



## تعیین تجربی اثر نانوذرات تیتانیوم بر خواص مکانیکی جوش سربه‌سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران

مجید سبک روح<sup>۱\*</sup> و بهروز خوش سیما<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

### چکیده

تیتانیوم از مهم‌ترین عناصر میکروآلیاژی فولادهای کم‌آلیاژ استحکام بالا و مورد استفاده در صنعت انتقال گاز است. در این مقاله، نانوآکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم (به‌صورت جداگانه) روی دو طرح اتصال مشابه اضافه شد. در ادامه عملیات جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی (بر اساس دستورالعمل ویژه جوشکاری شرکت ملی گاز ایران) روی نمونه‌های فولادی گرید ایکس ۶۵ انجام شد. نتایج نشان می‌دهد، میزان درصد تیتانیوم در هر دو نمونه نانوآلیاژی نسبت به میکروآلیاژی افزایش یافته است؛ همچنین، میزان درصد تیتانیوم در نمونه نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم، افزایش بیشتری داشته است. افزایش میزان تیتانیوم و کاهش اندازه آن، باعث افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی می‌شود. نتایج آزمون شارپی نشان می‌دهد، در نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم، به میزان ۷۰ درصد افزایش پیدا کرده است؛ همچنین، استحکام نهایی (نمونه حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و نمونه میکروآلیاژی) ۴۰ درصد افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی:** نانو جوشکاری؛ فولادهای میکروآلیاژی؛ خطوط انتقال گاز؛ خواص مکانیکی.

## Experimental Determination of the Effect of Titanium Nanoalloy on Mechanical Properties of Girth Welding on Iranian Natural Gas Transmission Pipelines

M. Sabokrouh<sup>1,\*</sup>, B. Khoshsim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat

<sup>2</sup> M.Sc., Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak, Arak

### Abstract

Titanium is one of the most important microalloy elements of high strength low-alloy steels used in gas transmission industry. In this paper, titanium nano-oxide and titanium nano-carbide were added to two separate samples in the binding point. Then the Shielded metal arc welding (SMAW) was performed on high-strength low alloy (HSLA) steel with high grade of X-65 according to the special welding method of the National Iranian Gas Company. The results show that the percentage of titanium in both nano-alloy samples has been increased compared to the microalloy. The percentage of titanium in the sample of titanium carbide nanoparticles has increased more than that of titanium oxide nanoparticles. The Charpy test results show that in the sample containing titanium oxide nanoparticles compared to the sample containing titanium carbide nanoparticles, has been increased by 70%. Also, the final strength (sample containing titanium carbide nanoparticles compared to the sample containing titanium oxide nanoparticles) has been increased by 40%.

**Keywords:** Nano-Welding; HSLA; Gas Transmission Pipelines; Mechanical Properties.

## ۱- مقدمه

بار انجام شده است. در ابتدا، روی ورق‌های فولادی، به منظور تعیین درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده، تست کوانتومتری انجام می‌شود. پس از آن ورق‌ها با ابعاد مشخص برشکاری می‌شوند و روی ناحیه اتصال ورق‌های فولادی (با همان ابعاد و طبق همان دستورالعمل قبلی) نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم اضافه شده و بر اساس دستورالعمل مشخصی به هم جوش داده می‌شوند. بعد از انجام فعالیت جوشکاری، ضمن انجام تست‌های کشش، ضربه، کوانتومتری و متالوگرافی، نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. کلیه مراحل جوشکاری بر اساس دستورالعمل‌های ویژه شرکت ملی گاز ایران انجام شده است.

## ۲- آماده‌سازی و جوشکاری

ابتدا سطح ورق با برس سیمی و ماده استون، از هرگونه آلودگی پاک‌سازی شد. پس از آن توزیع یکنواخت نانو مواد روی طرح اتصال انجام شد. در این پژوهش، از فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالا با گرید ایکس ۶۵ استفاده شده است. استحکام تسلیم و نهایی این فولاد به ترتیب، برابر با ۵۸۶ و ۶۴۰ مگاپاسکال است و جدول ۱، آنالیز شیمیایی آن را نشان می‌دهد. به منظور کاهش تنش‌های حرارتی، کلیه مراحل برشکاری با استفاده از دستگاه واترجت انجام شد. برشکاری‌های همراه با حرارت مانند لیزر، بر خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های آزمون اثر گذار است. در شکل ۱ مراحل برشکاری دیده می‌شود.

میانگین اندازه دانه نانوذرات اکسید تیتانیوم بین ۱۰ تا ۲۵ نانومتر است. اندازه ذره نانوذرات کاربید تیتانیوم برابر ۴۰-۶۰ نانومتر، از لحاظ مورفولوژی نزدیک به کروی شکل و فاز کریستالی مکعبی شکل است. شکل ۲ الف و ب به ترتیب تصاویر نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

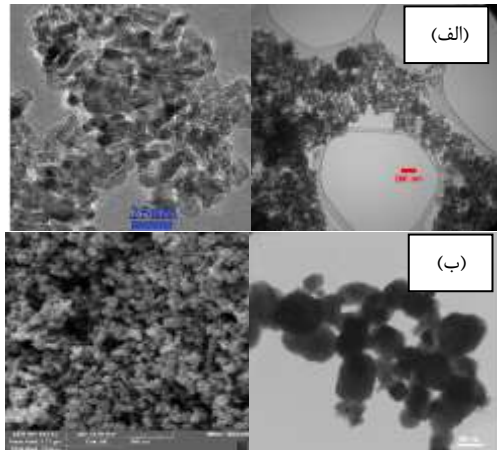
جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ایکس ۶۵

Cr	Cu	Al	Ti	Nb	V
۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۶۳
C	Si	S	P	Mn	Ni
۰/۱۹۲	۰/۱۴۹	۰/۰۰۵	۰/۰۲۶	۰/۳۲۴	۰/۰۱۸

روش اصلی و بدون جایگزین در اتصال لوله‌های خطوط انتقال گاز به هم و ایجاد یک خط لوله فولادی، جوشکاری محیطی است که به صورت خودکار یا دستی انجام می‌شود. جوشکاری، حدود ۲۵ درصد زمان کل ایجاد یک خط جدید لوله انتقال را تشکیل می‌دهد و برای انجام آن به بالاترین درجه مهارت (درجه مهارت ۱) نیاز است [۱]. ممکن است، جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد [۲]؛ بنابراین جوش علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد [۳]. به این علت تأیید سلامت به وسیله آزمون‌های مخرب نیز ضروری است [۴]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر استحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد [۵] و [۶]. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی مانند: تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم، تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود زمینه دارند [۷]. چنانچه در حین فرآیند جوشکاری به میزان حرارت ورودی توجه نشود، باعث حل شدن عناصر میکروآلیاژی و قرار گرفتن با توزیع غیریکنواخت می‌شود [۸]. در سال‌های اخیر، در این زمینه پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. بیدختی و همکارانش اثرات الکتروود جوشکاری بر خواص مکانیکی جوش فولاد کم-آلیاژ استحکام بالا را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، فریت سوزنی بیشتری در میکروساختار تشکیل شده است [۹]. هاشمی و همکارانش در تشخیص سختی قطعه جوش خورده ساختار فولاد گرید ایکس ۶۵ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، بیشترین مقدار سختی ۲۱۰ ویکرز در ناحیه جوش اتفاق افتاده است [۱۰]. چابک و همکارانش به مطالعه رفتار خستگی نانو ذرات در فولادها پرداختند و نشان دادند، در فولاد با ذرات نانو میزان عمر خستگی به سه برابر افزایش پیدا خواهد کرد [۱۱]. موزاکا و همکارانش، رفتار مکانیکی نانو ساختارها در فولاد کم آلیاژ استحکام بالا را مدلسازی کردند. [۱۲]. در این مقاله، اثر افزودن نانوذرات در حین جوشکاری بر خواص مکانیکی و متالورژیکی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج موفقیت‌آمیز حاصل از افزودن نانوذرات، باعث افزایش زمان سرویس‌دهی خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران می‌شود. روش تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی بوده و کلیه مراحل تجربی و برای اولین



شکل ۱- مراحل برشکاری ورق با استفاده از دستگاه واترجت



شکل ۲- تصویر نانو ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، الف) نانوذرات اکسید تیتانیوم، ب) کاربید تیتانیوم



شکل ۳- الف) سامانه توزیع یکنواخت نانو مواد، ب) توزیع نانو مواد در سطح جوش

استفاده از خمیر الماسه ۹ میکرون و پودر آلومینا ۰/۰۵ میکرون پولیش شد. برای مشخص کردن نواحی

در کلیه نمونه‌ها، طول خط جوش ۳۵۰ میلی‌متر، زاویه پخ ۷ شکل ۳۵ درجه، اندازه فاصله بین هر نمونه ۱/۶ میلی-متر، دمای بین هر پاس و دمای پیش‌گرم‌سازی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، نوع الکتروود پاس ریشه E6010 و نوع الکتروود پاس‌های دوم و سوم E7010 در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از هرگونه پیچش احتمالی و تنش‌های حرارتی در قطعه کار، در پشت ورق، از نگه‌دارنده‌ها استفاده شد. مرحله دمای بین هر پاس با استفاده از حرارت‌سنج لیزری به‌منظور پیروی از دستورالعمل جوشکاری کنترل شد. پس از آماده‌سازی طرح اتصال، سامانه‌ای برای توزیع نانوذرات در ناحیه جوش طراحی شد. به منظور ارزیابی تاثیر افزودن نانو ذرات در شرایط یکسان، ۱۰ گرم نانو طی دو مرحله و هر بار به میزان ۵ گرم به ناحیه جوش اضافه شد. با توجه به سه پاسه بودن جوشکاری، پس از پاس ریشه (بستر سازی برای پاشش پودر) ۵ گرم ذرات نانو به‌ترتیب در پاس دوم و سوم اضافه شد. در شکل ۳ الف و ب به ترتیب، سامانه توزیع نانوذرات و توزیع ذرات نانو در درز جوش دیده می‌شود.

پس از جوشکاری، ابتدا تست بازرسی چشمی صورت گرفت. پس از آن تست مایع نافذ، به‌منظور بررسی عاری بودن جوش از عیوب سطحی و زیرسطحی انجام شد و در پایان نیز تست رادیوگرافی جهت بررسی عاری بودن جوش از عیوب داخلی انجام شد. مجموع آزمایش‌های غیر مخرب انجام شده کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می‌نماید.

### ۳- آزمایش‌ها

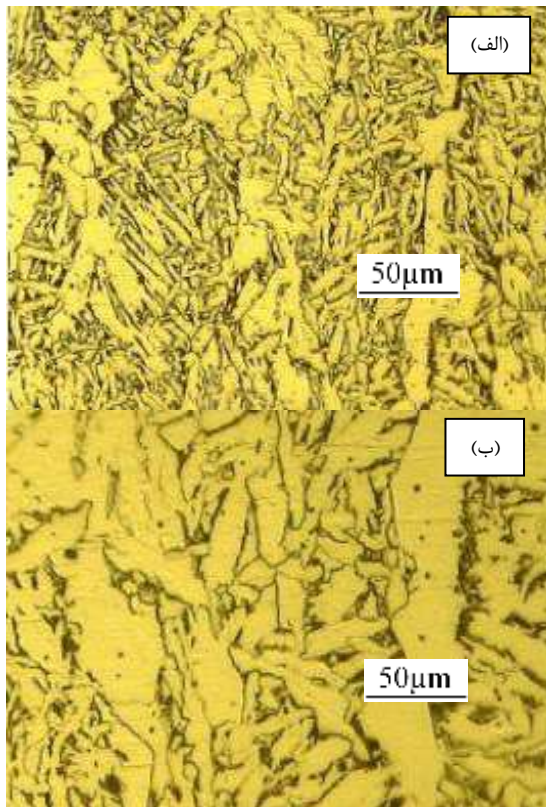
در نواحی مختلف تست کوانتومتری و متالوگرافی انجام گرفت. روی هر نمونه در راستای خط جوش، یک تست کشش (با توجه محدودیت در طول خط جوش) انجام شد. دو نمونه تست کشش عمود بر خط جوش، برای اطمینان از سلامت جوش ارزیابی شد؛ همچنین دو تست ضربه در راستای جوش و عمود بر جوش صورت پذیرفت. جدول ۲ ترکیب شیمیایی فلز جوش حاوی نانوذرات اکسید و کاربید تیتانیوم را با استفاده از آزمون کوانتومتری نشان می‌دهد.

برای مشاهده ساختار فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه تحت تاثیر حرارت، از آزمون متالوگرافی استفاده شد. جهت آزمون متالوگرافی از سنباده ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ آماده‌سازی شد و با

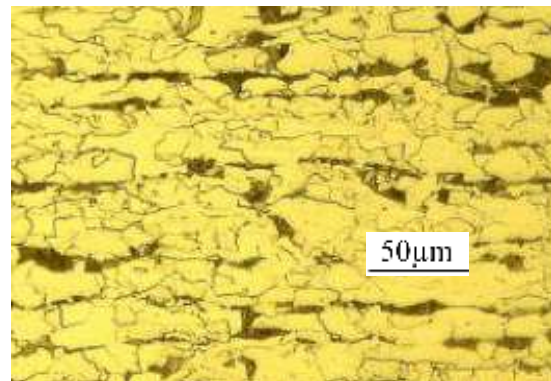
مختلف، از محلول نایتال دو درصد نمونه اچ استفاده شد. جوش نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم را در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب، ساختار میکروسکوپی فلز پایه و بزرگنمایی ۵۰ میکرومتر نشان می‌دهد.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فلز جوش همراه با نانو ذرات

Mo	Ni	Al	Ti	V	Nb	اکسید تیتانیوم
۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	
C	Si	Mn	P	S	Cr	کاربید تیتانیوم
۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۴۸	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۳	
Mo	Ni	Al	Ti	V	Nb	کاربید تیتانیوم
۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	
C	Si	Mn	P	S	Cr	کاربید تیتانیوم
۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۶۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۴	



شکل ۵- تصاویر ناحیه جوش، الف) اکسید تیتانیوم، ب) کاربید تیتانیوم



شکل ۴- فلز پایه

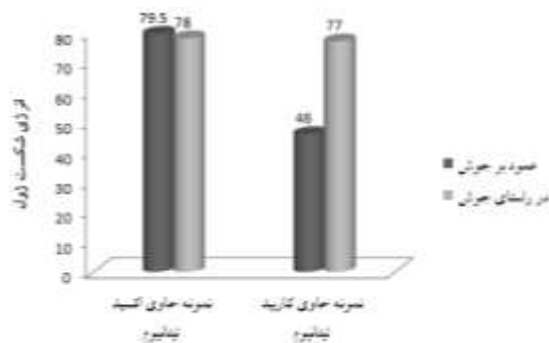
نانو ذرات تیتانیوم به صورت رسوب سختی در زمینه دانه قرار می‌گیرند؛ همچنین مقداری از این عناصر نقش جوانه زا (به ویژه در مجاورت مرز دانه) را ایفا می‌نمایند. سیکل‌های متفاوت حرارتی ناشی از جوشکاری بر نحوه قرارگیری این ذرات در زمینه و مرز دانه موثر است.

آزمون کشش روی نمونه‌ها توسط دستگاهی با ظرفیت بیست تن و با سرعت کشش پنج میلی‌متر بر دقیقه، مطابق استاندارد در دو راستای جوش و عمود بر جوش انجام شد. در آزمون کشش عرضی، شکست برای هر دو نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم در فلز پایه رخ داده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در راستای جوش، برای نمونه‌های نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در شکل ۶ نمودار

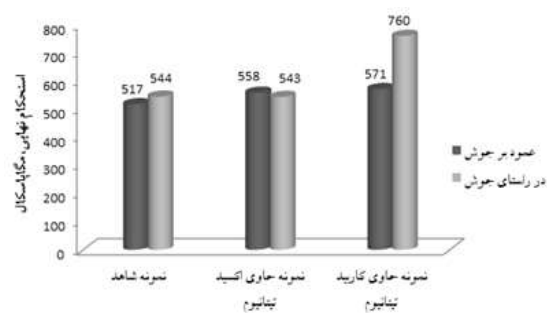
مقایسه استحکام کششی نهایی، در نمونه حاوی نانوذرات و نمونه شاهد دیده می‌شود.

جدول ۳- مشخصات آزمون کشش در راستای جوش نمونه نانو ذرات اکسید و کاربید تیتانیوم

نانو ذرات تیتانیوم	استحکام تسلیم مگاپاسکال	استحکام نهایی مگاپاسکال	ازدیاد طول نسبی	کاهش سطح مقطع
اکسید	۴۱۷	۵۴۳	٪۱۵	٪۴۱
کاربید	۵۶۹	۷۶۰	٪۲۱	٪۲۵



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمون ضربه



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمون های کشش نمونه های مختلف

نماید. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانوذرات اکسید تیتانیوم، به ترتیب، ۴۱۷ و ۵۴۳ مگاپاسال است؛ همچنین، درصد ازدیاد طول نسبی ۱۵ درصد و کاهش سطح مقطع ۴۱ درصد به دست آمد. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانوذرات کاربید تیتانیوم، به ترتیب، ۵۶۹ و ۷۶۰ مگاپاسال است؛ همچنین ازدیاد طول نسبی ۲۱ درصد، کاهش سطح مقطع ۲۵ درصد حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه نانوذرات کاربید تیتانوم نسبت به نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به- ترتیب، ۳۶ و ۴۰ درصد افزایش داشته است. این نتایج بیانگر نقش مؤثرتر نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نانوذرات اکسید تیتانیوم در افزایش خواص استاتیکی مکانیکی است. نتایج حاصل از آزمون کشش در جهت عمود بر جوش، نشان می‌دهد، استحکام نهایی در نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه شاهد به میزان ۸ درصد افزایش یافته است؛ این امر مبین تأثیر مثبت خواص مکانیکی حاصل از افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم به ناحیه جوش است. استحکام نهایی کششی راستا جوش و عمود بر جوش نمونه

آزمون ضربه شاری، بر اساس استاندارد در شیار ۷ شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلی‌متر و شعاع ریشه ۰/۲۵ روی دو نمونه، یکی در راستای جوش و دیگری در راستای عمود بر جوش انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد، میانگین انرژی شکست در راستای جوش و عمود بر جوش نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم برابر ۷۸ ژول است. در نمونه نانوذرات کاربید تیتانیوم، کم‌ترین میزان انرژی شکست در راستای جوش و عمود بر جوش به ترتیب، برابر ۴۰ ژول اتفاق افتاده است. میانگین انرژی شکست در راستای جوش و عمود بر جوش نمونه نانوذرات کاربید تیتانیوم به ترتیب، برابر با ۴۶ و ۷۷ ژول است. شکل ۷ نمودار مقایسه انرژی شکست را در نمونه حاوی نانو ذرات و نمونه شاهد نشان می‌دهد.

#### ۴- تحلیل و بررسی

در نمونه‌های عمود بر جوش، استحکام نهایی نانوذرات کاربید تیتانیوم، نسبت به نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم بیشتر است. شایان ذکر است، هردو نمونه از ناحیه فلز پایه گسیخته شده‌اند. نتایج مذکور کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می

در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به جوش، نمایان کننده دانه‌های فریت و فریت سوزنی به همراه نواحی کوچک پرلیت است. ساختار میکروسکوپی در ناحیه جوش، نشان دهنده ساختار شبکه فریت در مرز دانه‌های آستنیت اولیه با رشد صفحات جانبی به همراه فریت پرویوتکتوئید و پرلیت ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی پرلیت است. در بزرگ‌نمایی بیشتر، در نواحی دیگری از جوش ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به ناحیه جوش، رشد فریت و فریت سوزنی دیده می‌شود که این امر، باعث افزایش استحکام در هردو نمونه می‌شود. علت این افزایش، جوانه‌زنی فریت به دلیل افزودن نانوذرات در فلز جوش است. این ذرات در فلز جوش هنگام انجماد، شروع به جوانه‌زنی کرده و از رشد نابجایی‌ها جلوگیری می‌کنند که این امر منجر به رشد فریت سوزنی می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

- ۱- استحکام تسلیم ناحیه جوش در نمونه حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم به میزان ۳۶ درصد افزایش داشته است.
  - ۲- انرژی شکست در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم، به میزان ۷۲ درصد افزایش پیدا کرده است
  - ۳- نانو ذرات تیتانیوم با استفاده از مکانیزم‌های رسوب سختی و ریز دانه کردن باعث افزایش خواص مکانیکی (استحکام تسلیم و انرژی شکست) شده‌اند.
  - ۴- میزان عنصر تیتانیوم در نمونه‌های نانوذرات کاربید تیتانیوم، نانوذرات اکسید تیتانیوم و نمونه شاهد به ترتیب، برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۱ و ۰/۰۸ است.
- بنابراین، با افزایش نمونه‌های آزمون و بهینه‌سازی ترکیب مؤثر نانو اکسید و کاربید تیتانیوم، می‌تواند به صورت هم‌زمان، استحکام استاتیکی و دینامیکی را افزایش دهد.

#### ۶- مراجع

- [1] Breakthrough Strategy Committee, Construction Industry Institute (2003) New joining technology for metal pipe in the construction industry. BTSC

حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب، به میزان ۳۹ درصد و ۱۰ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد، نانوذرات کاربید تیتانیوم نقش قابل توجهی در افزایش خواص مکانیکی فلز جوش داشته است. نتایج تست ضربه عمود بر جوش، میانگین انرژی شکست در نمونه‌های نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم را به ترتیب، برابر با ۷۹/۵ و ۴۶ ژول نشان می‌دهد. بنابراین در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم، انرژی شکست به میزان ۷۲ درصد افزایش یافته است؛ این امر نشان دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه‌پذیری در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم است. مقایسه درصد عنصر تیتانیوم در دو نمونه حاوی نانوذرات و نمونه شاهد، بیانگر افزایش قابل توجه مقدار عنصر تیتانیوم در ناحیه جوش پس از افزودن نانوذرات کاربید تیتانیوم است. این نتایج حاکی از آن است که این عناصر پس از افزوده شدن به ناحیه جوش، با حرارت ایجاد شده توسط قوس الکتریکی سوزانده نشده و به وسیله سرباره از ناحیه جوش خارج نشده است که این امر خود دلیلی بر موفقیت آمیز بودن اثر افزودن این نانو مواد بر ناحیه جوش است. نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد، ساختار میکروسکوپی نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم در فلز پایه، دانه‌های فریت به همراه نواحی ردیف‌های پرلیت است. ساختار میکروسکوپی در ناحیه، متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت را نشان می‌دهد. ساختار میکروسکوپی در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به جوش، نشان دهنده دانه‌های فریت و فریت سوزنی به همراه نواحی کوچک پرلیت است. ساختار میکروسکوپی در ناحیه جوش بیانگر ساختار شبکه فریت در مرز دانه‌های آستنیت اولیه با رشد صفحات جانبی به همراه فریت پرویوتکتوئید و پرلیت ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی پرلیت است. در بزرگ‌نمایی بیشتر، در نواحی دیگری از جوش ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت قابل مشاهده است. ساختار میکروسکوپی نانوذرات کاربید تیتانیوم در فلز پایه، دهنده دانه‌های فریت به همراه نواحی ردیف‌های پرلیت می‌باشد. ساختار میکروسکوپی در ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به فلز پایه، ساختار ریزدانه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت را نشان می‌دهد. ساختار میکروسکوپی

- جوشکاری زیرپودری فولاد API X65. مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱-۱۲: ۱(۳).
- [7] Beidokhti B, Koukabi AH, Dolati A (2009) Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties. Mater Charact 60: 225-233.
- [8] Wan XL, Wei R, Wu KM (2010) Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone. Mater Charact 61: 726-731.
- [9] Beidokhti B, Koukabi AH, Dolati A (2009) Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded high strength alloy pipeline steel. J Mater Process Tech 209: 4027-4035.
- [10] Hashemi SH, Mohammadyani D (2012) Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. Int J Pres Ves Pip 98: 8-15.
- [11] Chabok A, Dehghani K, Ahmadi Jazani M (2014), Comparing the Fatigue and Corrosion Behavior of Nanograin and Coarse-Grain IF Steels. ACTA Metall Sin 28: 295-301.
- [12] Muszka K, Majta J, Hodgson PD (2007), Modeling of the Mechanical Behavior of Nanostructured HSLA Steels. ISIJ Int 47: 1221-1227.
- Document 2003-1, Austin, TX: Construction Industry Institute.
- [۲] سبک روح م، هاشمی س ح، فراهانی م ر (۱۳۹۲) بررسی تجربی ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنش‌های پسماند ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران. پژوهش نفت ۶۵-۷۹: ۲۳(۷۶).
- [۳] سبک روح م، هاشمی س ح، فراهانی م ر (۱۳۹۲) ارزیابی اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت استاتیکی و چقرمگی دینامیکی ناحیه جوش چند گذر محیطی در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بر اساس معیارهای جدید طراحی. پژوهش نفت ۲۴-۳۶: ۲۶(۲).
- [۴] هاشمی س ح، فرهی ع (۱۳۹۱)، تعیین تجربی چقرمگی شکست در درز جوش مارپیچ لوله فولادی ترمومکانیکال. مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۳۵-۲۵: ۴(۲).
- [۵] افتخاری م، نجف آبادی م ا، فراهانی م ر (۱۳۹۶) ارزیابی تغییرات تنش پسماند طولی در راستای ضخامت در اتصال جوشی‌آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶. مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱-۱۶: ۳(۷).
- [۶] مرادپور م ع، هاشمی س ح، خلیلی خ (۱۳۹۲) بکارگیری منطق فازی جهت پیش بینی هندسه جوش در فرآیند