختی و آزمون کششی به کار رفت. نتایج نشان داد که حرارت دهی سبب تغییر خواص مکانیکی نمونه‌ها شد. دمای حرارت دهی بالاتر، مقدار استحکام کششی را افزایش داد و چقرمگی با افزایش دما، کمتر شد. دماهای بالاتر برای سختی و استحکام بیشتر توصیه می‌شوند. طاهیر و همکاران<sup>[9]</sup> به بررسی تأثیر پرکننده‌های جوشکاری مختلف و مقادیر جریان بر خواص مکانیکی فولاد کم کربن پرداختند. پرکننده جوشکاری شامل E6013، E7016 و E7018 و مقادیر جریان برابر ۸۰ و ۹۰ آمپر بودند. تأثیر معنادار جریان جوشکاری و فیلرهای جوشکاری بر خواص مکانیکی استحکام کششی و سختی مشاهده شد. این آزمایش نشان داد که افزایش جریان سبب کاهش استحکام و سختی کششی شده است. استحکام بیشینه با پرکننده جوشکاری E7016 به دست آمد و سختی بیشینه با پرکننده جوشکاری E7018 در ۸۰ آمپر مشاهده شد.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد ST-52 و الکتروود E7018 و E8018 شرکت آما (برحسب درصد وزنی)

مواد	C	Mn	Si	P	S
فولاد ST-52	۰/۱۴	۰/۸۵	۰/۱۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۳
الکتروود E7018	۰/۰۶	۱/۵	۰/۳	۰/۰۲	۰/۰۲
الکتروود E8018	۰/۰۸	۱/۵	۰/۴۵	۰/۰۲	۰/۰۲

SMAW دارای چقرمگی ضربه بسیار بالاتری در دماهای پایین است که به گرمای ورودی کمتر نسبت داده می‌شود. بنابراین، روش جوشکاری کارآمد برای اطمینان از چقرمگی ضربه بالاتر در دمای پایین HAZ و فلز جوش، استفاده از یک فرآیند جوشکاری با ورودی حرارت کم با استفاده از یک ماده جوشکاری مصرفی با محتوای نیکل بالا است. که با نتایج سایر پژوهش‌های جدیدتر در خصوص ضربه همخوانی دارد [17,18].

در این پژوهش با استفاده از دو نوع الکتروود کم هیدروژن E7018 و E8018 دو نمونه جوش با فرایند جوشکاری SMAW برای بررسی رفتار و مکانیزم شکست جوش سازه‌های فولادی St52 در دمای منفی ۲۹ سانتی‌گراد انجام گرفت. آزمایش‌های مختلف مکانیکی شامل کشش عرضی جوش، سختی‌سنجی و آزمون ضربه در دمای محیط و دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد و همچنین بررسی مقاطع شکست حاصل از آزمون ضربه توسط میکروسکوپ SEM مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش تحقیق

فولاد ST-52 یکی از فولادهای متداول مورد استفاده در ساخت سازه‌های فولادی است. انتخاب فولاد ST-52 برای این پژوهش به دلیل استفاده گسترده آن در ساخت سازه‌های فولادی با ترکیبی از خواص مناسب از جمله جوش‌پذیری، استحکام مکانیکی، چقرمگی خوب در دماهای پایین است. ترکیب شیمیایی فولاد ST-52 مورد استفاده در این پژوهش توسط دستگاه کوانتومتر آنالیز شده و در جدول ۱ ارائه شده است. آماده‌سازی ورق فولاد ST-52 به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ به ضخامت ۱۲ میلی‌متر با طرح اتصال V شکل انجام شد. شیار V با روش ماشینکاری ایجاد شد و همچنین قبل از انجام جوشکاری، تمیزکاری بر روی ورق‌ها انجام گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، جوشکاری به روش SMAW از دو نوع الکتروود قلیایی متداول E7018 و E8018 شرکت آما با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

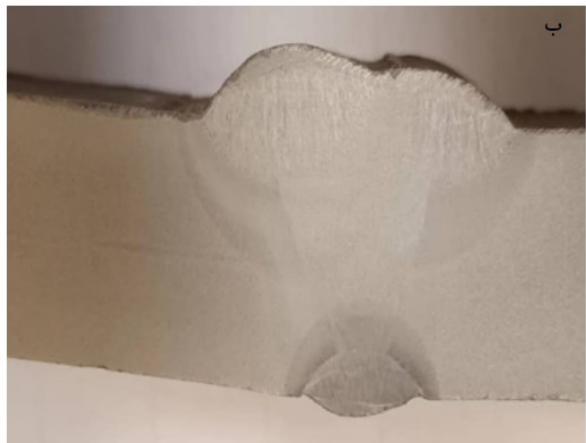
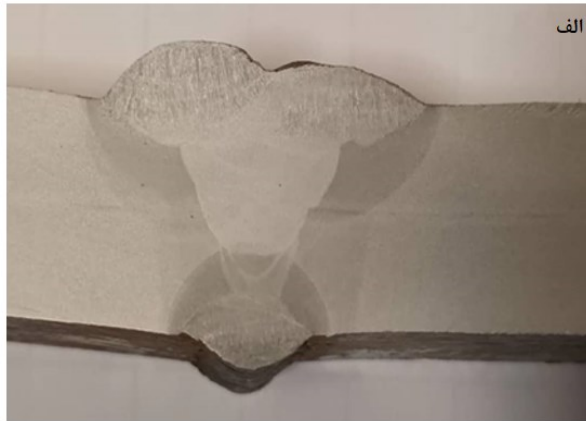
جدول ۲ پارامترهای جوشکاری SMAW را نشان می‌دهد که برای پژوهش استفاده شده و در آن نوع جوش به صورت اتصال V شکل و شامل دو الکتروود متفاوت E7018 و E8018 می‌باشد. این دو الکتروود به این دلیل انتخاب شده‌اند که در دسته‌بندی پرکاربرد قرار می‌گیرند. به منظور رعایت الزامات الکتروودهای مورد استفاده در این پژوهش قبل از شروع عملیات جوشکاری، در آن کاملاً خشک شده تا عاری از هرگونه رطوبت باشند و محدوده جریان ۱۰۰ تا ۱۱۰ آمپر برای جوشکاری دو نوع اتصال مورد استفاده قرار گرفت.

سلوام و جیکوب [10] یک بررسی تجربی را برای تجزیه و تحلیل ترکیبی از الکتروودها روی لوله‌های LPG نشان می‌دهد تا جوشکاری با کیفیتی با استفاده از تکنیک SMAW داشته باشد. دو لوله فولاد کربنی با ضخامت ۴in برای جوشکاری در موقعیت ۶G مشاهده شدند. نتایج حاصل نشان داد که سختی بالاتر در جریان کم و ترکیب الکتروود E7018 و E6010 به دست می‌آید. در پژوهشی دیگر بهینه‌سازی پارامترهای SMAW برای قطعات فولادی نشان داد که پارامترهای ورودی مختلف از طریق آزمون مکانیکی بر کیفیت جوش اثر می‌گذارند. سی و شش نمونه فولاد نرم جوشکاری شده بر اساس آرایه متعامد تاگوچی روی آزمایش انتخاب شد. سختی، آزمایش‌های کششی و چقرمگی اجرا شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که کیفیت بالای جوشکاری با استحکام کششی حداکثر در جریان ۱۲۳ آمپر، شیار ۶۰ درجه و ولتاژ ۲۷ ولت به دست آمد. استحکام کششی با افزایش زاویه شیار بیشتر شد. چقرمگی با کاهش زاویه شیار کاهش پیدا کرد [11]. طالبی و همکاران [12] به بررسی تأثیر متغیرهای جوشکاری مختلف، سرعت و ولتاژ قوس بر خواص مکانیکی اتصال فولادی کم‌کربن پرداخت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش سرعت جوشکاری تا مقدار ۶۶/۶۷ mm/min سبب استحکام کششی ۴۴۰ MPa و سختی تا ۴۹ HB شد. جریان و ولتاژ مقدار سختی را افزایش دادند، اما این سبب کاهش استحکام تسلیم و کششی شد.

تحقیقات کمی در خصوص آزمون شارپی جوش در دمای پایین انجام گرفته است [13,14]. در پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۲۴، اثرات همزمان دمای پایین و خوردگی بر چقرمگی ضربه فولاد Q235 و اتصال لب به لب آن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ضربه شارپی برای فولاد Q235 و اتصال لب به لب آن در دماها و زمان‌های خوردگی مختلف انجام شد. میکرومورفولوژی سطح شکست ضربه نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مشخص شد که انرژی ضربه فولاد Q235 و اتصال لب به لب آن با کاهش دما و افزایش نرخ خوردگی تخریب می‌شود. اثر خوردگی بر انرژی ضربه با دمای پایین تشدید می‌شود. چقرمگی ضربه فولاد Q235 و اتصال لب به لب آن تحت تأثیر اثر جفت دمای پایین و خوردگی است. این مطالعه می‌تواند اطلاعاتی را برای طراحی مقاوم در برابر شکست سازه‌های فولادی در دمای پایین و محیط خوردگی ارائه دهد [15]. تأثیر فرآیند جوشکاری و مواد مصرفی جوش بر روی چقرمگی ضربه در دماهای پایین منطقه متاثر از حرارت (HAZ) و فلز جوش در یک جوش فولادی ساختاری در سال ۲۰۱۵ توسط شین و همکاران بررسی شد [16]. مقایسه‌ای از چقرمگی ضربه در دمای پایین بین اتصالات جوش داده شده به ترتیب توسط فرآیندهای جوشکاری SMAW و جوشکاری FCAW انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که فلز جوش اتصال FCAW به دلیل محتوای نیکل بالاتر، چقرمگی ضربه در دمای پایین کمی بالاتر دارد، در حالی که HAZ اتصال

جدول ۲ پارامترهای جوشکاری SMAW برای اتصال فولاد ST-52

E8018/E7018		کلاس الکتروود
سه پاس		تعداد پاس
SMAW		فرایند جوشکاری
3G		وضعیت جوشکاری
۳/۲۵	قطر (mm)	الکتروود
۱۰۰-۱۱۰	آمپر	شدت جریان
DCRP	قطبیت	
۲۸-۱۸		اختلاف پتانسیل (ولتاژ)
۸-۱۰	(mm/min)	سرعت جوشکاری
۲	(kj/mm)	حداکثر حرارت ورودی



شکل ۲) ماکروگرافی محل اتصال جوش الف) ناحیه اتصال جوش E7018 ب) ناحیه اتصال جوش E8018

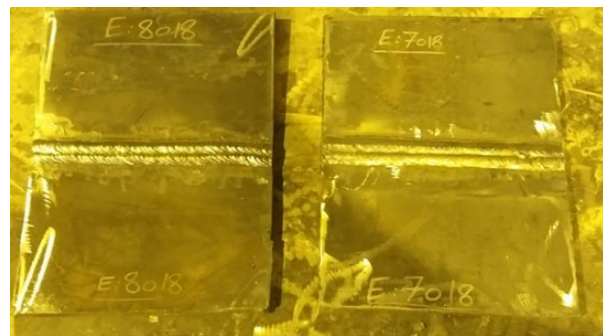
LA60 انجام شد. برطبق استاندارد ASME استحکام کشش عرضی جوش نباید از حداقل استحکام کششی تعیین شده برای فلز پایه کمتر باشد [19].

شکل ۲ ماکروگرافی نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E7018 و E8018 را نشان می‌دهد همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نتایج ماکروگرافی نمونه‌های جوشکاری شده با دو فلز پرکننده در ناحیه جوش و HAZ، ذوب کامل و نفوذ مناسب جوش و عاری از ترک ماکرو را نشان می‌دهند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج سختی‌سنجی مناطق جوش

نتایج سختی‌سنجی راکول B از مقطع قطعات جوشکاری شده هر دو الکتروود E7018 و E8018 در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج سختی سختی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در دو طرف اتصال فولاد ST52 سختی ناحیه متأثر از حرارت افزایش یافته است؛ در سرعت جوش آهسته تر، نیروی قوس توسط فلز جوش اضافی که رسوب می‌کند کاهش می‌یابد و سبب انتقال حرارت کمتر به قطعه می‌شود زیرا گرما تا حدی توسط خود مهره جوش پخش می‌شود، دماهای پایین تر با نرخ خنک کننده بالاتر همراه است که منجر به ساختارهای سخت تر می‌شود. با توجه به میزان گرمای ورودی،



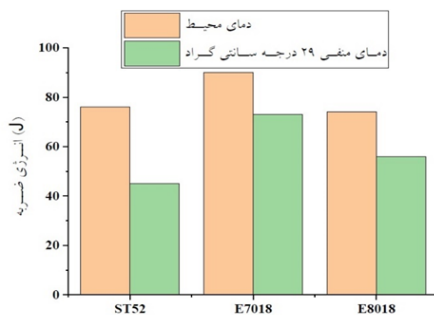
شکل ۳) اتصال جوش فولاد ST-52 با استفاده از فرایند جوشکاری SMAW

جوشکاری هر دو اتصال با استفاده از الکتروودهای با قطر ۳/۲۵ میلی‌متر انجام شد. پس از عملیات جوشکاری برای اطمینان از سلامت جوش و عدم حضور ترک در محل اتصال جوش آزمون رادیوگرافی و آزمون مایع نافذ انجام شد. شکل ۱ دو نمونه جوش شده با استفاده از فرایند جوشکاری SMAW را نشان می‌دهد. جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی اساساً بسیار وابسته به مهارت اپراتور است و نمونه‌های تولید شده به این روش ممکن است تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای از نظر ساختار و استحکام با یکدیگر داشته باشند. بنابراین جوشکار بسیار ماهر انتخاب شد تا نتایج به دست آمده از دو نمونه جوشکاری شده قابل اتکا باشد.

اندازه‌گیری سختی مناطق مختلف جوش اتصال فولاد ST-52 با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی راکول B برطبق استاندارد (ASTM E18) انجام شد. سختی‌سنجی به فاصله ۵ میلی‌متر از یکدیگر انجام گردید. با مطالعه ریزساختار ناحیه اتصال، نحوه تقسیم بندی مناطق مختلف جوش و تعیین مرز منطقه متأثر از حرارت انجام خواهد گرفت. آزمون ضربه شاری برطبق استاندارد ASTM E23 به وسیله دستگاه SANTAM در دمای محیط و دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد بر روی فلز جوش انجام شد. برای هر نمونه سه آزمون ضربه شاری انجام شد و میانگین انرژی جذب شده در سه آزمون، تعیین گردید. پس از انجام آزمون سطح مقطع شکست نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM ساخت شرکت TE-SCAN مدل MIRA3 بررسی شد. آزمون کشش عرضی جوش برطبق استاندارد ASME به وسیله دستگاه GOTECH AL-7000

جدول ۴) نتایج آزمون ضربه در دمای محیط و دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد

نمونه	دمای محیط		دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد		محل شکاف
	انرژی ضربه (J)	میانگین انرژی ضربه (J)	انرژی ضربه (J)	میانگین انرژی ضربه (J)	
فلز پایه فولاد St52	۷۵	۷۸	۷۶	۷۶	
نمونه جوش E7018	۹۲	۹۳	۸۵	۹۰	فلز جوش
نمونه جوش E8018	۸۰	۵۹	۸۴	۷۴	فلز جوش



شکل ۴) مقایسه میانگین انرژی ضربه در دمای محیط و دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد

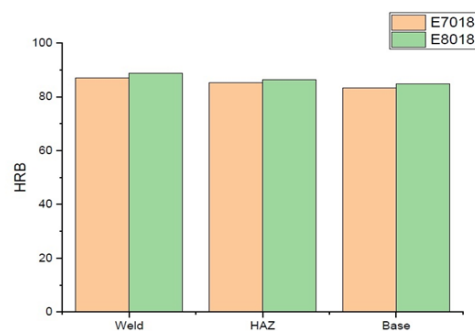
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود فلز جوش در نمونه E8018 بیشترین سختی و نمونه E7018 کمترین سختی فلز جوش را دارا می‌باشد و این موضوع به دلیل تغییر مورفولوژی ساختار فلز جوش در اثر اعمال حرارت ورودی جوشکاری بیشتر است. با افزایش حرارت ورودی، نرخ سرمایش کاهش می‌یابد و امکان ماندن جوش در بازه‌های دمایی بالاتر به مدت طولانی‌تر را ایجاد می‌کند. دانه‌های درشت تولیدشده، کاهش در سختی را در پی خواهند داشت مقادیر کمتر سختی ساختار شکننده کمتری را تضمین می‌کند [23].

### ۳-۲- نتایج آزمون ضربه شارپی

آزمایش ضربه شارپی میزان انرژی جذب شده توسط یک ماده را در طول شکست تعیین می‌کند. این انرژی جذب شده معیاری از چقرمگی برای مواد است و به عنوان ابزاری برای مطالعه شکست نرم و ترد وابسته به دما عمل می‌کند. نتایج به دست آمده آزمون ضربه بر روی فولاد ST-52 و فلز جوش الکتروود E7018 و الکتروود E8018 جوشکاری SMAW در دمای محیط و دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد در جدول ۴ و شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۳) نتایج سختی سنجی اتصال جوش

موقعیت سختی‌سنجی	سختی (HRB)	
	نمونه جوش E7018	نمونه جوش E8018
Base	۸۲	۸۴/۳
Base	۸۴/۹	۸۴/۵
HAZ	۸۵/۹	۸۴/۵
HAZ	۸۷	۸۴/۸
HAZ	۸۵/۷	۸۶/۳
Weld	۸۶/۶	۸۸
Weld	۸۸/۵	۸۸/۵
Weld	۸۶	۸۹/۴
HAZ	۸۴/۹	۸۸/۶
HAZ	۸۴	۸۷/۱
HAZ	۸۳/۵	۸۶/۹
Base	۸۳	۸۵/۹
Base	۸۳	۸۴/۵



شکل ۳) میانگین سختی در مناطق مختلف جوش مربوط به نمونه‌های جوش E7018 و E8018

سختی این ناحیه با افزایش میزان حرارت ورودی جوشکاری کاهش می‌یابد [20,21]. تأثیر حرارت ورودی جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی منطقه‌ی HAZ در اتصالات فولادهای استحکام بالا مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد سختی در قسمت HAZ در اتصالات جوش نسبت به فلز پایه، بسیار بالاتر است. سختی متوسط HAZ با افزایش حرارت ورودی جوشکاری کاهش می‌یابد [22]. افزایش حرارت ورودی باعث رشد بیشتر دندریت‌ها و همچنین افزایش درصد رسوبات شده که می‌تواند منشأ ترک باشند. مقدار میانگین سختی در مناطق مختلف جوش مربوطه نمونه‌های جوش E7018 و E8018 در شکل ۳ نشان داده شده است. تنوع سختی در مناطق مختلف جوش در دو نمونه E7018 و E8018 به دلیل ناهمگنی شیمیایی و ساختار غیرهمگن غالب در مناطق مختلف جوش است. علاوه بر این، مقادیر میانگین سختی راکول B برای فلز پایه و HAZ نیز نشان می‌دهد رفتار مشابه مانند فلز جوش در دو نمونه یکسان است. میانگین مقدار سختی HAZ، در دو طرف اتصال جوش بیشتر از فلز پایه بود. بیشترین سختی ناحیه جوش در نمونه E8018 مشاهده شد.

نتایج آزمون ضربه نشان می‌دهد نمونه‌های فلز جوش الکتروود E8018 در مقایسه با نمونه جوش الکتروود E7018 دارای انرژی ضربه کمتری است و این کاهش انرژی ضربه فلز جوش در اتصال فولاد ST-52 با استفاده از فلز پرکننده E8018 می‌تواند ناشی از حرارت ورودی جوشکاری بیشتر و ساختار غیرهمگن فلز جوش باشد که این موضوع در نتایج مربوط به سختی فلز جوش E8018 نیز قابل مشاهده است.

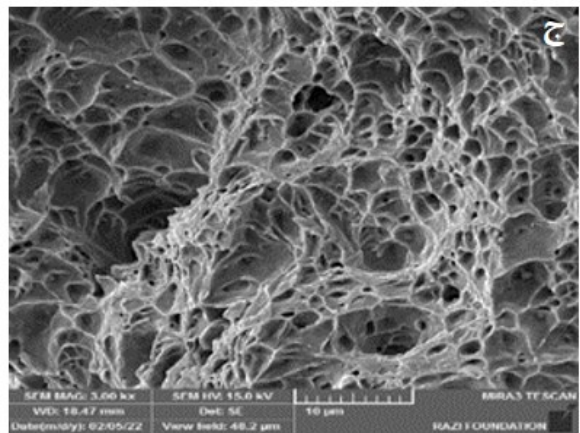
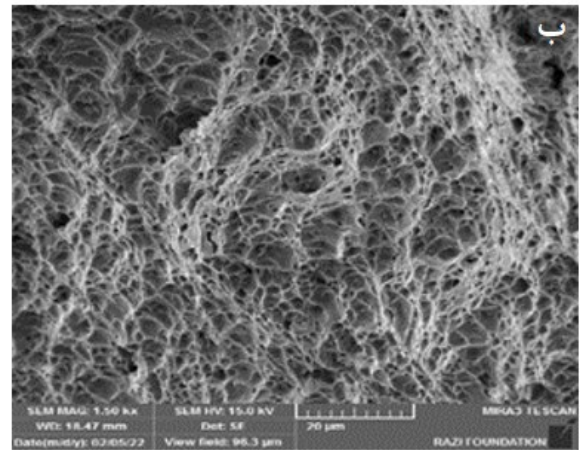
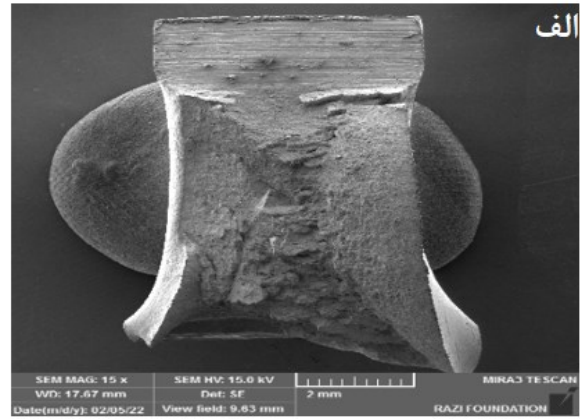
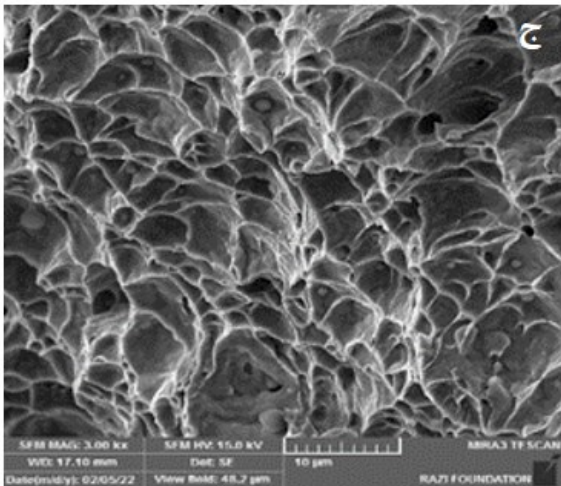
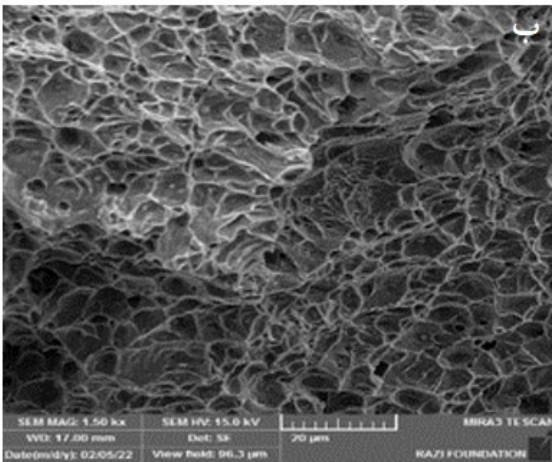
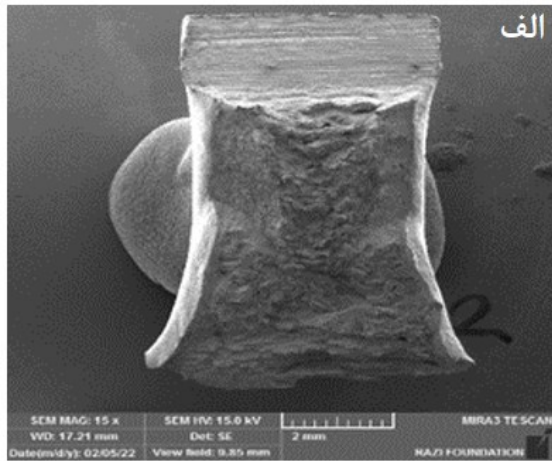
در فولادهای کم‌کربن، توجه خاصی باید به منطقه تحت تأثیر حرارت معطوف گردد؛ زیرا که این منطقه دمای بالایی دارد و ساختار دانه‌درشت تولید می‌شود که منجر به چقرمگی پایین در نقطه‌ی جوش می‌شوند. تغییر سختی نواحی مختلف HAZ به تدریج از فصل مشترک جوش به سمت ناحیه ریزدانه تنزل پیدا می‌کند. به طور عمومی، زمانی که در ناحیه‌ی HAZ حرکت می‌کنیم، از فلز پایه تا خط گداخت، دمای حداکثر افزایش می‌یابد و بنابراین به طور مشابه، اندازه‌ی دانه‌ی و سختی نیز افزایش می‌یابد. مقادیر بالای سختی معمولاً با افزایش تُردی و کاهش داکتیلیتی همراه است [24]. محل فاق شیار بسیار مهم است، اگر بریدگی در ناحیه‌ای با ریزساختارهای سخت و شکننده ایجاد شود، انرژی جذب شده بسیار کمتر خواهد بود و همچنین سریع سرد شدن جوش باعث تسریع تشکیل فازهای شکننده می‌شود. با افزایش حرارت ورودی و در نتیجه درشت شدن دانه‌ها و همچنین ایجاد ناهمگنی ساختار فولاد، انرژی شکست کاهش می‌یابد. با بزرگ شدن دانه‌ها، ترک در مسیرهای راحت‌تری در بین دانه‌ها می‌تواند گسترش پیدا کند. افزایش حرارت ورودی همچنین باعث افزایش درصد رسوبات شده که می‌تواند منشأ ترک باشند و در نتیجه انرژی شکست را کاهش می‌دهند. ساختار درشت یکی از عوامل اصلی بدتر شدن چقرمگی است. به طور معمول، ساختار درشت منجر به کاهش چقرمگی HAZ و فلز جوش می‌شود. ترکیبات موجود در ساختار نیز نقش مهمی در چقرمگی و یا شکنندگی HAZ و فلز جوش ایفا می‌کند [21,22]. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار انرژی ضربه در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد کمتر از انرژی ضربه در دمای محیط است، هنگامی که انرژی ضربه به عنوان تابعی از دما رسم می‌شود، انتقال از شکست نرم به شکست ترد قابل مشاهده است، منحنی کاهش سریع انرژی ضربه را با کاهش دما نشان می‌دهد. مقادیر ضربه شاریبی در دمای منفی معمولاً پایین‌تر از مقادیر در دمای محیط است.

در ضوابط لرزه ای آیین‌نامه AISC 341-10 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران دو نوع تقسیم بندی شامل نوع یک جوش های به‌کاررفته در سیستم باربر جانبی لرزه ای در اتصالات و نیز وصله ستونهای غیر باربر جانبی. و نوع دو جوش های (نیاز بحرانی)، نظیر جوش های با نفوذ کامل و شیاربی در قابهای خمشی ویژه و متوسط و اتصالات تیرهای پیوند قابهای مهاربندی شده واگرا می‌باشد [25,26]. برای جوش‌های نوع دوم در آیین‌نامه AISC ،

طاقة نمونه شیار داده شده شاریبی فلز جوش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد باید حداقل ۵۴ ژول باشد بنابراین باتوجه به اینکه میانگین آزمون ضربه شاریبی سه نمونه هر دو اتصال جوش بیش از ۵۴ ژول است [25] در ضخامت ورق ۱۲ میلی‌متر الزامات لرزه ای را برای جوش برآورده می‌کند. همچنین در آیین‌نامه AISC و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران در اتصالات و وصله‌های با جوش نفوذی کامل، در قابهای خمشی ویژه و متوسط و تیرهای پیوند قاب‌های مهاربندی شده واگرا، باید طاقته نمونه شیار داده شده ضربه شاریبی استاندارد فلز جوش در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد، حداقل ۲۷ ژول باشد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میانگین انرژی ضربه فلز جوش E7018 ۹۰ ژول در دمای محیط که بیشتر از میانگین ۷۴ ژول انرژی ضربه فلز جوش E8018 می‌باشد همچنین میانگین انرژی ضربه در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۷۳ و ۵۶ ژول مربوط به فلز جوش E7018 و فلز جوش E8018 می‌باشد فلز جوش E8018 در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد رفتار شکست ترد و مقاومت به ضربه کمتری نسبت به فلز جوش E7018 دارد. بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و همچنین ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC 341-10 فلزات پرکننده E7018 و E8018 الزامات مقاومت به ضربه جوش در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد را تأمین می‌نماید.

مقطع شکست نمونه‌ها ضربه جوش در اتصال فولاد ST-52 به روش جوشکاری SMAW به‌وسیله یک میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست فلز جوش نمونه‌های جوش الکتروود E7018 و جوش الکتروود E8018 در شکل‌های ۵ الی ۸ ارائه شده است. مورفولوژی‌های سطوح شکست که در مشاهدات شکست نگاری شناسایی گردیدند شامل دیمپلی نرم و ترد هستند. مورفولوژی دیمپلی نرم که معرف مکانیزم شکست اتصال حفره‌ها و حاکی از وقوع شکست نرم یا داکتیل از طریق جوانه‌زنی و به هم پیوستن حفره‌ها می‌باشد [27].

با مشاهده شکل های ۵ و ۶ مقاطع شکست نمونه‌های ضربه در دمای محیط نشان می‌دهد در این شرایط سطح شکست نوعی مورفولوژی دیمپلی را در نمونه فلز جوش الکتروود E7018 و فلز جوش E8018 نشان می‌دهد. حفرات و دیمپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند.

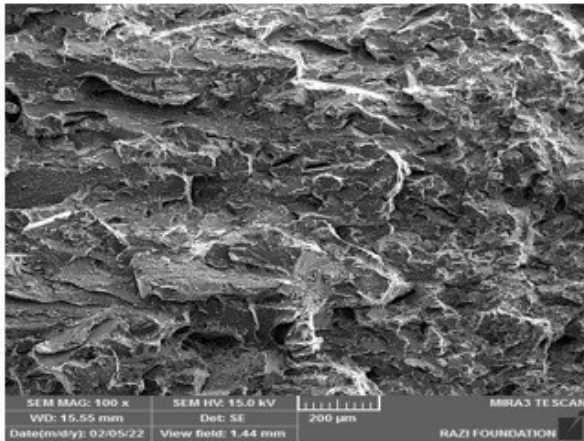


شکل ۵) تصاویر SEM از مقطع شکست نمونه ضربه فلز جوش E7018 در دمای محیط (الف) مورفولوژی دیمپلی سطح شکست (ب) حفرات و دیمپل‌ها در ساختار (ج) حفرات و دیمپل‌ها در نمای نزدیک‌تر

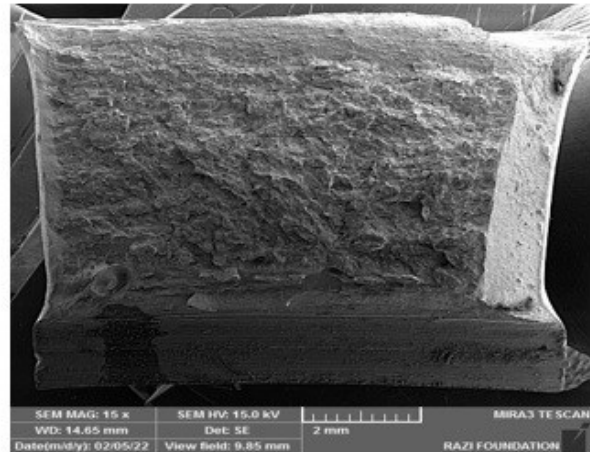
شکل ۶) تصاویر SEM از مقطع شکست نمونه ضربه فلز جوش E8018 در دمای محیط (الف) مورفولوژی دیمپلی سطح شکست (ب) حفرات و دیمپل‌ها در ساختار (ج) حفرات و دیمپل‌ها در نمای نزدیک‌تر

موجود در ساختار در طیف EDS حاوی عناصر اکسیژن، سیلیسیم و منگنز به میزان درصد بالا و مقادیری گوگرد و تیتانیم می‌باشد. همان‌طور که در طیف EDS این رسوبات در نقاط A و B مشاهده می‌شود حضور عناصر اکسیژن، سیلیسیم و منگنز با درصد بسیار بالا نسبت به سایر عناصر تأیید می‌شود که نشان می‌دهد این رسوبات ترکیبات اکسیدهای سیلیسیم و منگنز می‌باشد. عناصر

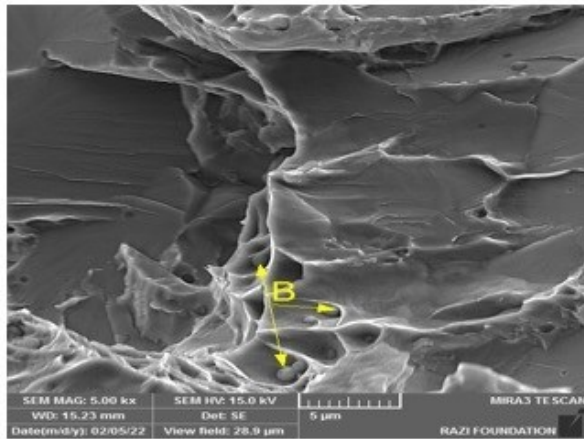
شکل های ۷ و ۸ مقاطع شکست نمونه‌های ضربه در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد در این شرایط سطح شکست نوعی مورفولوژی دیمپلی را در نمونه فلز جوش الکتروود E7018 و شکست نسبتاً ترد در نمونه فلز جوش E8018 مشاهده می‌شود. حفرات و دیمپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند حضور دیمپل-های درشت در سطح شکست، نشان‌دهنده شکست کاملاً نرم را دارد منشأ به وجود آمدن این حفرات در ساختار ممکن است ناشی از رسوبات موجود در زمینه باشد. نقاط A و B (شکل ۷) رسوبات



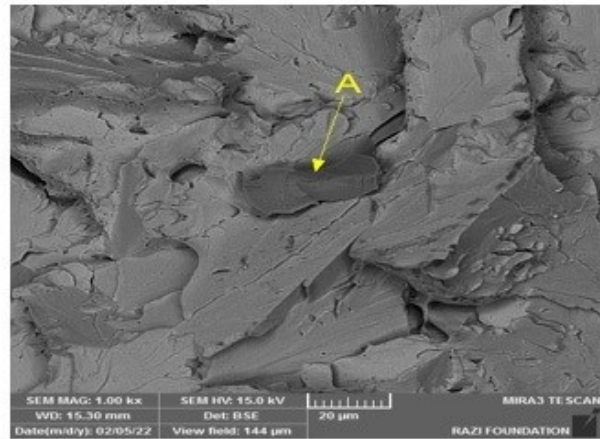
ب



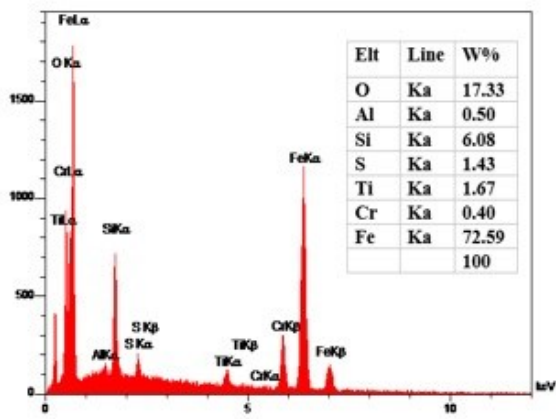
الف



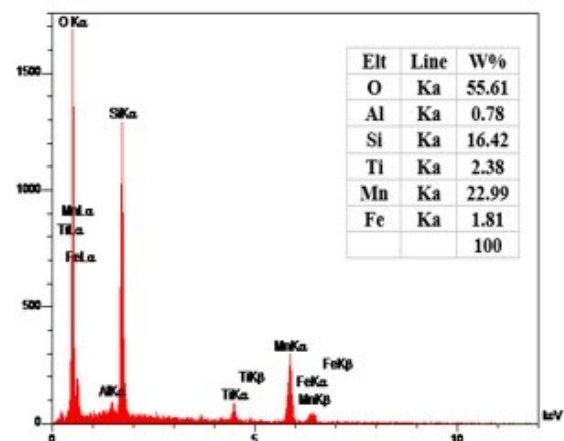
ت



پ



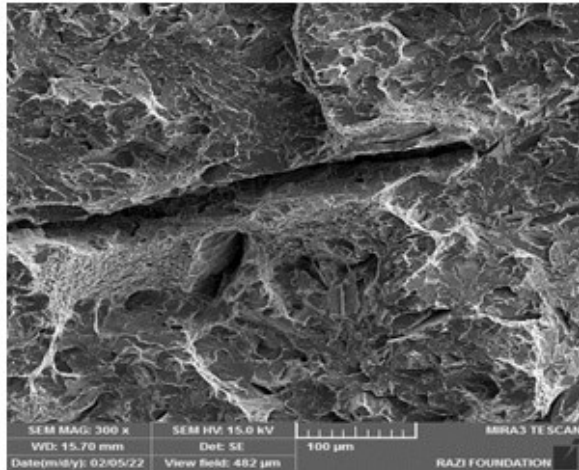
ج



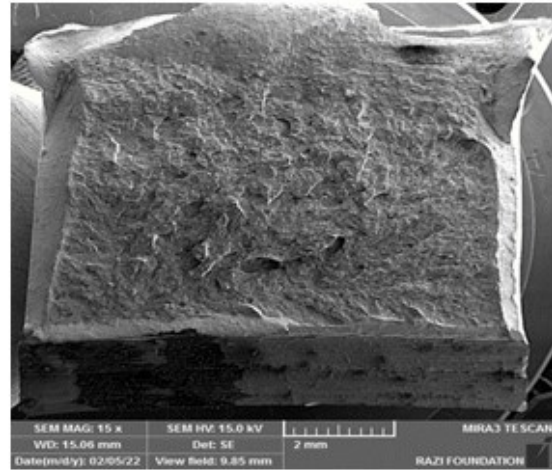
ث

شکل ۷) تصاویر SEM و طیف EDS از مقطع شکست نمونه ضربه فلز جوش E7018 در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد (الف) مورفولوژی دیمپلی سطح شکست (ب) حفرات و دیمپل‌ها در ساختار (پ) محل رسوبات نقطه A (ت) محل رسوب نقطه B (ج) طیف EDS نقطه B (ث) طیف EDS نقطه A

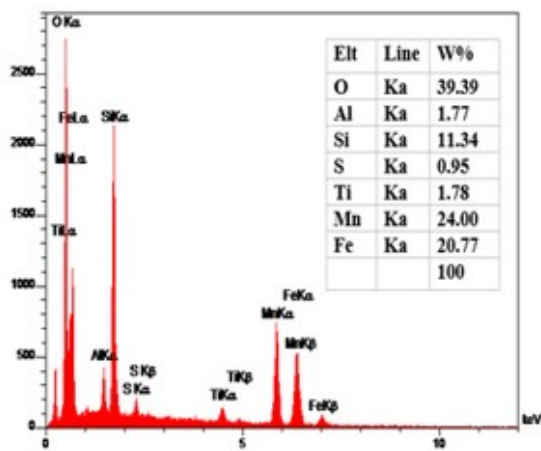




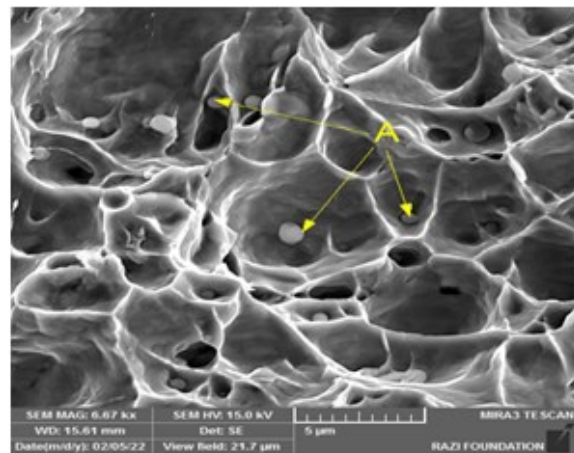
ب



الف



ت



پ

شکل ۸) تصاویر SEM و طیف EDS از مقطع شکست نمونه ضربه فلز جوش E8018 در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد (الف) مورفولوژی سطح شکست نسبتاً ترد (ب) رشد ترک در امتداد مرزهای دانه (پ) محل رسوبات نقطه A (ت) طیف EDS نقطه A

جدول ۵) نتایج آزمون کشش نمونه‌ها در دمای محیط

نوع الکترود	نمونه آزمون کشش	منطقه شکست	استحکام نهایی (N/mm <sup>2</sup> )	استحکام تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	سطح مقطع (mm <sup>2</sup> )	ضخامت×عرض (mm)
E7018	T1	Base Metal	۵۴۶	۴۴۰	۱۲۸/۹۷۰	۹/۹۰×۱۲/۹۷
	T2	Base Metal	۶۰۷	۴۹۶	۱۲۸/۴۰۳	۹/۸۳×۱۳/۱۲
E8018	T1	Base Metal	۶۰۸	۴۹۲	۱۲۸/۲۷۳	۹/۸۹×۱۲/۹۷
	T2	Base Metal	۵۴۸	۴۵۰	۱۲۸/۴۰۳	۸/۸۴×۱۳/۰۹

اتصال انجام شد. نتایج آزمون کشش عرضی جوش اتصال جوشکاری شده با روش SMAW در جدول ۵ ارائه شده است. داده‌های به دست آمده از آزمایش کشش برای تحقیق حاضر، استحکام تسلیم و استحکام کششی است. مقادیر به دست آمده برای استحکام تسلیم و استحکام کششی، خواص مکانیکی مورد انتظار هنگام جوشکاری با الکترودهای انتخابی و اتصال مناسب فولاد ST-52 را تأیید می‌کند. به دلیل اینکه محل شکست

سیلیسیم و منگنز در ترکیب شیمیایی فلز پرکننده E7018 وجود داشته ترکیب این عناصر با اکسیژن باعث ایجاد ترکیبات اکسیدی در فلز جوش شده است حضور این رسوبات اکسیدی سبب ضعیف شدن مقاومت به ضربه فلز جوش می‌گردد. با مشاهده شکل ۸ (ب) سطوح شکست فلز جوش الکترود E8018 تغییر مکانیسم شکست و یا ایجاد مسیر رشد ترک در امتداد مرزهای دانه مشاهده می‌شود. سطح شکست نوعی مورفولوژی دیپلی با انرژی ضربه‌ای پایین را در نمونه جوش الکترود E8018 همراه با رشد ترک نشان می‌دهد. نقطه A (شکل ۸) در طیف EDS رسوبات حاوی عناصر اکسیژن، منگنز و سیلیسیم می‌باشد که این ترکیبات اکسیدی می‌تواند عامل انرژی ضربه پایین و رشد ترک در فلز جوش الکترود E8018 باشد.

### ۳-۳- نتایج آزمون کشش عرضی جوش

آزمون کشش عرضی اتصال جوش فولاد ST-52 به منظور مشخص شدن روش مناسب جوشکاری از نظر خواص مطلوب جوش برای

بیشتر از ۵۴۶ مگا پاسکال بوده پس بنابراین از نظر الزمات این آیین‌نامه استحکام جوش هر دو اتصال مورد تایید می‌باشد. شکل ۱۰ نمونه‌های کشش پس از شکست را نشان می‌دهد. از نتایج آزمون‌های کشش عرضی جوش ملاحظه می‌شود که در جوشکاری اتصال فولاد ST-52 می‌توان از هر دو نوع الکتروود استفاده نمود.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش دو نمونه اتصال فولاد ST-52 با استفاده از الکتروود E7018 و الکتروود E8018 توسط جوشکاری SMAW انجام شد. سختی، مقاومت به ضربه جوش در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت و موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

۱- سختی ناحیه تحت تأثیر حرارت نسبت به فولاد ST-52 در هر دو فلز جوش افزایش داشت بالاترین سختی در ناحیه فلز جوش مربوط به فلز جوش E8018 بود میانگین سختی فلز جوش E7018 (87HRB) و میانگین سختی فلز جوش E8018 (88.6 HRB) بود.

۲- نتایج آزمون ضربه نشان داد میانگین انرژی ضربه فلز جوش E7018 در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر از میانگین انرژی ضربه فلز جوش E8018 می‌باشد.

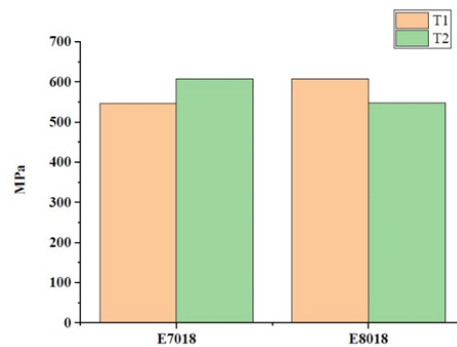
۳- نتایج آزمون ضربه نشان می‌دهد که فلز جوش E8018 در دمای منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد سطح شکست نوعی مورفولوژی ترد که همراه با جذب انرژی کمتر در مقایسه با مورفولوژی دیمپلی نرم فلز جوش E7018 دارد. براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و همچنین ضوابط لرزه ای آیین‌نامه AISC 341-10 فلزات پرکننده E7018 و E8018 الزامات استحکام نهایی و مقاومت به ضربه جوش در دمای محیط و منفی ۲۹ درجه سانتی‌گراد را تأمین می‌نماید.

۴- نتایج حاصل از آزمایش کشش عرضی جوش الکتروود E7018 و الکتروود E8018 نشان داد استحکام نهایی جوش هر دو فلز پرکننده بالاتر از ۵۴۶ مگا پاسکال بود به طوری که نمونه کششی از محل فلز پایه ST-52 دچار شکست شد. همچنین استحکام کششی نهایی در نمونه جوشکاری شده با استفاده از الکتروود E8018 بیش از نمونه جوشکاری شده با الکتروود E7018 بود.

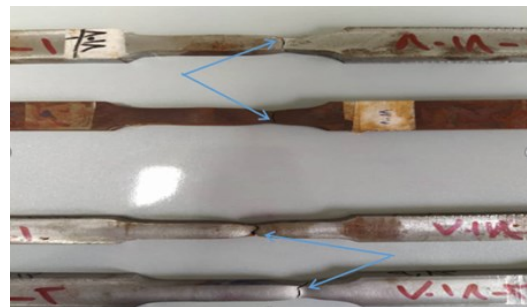
۵- فلز پرکننده الکتروود E7018 و الکتروود E8018 الزامات استحکام نهایی جوش را بر اساس ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC 360 و همچنین مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران را تأمین می‌نماید.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.



شکل ۹) مقایسه استحکام نهایی اتصال جوش E7018 با اتصال جوش E8018



شکل ۱۰) محل شکست نمونه‌های کشش جوش E7018 و جوش E8018

نمونه‌های کشش از ناحیه فلز پایه اتصال بوده بنابراین کمترین مقدار مقاومت تسلیم ثبت شده ۴۴۰ مگا پاسکال و استحکام کششی ۵۴۶ مگا پاسکال بالاتر از حداقل مقدار استحکام فولاد ST-52 مورد استفاده در ساخت سازه‌های فولادی می‌باشد. فولاد St-52 دارای حداقل تنش تسلیم برابر با ۳۵۵ مگا پاسکال و حداقل استحکام کششی ۵۲۰ مگا پاسکال است. طبق دستورالعمل ASME IX [20] استحکام کشش عرضی جوش نباید از حداقل استحکام کششی تعیین شده برای فلز پایه کمتر باشد. نتایج به دست آمده از آزمون کشش هر دو نمونه جوشکاری شده با الکتروود E7018 و الکتروود E8018 نشان می‌دهد استحکام جوش حاصل بالاتر از فلز پایه ST-52 بوده و نمونه کششی از محل فلز پایه ST-52 شکسته شده است. بنابراین با توجه به شکست نمونه کشش از محل فلز پایه، کیفیت جوش مورد تأیید بوده و نشان می‌دهد که هیچ گونه عیب تأثیرگذار بر روی خواص جوش در نمونه وجود نداشته است. شکل ۹ مقایسه استحکام کششی هر دو اتصال جوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است مقادیر به دست آمد در نمونه جوشکاری شده با الکتروود E8018 بیش از الکتروود E7018 می‌باشد. همچنین بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران برگرفته از AISC 360 الزمات این آیین‌نامه آمده است برای ورق هایی با ضخامت برابر یا کمتر از ۱۵ میلی متر و استفاده از الکتروود E70 یا معادل آن مقاومت نهایی کششی جوش باید بالاتر از ۴۲۰ مگا پاسکال باشد [26,28]. حداقل استحکام جوش بدست آمده از اتصال جوش الکتروود E7018 و الکتروود E8018

- 1;132:410-20.
- 14- Barbosa VS, de Godois LA, Bianchi KE, Ruggieri C. Charpy impact energy correlation with fracture toughness for low alloy structural steel welds. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021 Jun 1;113:102934.
- 15- Liu H, Zhou Y, Wang F, Lu Y, Chen Z. Experimental study on impact toughness of structural steel and its butt-welded joint at low temperature and corrosion. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024 Jan 1;212:108298.
- 16- Shin HS, Park KT, Lee CH, Chang KH, Van Do VN. Low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2015 Jul;19:1431-7.
- 17- Dornelas PH, Farias FW, e Oliveira VH, de Oliveira Moraes D, Júnior PZ, da Cruz Payão Filho J. Influence of welding interpass temperature on Charpy V-notch impact energy of coarse-grain heat-affected zone of AISI 4130 steel pipe. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Jun;108:2197-211.
- 18- Zhang S, Wang Y, Zhu M, Zhang Z, Nie P, Li Z. Relationships among Charpy impact toughness, microstructure and fracture behavior in 10CrNi3MoV steel weld joint. *Materials Letters*. 2020 Dec 15;281:128328.
- 19- Lin YC, Lin YC. Microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with SiC powder. *Surface and Coatings Technology*. 2011 Sep 25;205(23-24):5400-5.
- 20- Wan X, Wu K, Huang G, Wei R. In Situ Observations of the Formation of Fine-Grained Mixed Microstructures of Acicular Ferrite and Bainite in the Simulated Coarse-Grained Heated-Affected Zone. *Steel Research International*. 2014 Feb;85(2):243-50.
- 21- Wan XL, Wei R, Wu KM. Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone. *Materials Characterization*. 2010 Jul 1;61(7):726-31.
- 22- Dong H, Hao X, Deng D. Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2014 Apr;3:138-46.
- 23- Lundin CD, Zhou G, Khan KK. Report no. 1- Metallurgical Characterization of the HAZ in A516-70 and Evaluation of Fracture Toughness Specimens. *Welding Research Council Bulletin*. 1995(403).
- 24- Funderburk RS. Key concepts in welding engineering. *Welding Innovation*. 1999;16(1):1-4.
- 25- American Institute of Steel Construction. Seismic provisions for structural steel buildings. *American Institute of Steel Construction*; 2002.
- 26- National Building Regulations of Iran, Tenth Theme, Designing and Implementing Steel Buildings. *Engineering Bureau Office, Third Edition*, 1392.
- 27- Mills WJ. Fracture toughness of type 304 and 316 stainless steels and their welds. *International Materials Reviews*. 1997 Jan;42(2):45-82.
- 28- Design RF. Specification for structural steel buildings. *American Institute of Steel Construction, Chicago (IL, USA)*. 2005.
- 1- Mehrabi Gohari E, Mohammadi M, Nozari M, Bagherpour H. Thermal Analysis of Laser Welding in Joint of Stainless Steel to Low Carbon Steel Using Finite Element Method (FEM). *Modares Mechanical Engineering*. 2019 Jun 10;19(6):1475-82. [In Persian]
- 2- Osouli-Bostanabad K, Tutunchi A, Eskandarzade M, Kianvash A. Numerical and experimental investigation on bonding strength optimization of glass fibers-reinforced epoxy composites on a structural steel substrate. *Modares Mechanical Engineering*. 2019 Feb 20;19(2):387-96. [In Persian]
- 3- Sabokrouh M, Farahani M. Experimental investigation of the Annealing Effect on the Mechanical Properties of Girth Welding Using Nanoparticles on Gas Transmission Pipeline. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 May 10;20(5):1107-13. [In Persian]
- 4- Riabov, M.V., Lerner, Y.S. & Fahmy, M.F. Effect of low temperatures on Charpy impact toughness of austempered ductile irons. *J. of Materi Eng and Perform*. 2002;11:496-503.
- 5- Kim JH, Choi SW, Park DH, Lee JM. Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures. *Materials & Design (1980-2015)*. 2015 Jan 1;65:914-22.
- 6- Mohammed RA, Abdulwahab M, Dauda ET. Properties evaluation of shielded metal arc welded medium carbon steel material. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013 Aug;2(8):3351-7.
- 7- de Jesus Jorge L, Cândido VS, da Silva AC, da Costa Garcia Filho F, Pereira AC, da Luz FS, Monteiro SN. Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018 Oct 1;7(4):598-605.
- 8- Abbas H, Aminy AY. The effects of shielded metal arc welding (SMAW) welding on the mechanical characteristics with heating treatment in S45C steel. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2018 Feb 1 (Vol. 962, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
- 9- Tahir AM, Lair NA, Wei FJ. Investigation on mechanical properties of welded material under different types of welding filler (shielded metal arc welding). In *AIP conference proceedings*. 2018 May 9 (Vol. 1958, No. 1). AIP Publishing.
- 10- Selvam RA, Jacob SU. Experimental Investigation and Analysis of SMAW Processed Carbon Steel Pipes. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018 Oct;8(5):29-40.
- 11- Weerasekralage LS, Karunarathne M, Pathirana S. Optimization of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process for mild steel. *Journal Engineer*, August. 2019:1-7.
- 12- Talabi SI, Owolabi OB, Adebisi JA, Yahaya T. Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steel welded joint.
- 13- Tong L, Niu L, Jing S, Ai L, Zhao XL. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. *Thin-Walled Structures*. 2018 Nov