نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 48-33

واکاوی و پیش بینی تأثیر نانوذرات ZrO_2 بر عمق نفوذ و سختی ناحیه ذوب شده فولاد کم کربن در فرایند GMAW با استفاده از منطق فازی

فرزاد پهنانه[1]، مسعود آقاخانی[2*]، رضا اسلامی فارسانی[3]، مهدی کرمی پور[1]

1- گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

3- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: 1398/01/19 ؛ پذیرش مقاله: 1399/02/22)

چکیده

آن‌چه که دراین مقاله آمده است پیش بینی تاثیر نانوذرات اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) در حضور سایر پارامتر های جوشکاری قوسی فلز- گاز فولاد کم کربن به منظور بررسی سختی منطقه جوش، با استفاده از منطق فازی می باشد. در این واکاوی ولتاژ جوشکاری، جریان جوشکاری، سرعت جوشکاری، طول مؤثر الکترود و ضخامت پوشش نانوذرات اکسید زیرکونیوم به عنوان متغیرهای ورودی و سختی ناحیه ذوب‌شده به عنوان متغیر خروجی درنظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها از طراحی مرکب مرکزی چرخش‌پذیر، با پنج متغیر در پنج سطح استفاده شد. سختی ناحیه ذوب‌شده در تمام نمونه‌های جوشکاری‌شده اندازه گیری و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط منطق فازی با داده‌های آزمایشی مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش میزان نانوذرات ZrO_2 سختی از 78 به HRB 84 افزایش می‌یابد. در این تحقیق، ضریب همبستگی به دست آمده با استفاده از منطق فازی 99/8 بود. با توجه به نتایج حاصل‌شده، منطق فازی به دلیل دقت بالای آن می‌تواند برای پیش‌بینی ناحیه جوش مورد استفاده قرار گیرد. همچنین حضور نانو ذرات ZrO_2 در حوضچه جوش باعث افزایش عمق نفوذ تا 2 برابر شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری قوسی فلز-گاز، نانوذرات اکسید زیرکونیوم، سختی فلزجوش، منطق فازی، نفوذ جوش.

Analysis and predicting the effect of ZrO_2 nano-particles on penetration and HMZ in GMAW of low carbon steel using fuzzy logic

F. Pahnaneh [1], M. Aghakhani [*2], R. Eslami Farsani [3], M. Karamipour[1]

1, 4- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran, Islamic Azad University.

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University.

3- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Materials Science, K. N. Toosi University of Technoloy.

Abstract

This paper reports the applicability of fuzzy logig (FL) to predict the hardness of melt zone (HMZ) during the gas metal

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.aghakhani@razi.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

arc welding (GMAW) process, which is affected by the combined effect of ZrO_2 nano-particles and welding input parameters. The arc voltage, welding current, welding speed, stick-out, and ZrO_2 nano-particles were used as the input parameters and HMZ as the response to develop FL model. The predicted results from FL were compared with the experimental data. The most important input parameter affecting the HMZs was the addition of ZrO_2 nanoparticle coatings with a thickness of 1 mm, which increased the hardness from 78 to 84 HRB. The correlation factor value obtained was 99.98% between the measured and predicted values of HMZ. The results showed that FL is an accurate and reliable technique for predicting HMZ because of its low error rate. Also, the presence of ZrO_2 nano-particles in the weld pool has increased the penetration up to 2 times.

Keywords: Gas metal arc welding, Hardness of melted zone, ZrO_2 nano-particles, Fuzzy logic, Weld penetration.

1- مقدمه

جوشکاری قوسی فلز - گاز (GMAW)[1] یکی از مهمترین فرآیندهای جوشکاری در ساخت و تولید است. در این فرآیند، انتخاب مقادیر مناسب پارامترهای ورودی در جهت افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [1 و2]. یکی از مهمترین ویژگی‌های کیفیت جوش در این فرایند جوشکاری، سختی ناحیه ذوب شده است که تحت تاثیر پارامترهای ورودی جوشکاری می‌باشد [3]. از طرفی امروزه استفاده از فناوری نانو در حوزه‌های مختلف صنعتی باعث تولید محصولاتی با کیفیت مناسب شده است و این میسر همراه با تحقیقات علمی گسترده و یافته‌های علمی به دست آمده از مراکز تحقیقاتی مرتبط با نانو فناوری، در حال حاضر نیز در حال فعالیت بوده است. در این راستا صنعت جوشکاری نیز بی نصیب نمانده است و استفاده از علم نانو امید به تولید جوش‌هایی با کیفیت مطلوب و عاری از عیوب را میسر ساخته است [4 و5]. چن[2] و همکاران گزارش کردند که اندازه کوچک و سطح زیاد و اثرات حجمی نانوذرات ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی، الکتریکی، مغناطیسی و شیمیایی منحصر به فردی را ارائه می دهند، بنابرین نانو ذرات گزینه مناسبی برای کاربردهای مختلف و بالابردن سطح کیفیت محصولات در صنایع دفاعی، الکتریکی، هوافضا و شیمیایی است [6]. فتاحی و همکاران بهبود ضریب چقرمگی فلز جوش AWS E6010 با اضافه‌شدن نانو ذرات TiO_2 به پوشش الکترود ها را گزارش کردند [7]. پال و مایتی اثر اندازه نانوذرات TiO_2 را بر روی خواص مکانیکی الکترود نوع AWS E11018 M بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که خواص ضربه شارپی به علت تغییرات مقدار تیتانیوم و رسوب در جوش بهبود می‌یابد [8].

آقاخانی و همکاران اثر نانوذرات TiO_2 را بر پهنای جوش در فرآیند جوشکاری زیر پودری بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اضافه‌شدن نانوذرات TiO_2 در ابتدا پهنای جوش را افزایش و سپس آن را کاهش داد [9].

آقاخانی و همکاران گزارش کردند که نفوذ جوش به وسیله اضافه‌شدن نانوذرات TiO_2 به حوضچه جوش افزایش پیدا می‌کند [10]. هم‌چنین، آقاخانی و همکاران اثر نانو ذرات Cr_2O_3 را بر رقت ناحیه جوش مدل سازی نمودند [11].

ملاپور و همکارانش از شبکه عصبی مصنوعی برای مدلسازی نفوذ جوش در جوشکاری زیرپودری درحضور نانوذرات بوهمیت جذب سطحی‌شده با اسیدبوریک استفاده کردند [12]. با توجه به مطالعات ذکر شده در بالا، و نبود بررسی علمی و عملی کاربرد نانوذرات اکسیدها در فرآیندهای جوشکاری GMAW که در صنعت رده دوم را بعد از جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود پوشش‌دار است، این واکاوی در دستور کار قرار گرفت. چندین تحقیق برای درک رابطه بین پارامترهای ورودی GMAW و سختی ناحیه ذوب انجام شده است. یانگ گزارش کرده است که با کاهش حرارت ورودی سختی افزایش می یابد [13].

1 -Gas metal arc welding

2 -Chen

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

هال اثر سرعت جوشکاری را بر سختی گزارش کرده است [14]. کوله و داتا تاثیر پارامترهای مختلف ورودی جوشکاری را بر روی سختی ناحیه ذوب‌شده مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که سختی تحت تاثیر مقدار حرارت ورودی می‌باشد [15]. اخیراً مطالعاتی مبنی بر اثر نانوذرات بر ریزساختار و خواص مکانیکی در فرایندهای جوشکاری انجام گرفته است، که این خود اهمیت نانوذرات در جوشکاری را نشان می دهد [16 و17]. محمد موزامیل و همکاران به بررسی اثر نانوذرات بر نفوذ جوش در فولاد ساده کربنی با فرایند جوشکاری قوسی تنگستن -گاز پراخته‌اند و نتایج نشان داد که نانوذرات باعث افزایش نفوذ و کاهش اعوجاج شده است [18]. در این پژوهش به تأثیر ترکیبی از نانوذرات و پارامترهای ورودی جوشکاری بر سختی فلز جوش پرداخته شده است. برای گردآوری داده‌های آزمایشی طرحی آزمایش مرکب مرکزی چرخش‌پذیر با پنج فاکتور و پنج سطح (CCRD) در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. ولتاژ جوشکاری (V)، جریان جوشکاری (I)، سرعت جوشکاری (S)، طول موثر سیم جوش (N) و نانوذرات اکسید زیرکونیوم (F) به عنوان پارامترهای ورودی و سختی ناحیه ذوب‌شده (HMZ) به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد. بعد از انجام آزمایش‌ها و مقادیر سختی فلز جوش اندازه‌گیری، سپس مدل منطق فازی برای سختی ناحیه ذوب طراحی شد. هم‌چنین اثرات اصلی پارامترهای ورودی براساس مدل منطق فازی از طریق نمودارهای دوبعدی ارائه شده است.

2- منطق فازی

منطق فازی، منطقی است که روش‌های متنوع نتیجه‌گیری در مغز بشر را جای‌گزین الگوهای ساده‌تر ماشینی می‌کند. منطق فازی جواب یک سوال را به جای تقسیم به دو بخش درست یا نادرست، در اصل به یک محدوده جواب در این بین بیان می‌کند [10]. نمونه معمول آن، وجود رنگ خاکستری در طیف رنگی بین سیاه و سفید است. منطق فازی تکنیکی است که امکان نمایش، ارزیابی، ساده سازی مسائل پیچیده در یک فرایند را با توصیف وابستگی بین متغیر پاسخ و پارامترهای ورودی در یک فرم زبانی ساده ارائه می‌دهد. این منطق به دلیل این‌که وابسته به تجربیات قبلی و پیشینه تحقیق می‌باشد، یک مدل زبانی نامیده می‌شود [19]. این مدل توسط لطفی‌زاده معرفی شد. در منطق فازی یک سری اعداد به پارامترها اختصاص داده می‌شود تا بیانگر ابهامات باشد. این روش از مجموعه‌های منطق تقریب برای یافتن یک راه حل کافی و خوب برای یک مسئله بدون استفاده از دانش کامل به کار برده می‌شود. قوانین فازی بر پایه دانش تخصصی این سیستم فرمول‌بندی شده است. روش ممدانی به کار رفته در این تحقیق نوعی از مدل ارتباطی فازی است، به طوری که هر قانون به وسیله یک رابطه اگر و آنگاه بیان می‌شود [20 و21]. سیستم استنتاج ممدانی را، ممدانی و اسیلیان در سال 1691 پیشنهاد دادند [22 و23]. این سیستم‌ها به دلیل داشتن طبیعت بصری و تفسیری از قوانین می‌توانند به طور گسترده‌ای در سیستم های پشتیبانی تصمیم استفاده شوند. همچنین دارای قدرت بیانی بالایی هستند و می توانند به هردو صورت چند ورودی و چند خروجی [1] (MIMO) و چند ورودی و یک خروجی (MISO)[2] پیاده سازی شوند. نمودارهای کلی سیستم استنتاج فازی ممدانی در شکل (1) نشان داده شده است. سیستم استنتاج ممدانی از مجموعه‌های فازی به عنوان نتیجه قانون استفاده می‌کند و خروجی هر قانون به صورت غیرخطی و فازی است. هم‌چنین از لحاظ روش دفازی‌سازی با بقیه سیستم‌های استنتاج متفاوت است. هر مدل سیستم فازی از طریق سه مرحله ارائه می‌شود، فازی‌شدن، موتور استنباط فازی و از فازی خارج‌شدن (نافازی‌سازی) است.

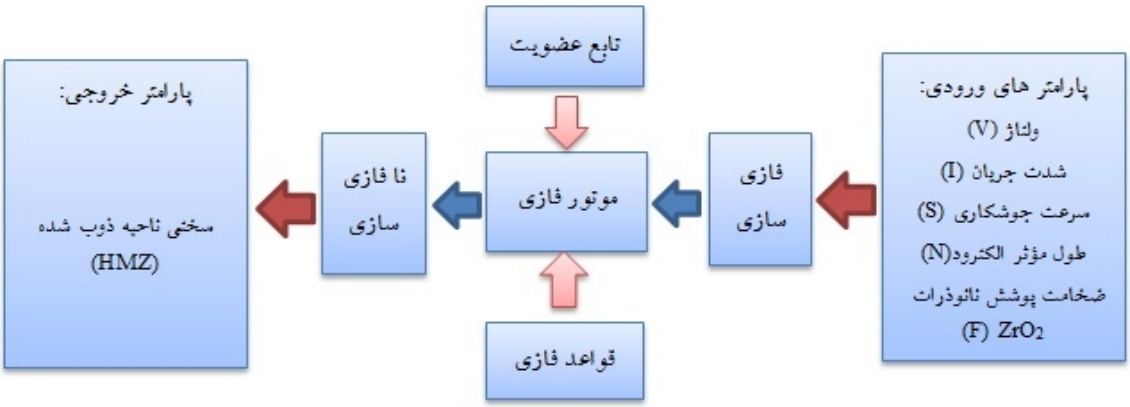
3- مواد و روش انجام آزمایش

طـراحی آزمـایش ها روشـی است که درآن می تـوان با صرف

1-Multiple input multiple output

2-Multiple input single output

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]



شکل1- نمایش مدل سختی ناحیه ذوب با منطق فازی

حداقل هزینه و زمان، به بیشترین اطلاعات در مورد فرایند دست یافت، نتیجه‌گیری‌های منطقی ارائه کرد و مدارک مستند در خصوص فرآیند بدست آورد. در این تحقیق V, I, S, N, F به عنوان پارامترهای ورودی و سختی ناحیه ذوب به عنوان پارامتر خروجی (پاسخ) در نظر گرفته شد. سطوح هر پارامتر با استفاده از روش یک فاکتور در یک زمان یا روش کلاسیک تعیین شد. مقادیر کدگذاری شده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$X_i = \frac{2[2X-(X_{max}+X_{min})]}{(X_{max}-X_{min})} \quad (1)$$

که در آن X_i مقدار کدگذاری‌شده مورد نیاز پارامتر X است. X_{min} و X_{max} پایین‌ترین و بالاترین سطوح پارامترهای ورودی هستند. پارامترهای ورودی و سطوح کدگذاری‌شده مطابق جدول (1) آمده است. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی چرخش پذیر، با پنج فاکتور و پنج سطح برای ایجاد داده‌های آزمایشی به کار گرفته شد (جدول (2)).

در این پژوهش از ورق فولاد کم کربن (St37) به ابعاد 8 mm × 50 mm × 100 mm به عنوان فلز پایه و فلز پرکننده (سیم جوش) از نوع فولاد ساده کربنی با کد AWS ER 70S-6 به قطر1/2 میلیمتر ساخت شرکت آما استفاده شد.

ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده به ترتیب درجداول (3) و (4) نشان داده شده است. پودر نانوذرات اکسید زیرکونیوم محصول شرکت مرک آلمان بود که با میانگین اندازه 60 nm و با استفاده از آزمون پراش پرتوایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول1- پارامترهای جوشکاری و محدوده‌های آن‌ها

	نماد	کد گذاری					واحد
متغیر ورودی		-2	-1	0	+1	+2	
سرعت تغذیه سیم جوش یا (جریان جوشکاری)	W یا I	6	7	8	9	10	متر/دقیقه
		200	220	240	260	280	آمپر
ولتاژ جوشکاری	V	22	24	26	28	30	ولت
طول مؤثر الکترود	N	10	12	14	16	18	میلیمتر
سرعت جوشکاری	S	220	260	300	340	380	میلیمتر/دقیقه
ضخامت پوشش نانو مواد	F	0	0/25	0/5	0/75	1	میلیمتر

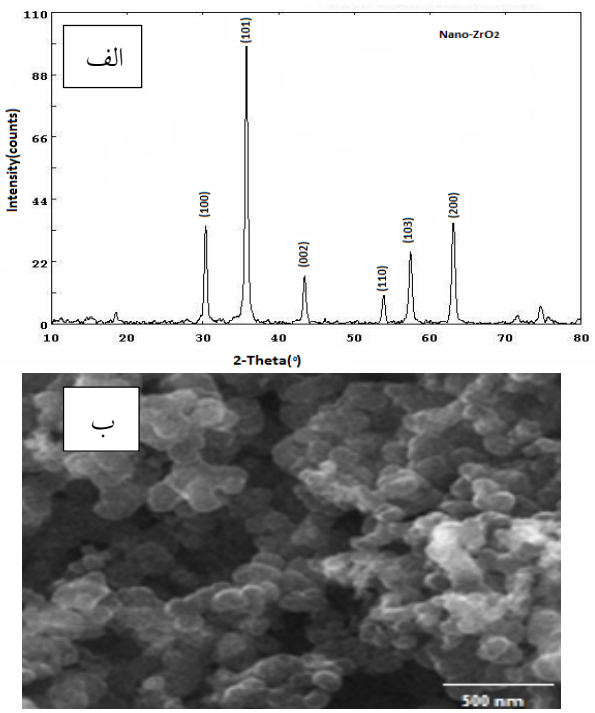
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

جدول2- ماتریس طراحی

تعداد	F	S	N	V	W	تعداد	F	S	N	V	W
1	1	-1	1	-1	1	17	0	0	0	0	0
2	-1	-1	1	1	1	18	0	0	0	0	-2
3	1	1	1	1	1	19	0	0	0	0	2
4	0	2	0	0	0	20	-1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	-1	1	-1	21	0	0	0	-2	0
6	-1	1	-1	1	1	22	-2	0	0	0	0
7	1	-1	-1	-1	-1	23	0	-2	0	0	0
8	-1	1	1	-1	1	24	1	-1	1	1	-1
9	0	0	0	0	0	25	1	1	-1	1	-1
10	1	1	1	-1	-1	26	-1	-1	1	-1	-1
11	1	1	-1	-1	1	27	0	0	2	0	0
12	0	0	0	0	0	28	-1	-1	-1	-1	1
13	-1	1	1	1	-1	29	-1	-1	-1	-1	1
14	0	0	0	0	0	30	0	0	-2	0	0
15	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0
16	0	0	0	2	0	32	2	0	0	0	0

در این پژوهش از ورق فولاد کم کربن (St37) به ابعاد 8 mm × 50 mm × 100 mm به عنوان فلز پایه و فلز پرکننده (سیم جوش) از نوع فولاد ساده کربنی با کد AWS ER 70S-6 به قطر1/2 میلیمتر ساخت شرکت آما استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده به ترتیب در جداول (3) و (4) نشان داده شده است. پودر نانوذرات اکسید زیرکونیوم محصول شرکت مرک آلمان بود که با میانگین اندازه 60 nm و با استفاده از آزمون پراش پرتوایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام جوشکاری، سطح قطعه‌های آماده‌شده قبل از جوشکاری با نانوذرات اکسید زیرکونیوم به ضخامت‌های مشخص بر اساس طراحی که در جدول (1) داده‌شده است، پوشانده شدند (شکل (3)).

در ادامه فرآیند جوشکاری با استفاده از دستگاه اتوماتیک قوس الکتریکی تحت گاز محافظ CO_2 ساخت شرکت صنایع جوش و برش گام الکتریک با جـــریان مستقیم و قطبیت معکوس طبق



شکل2- الف) الگوی پراش پرتوایکس نانو ذرات ZrO_2 و ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانو ذرات ZrO_2

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

جدول3- آنالیز شیمیایی فلز پایه بر حسب درصد وزنی

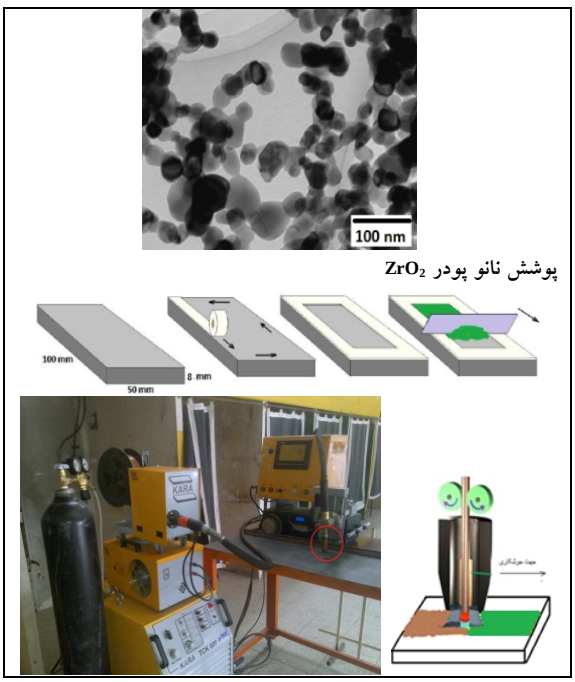
نوع فلز		ترکیب شیمیایی							
DIN/ EN	فولاد کم کربن	Mn	Ti	Si	S	P	Cr	Fe	C
1629	St37	0/418	0/02	0/24	0/02	0/03	0/062	99/125	0/13

جدول4- آنالیز شیمیایی سیم جوش مصرفی بر حسب درصد وزنی

نوع سیم جوش		درصد وزنی							
DIN 85 59	نام تجاری آما	Mn	CU	AL	S	P	Si	Fe	C
SG3	۴۰-۱۹	1-1/5	0/5>	-0/9 0/5	0/035	0/025<	-0/85 0/65	98/165	-0/19 0/07

استاندارد AWS (WHB-1) روی این لایه به روش جوشکاری مهره روی ورق (Bead-on- plate) انجام شد (شکل (2)) [1 و24]. پس از اتمام جوشکاری، قطعات به وسیله کاتر در راستای عمود بر خط جوش به فاصله 40 میلیمتر از لبه جهت مطالعه و بررسی ریزساختار و آزمون سختی‌سنجی بریده شدند. سطح مقطع برش خورده ابتدا سنباده‌زنی (مش 100 تا 3000) و سپس توسط خمیر الماسه 1 میکرون پولیش داده شدند. سپس سطح مقطع قطعات توسط محلول نایتال 2% اچ شد. پس از اچ‌کردن بلافاصله با آب و الکل شستشو داده شد و به وسیله سشوار خشک شد تا از خوردگی اضافه نمونه جلوگیری شود [1 و23]. هم‌چنین برای مشخصه‌یابی بهتر ریزساختار و پیداکردن اثر نانوذرات در جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل AIS 2300C استفاده شد. برای تعیین تقریبی ترکیب شیمیایی و شناسایی فازها در مناطق مختلف اتصال از آنالیز نقطه‌ای استفاده شد.

هم‌چنین برای سختی‌سنجی از آزمون سختی راکول با استفاده از دستگاه یونیورسال مدل SCTMC طبق استاندارد ASTM E18 استفاده شد [25]. متداولترین آزمون سختی آزمایش راکول است. دلیل این امر سرعت، عدم امکان بروز خطا از طرف شخص، قابلیت تشخیص تغییرات کوچک سختی در فولادها و کوچک بودن اندازه فرورفتگی است. در ابتدا دستگاه توسط



شکل 3- آماده‌سازی و انجام فرآیند جوشکاری نمونه‌ها

تست بلوک‌های استاندارد کالیبره شد. با توجه به جنس فلز پایه، طبق استاندارد از سختی‌سنجی راکول B با فرورونده کروی به قطر 1/5 mm و مدت زمان اعمال نیرو 10 ثانیه ، نمونه‌ها مورد تست قرار گرفتند. سختی‌سنجی به گونه‌ای صورت گرفت که در هر ناحیه (فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت، فلز پایه) سه آزمون گرفته شد و مقدار میانگین آن‌ها به عنوان عدد سختی به دست آمد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

4- ارائه مدل فازی

رایج‌ترین تابع عضویت به کار رفته، یک تابع مثلثی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y = \text{trimf}(x, \text{parameters}) \quad (2)$$

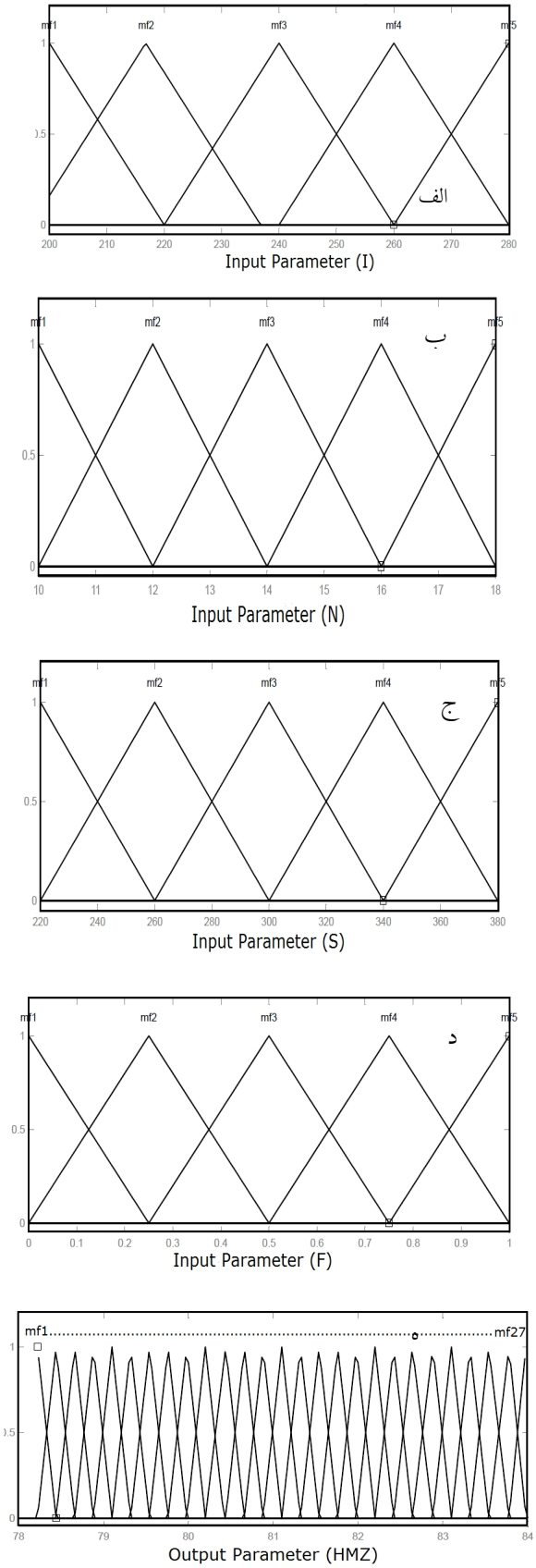
$$y = \text{trimf}(x, [a\ b\ c]) \quad (3)$$

برای هر پارامتر ورودی یک تابع عضویت مثلثی(MF_S) ترسیم شد. منحنی مثلثی تابعی از یک بردار x تشکیل شده است و به سه پارامتر اسکالر a، b و c بستگی دارد که به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$f(x, a_i, b_i, c_i) = \max(\min((x-a_i)/(b_i-a_i), (c_i-x)/(c_i-b_i)), 0). \quad (4)$$

پارامترهای a وb در کف مثلث و پارامتر c در راس مثلث قرار دارد که در شکل (4) نشان داده شده است. مراحل زیر، برای مدل منطق فازی به کار گرفته شده است:

- انتخاب یک سیستم استنباط فازی (FIS): اولین مرحله انتخاب یک FIS برای تعیین مشخصات پارامترهای ورودی به تابع عضویت ورودی، تابع عضویت ورودی با یک مجموعه از قوانین اگر و آن‌گاه فازی، و قوانین فازی برای یک مجموعه پارامترهای خروجی به کار می‌رود.
- فازی‌شدن پارامترهای ورودی: دومین مرحله تعیین مقادیر ورودی و فازی‌شدن آن‌ها از طریق عامل(اپراتور) فازی‌کننده است.
- کاربرد عملگرهای فازی: در مواردی که ورودی بیش از یک پارامتر باشد، استفاده از عملگرهای فازی اجتناب‌ناپذیر است، به این دلیل که بخش‌های اولیه هر قانون فازی مرتبط با یک‌دیگر هستند. از طریق عملگرهای فازی مقادیر خروجی بین صفر و یک است.
- کاربرد روش استنباطی: بعد از فازی‌سازی پارامترهای ورودی و استفاده از عملگرهای فازی باید نتیجه‌گیری انجام شود.
- جمع‌آوری (ادغام) تمام خروجی‌ها: پس از به کاربردن روش استنباطی، فرآیند ادغام صورت می‌گیرد. ادغام فرآیند ترکیب مجموعه های فازی است که بیانگر خروجی‌ها است.



شکل4- طرح مثلثی تابع عضویت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

- دفازی‌سازی: مرحله نهایی از فازی خارج‌شدن یا فرآیند تبدیل یک مجموعه فازی به یک مقدار واحد است[9، 21 و26]. ساختار مدل فازی استفاده‌شده در این تحقیق در جدول (4) نشان داده شده است.

جدول4- ساختار مدل فازی

نوع سیستم استنتاج فازی (FIS)	ممدانی
ورودی /خروجی	1 – 5
نوع توابع عضویت ورودی	مثلثی
نوع توابع عضویت خروجی	مثلثی
تعداد تابع عضویت ورودی	5-5-5-5-5
تعداد تابع عضویت خروجی	27
ارزش توابع	1
تعداد قوانین فازی	27
روش	حداقل (Min)
روش استنباط	حداقل (Min)
روش تراکم	حداکثر(Max)
روش نافازی سازی	مرکزی

پنج مثلث متقارن برای ایجاد توابع عضویت ورودی ایجاد شدند. در این تحقیق راس هر مثلث به نام خیلی کم (mf1)، کم (mf2)، متوسط (mf3)، زیاد (mf4) و خیلی زیاد (mf5) بیانگر سطوح مختلف پارامترهای ورودی در ماتریس طراحی می‌باشد. 27 تابع عضویت مثلثی متقارن در دامنه صفر تا 26 استفاده شده است. در جایی‌که 0 ،1 ، 2، ... و 26 بیانگر موقعیت راس مثلث است تا توابع عضویت خروجی ایجاد شود. هم‌چنین دامنه صفر تا 26 به صورت عدد سختی به ترتیب از 78 تا 84 مشخص شد. بدین ترتیب، از جایگزینی‌ها 27 تابع عضویت مثلث متقارن برای سختی ناحیه جوش به دست آمد. در جدول (5)، به طور خلاصه 5 قانون از 27 قانون ایجادشده در مدل فازی ارائه شده است.

5- نتایج و بحث

عموماً تنظیم پارامترهای جوشکاری به صورت سعی و خطا، با استفاده از مقادیر پیشنهادی تولیدکنندگان دستگاه و یا کتب فنی(مراجع جوشکاری) صورت می‌گیرد که روش دقیقی نمی‌باشد.

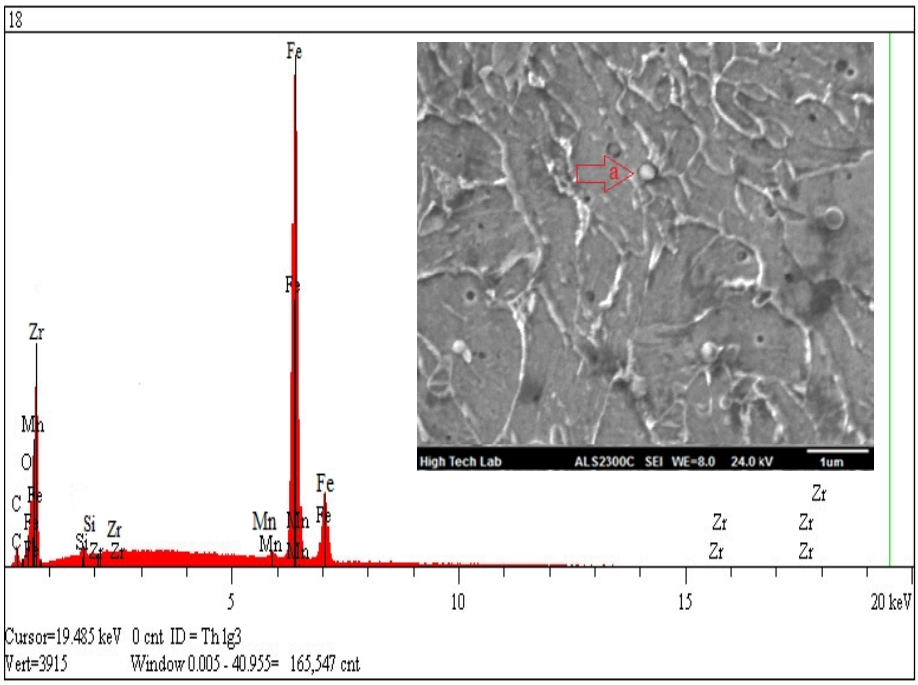
جدول5- تعدادی از قوانین وارد شده در مدل فازی

شماره	قوانین
1	اگر(mf 3 ، V)، (mf 3 ، I)، (mf 3 ، S)، (mf 3 ، N) و (F ، mf 3) باشد، آنگاه HMZ، mf 9 می باشد.
2	اگر(mf 2 ، V)، (mf 2 ، I)، (mf 4 ، S)، (mf 4 ، N)، (F ، mf 5)، باشد، آنگاه HMZ، mf 6 می باشد.
3	اگر(mf 3 ، V)، (mf 3 ، I)، (mf 3 ، S)، (mf 1 ، N)، (F ، mf 3)، باشد، آنگاه HMZ، mf 5 می باشد.
4	اگر(mf 4 ، V)، (mf 2 ، I)، (mf 4 ، S)، (mf 3 ، N)، (F ، mf 2)، باشد، آنگاه HMZ، mf 21 می باشد.
5 ...	اگر(mf 2 ، V)، (mf 4 ، I)، (mf 2 ، S)، (mf 2 ، N)، (F ، mf 2)، باشد، آنگاه HMZ، mf 1 می باشد.

در این تحقیق جهت پیش‌بینی دقیق سختی جوش از منطق فازی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که مدل ارائه شده می‌تواند با دقت مطلوبی سختی منطقه جوش را پیش‌بینی نماید. بر این اساس می‌توان در شرایط مشابه و کنترل‌شده از این مدل با اعمال تغییرات مورد نیاز برای تنظیم عملی پارامترهای جوشکاری‌های موارد مختلف در خط تولید استفاده کرد.

البته که برای پیش‌بینی دقیق سختی ناحیه ذوب‌شده، برای تنظیم پارامترهای ورودی فرایند محتلف جوشکاری استفاده از روش‌های جدید مبنی بر هوش مصنوعی بسیار مفید و کارآمد است. تاکنون تلاش‌هایی در این زمینه صورت گرفته است و در این راستا از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی به عنوان روش‌های کاربردی در جهت مدل‌سازی فرآیند مختلف جوشکاری و تخمین هندسه گرده جوش استفاده شده است. در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از داده‌های که از طریق آزمایش‌های عملی بدست آمده‌اند، مدل مناسبی جهت پیش‌بینی سختی جوش در فرایند GMAW به کمک منطق فازی ارائه شود. به منظور مطالعه تغییرات ریزساختار در نمونه‌ها و با استفاده از آنالیز نقطه‌ای میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. همانطور که در شکل (5) تصویر منطقه جوش نمایش داده شده است، ساختار سوزنی شکل دارد که این، به علت وجود ذرات نانو به عنوان مراکز جوانه‌زا و هم‌چنین به عنوان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]



شکل 5- تصویر آنالیز EDS از نقطه a

آخال‌های ریز جهت جلوگیری از رشد نابجایی و ترک در ریزساختار است. آنالیزانجام‌شده نیز حضور نانوذرات ZrO_2 را تایید می‌کند.

فاکتورهای متعددی بر ریزساختار و سختی جوش تاثیر گذارند. ترکیب شیمیایی فلز جوش، زمان سردشدن، مقدار اکسیژن فلز جوش، و اندازه دانه آستنیت از جمله عوامل اثرگذار بر ریزساختار و سختی جوش هست. در فولاد مورد استفاده به خاطر پایین‌بودن مقدار عناصر آلیاژی و مقدار کربن، این فولادها ابتدا به صورت فریت دلتا منجمد می‌شوند. سپس در حین سرد شدن، فریت دلتا به آستنیت تبدیل می‌شود. دانه‌های آستنیت نیز مانند فریت دلتا ستونی است، اما دقیقاً بر روی دانه‌های فریت دلتا منطبق نیست [27]. با کاهش دما، آستنیت به انواع شکل‌های فریت تبدیل می‌شود. این فریت‌ها را می‌توان به سه ساختار کلی تقسیم کرد. اولین ساختار فریتی که در حین سردشدن به وجود می‌آید، فریت بی‌شکل[1] یا فریت اولیه[2]، یا فریت مرز دانه‌ای[3] است. این فریت معمولاً در مرز دانه‌های آستنیت جوانه‌زنی و رشد می‌کند. رشد این فاز مستلزم نفوذ با برد زیاد کربن در آستنیت است. در دماهای پایین‌تر فریت ویدمن اشتاتن[4] با سازوکار جابجایی گروهی اتم‌ها از روی فریت مرزدانه‌ای یا مرز دانه‌های آستنیت جوانه زنی و رشد می‌کند. این نوع فریت شامل ورقه‌های موازی فریت است که با مرزهای زاویه کوچک از هم جدا می‌شود. در حین رشد آن کربن از اطراف ورقه به درون آستنیت پس‌زده و منجر به تولید فازهای ثانویه کشیده شده بین ورق‌ها می‌شود. پس از اشغال‌شدن تمامی مرزدانه‌های آستنیت، جوانه‌زنی فریت سوزنی درون دانه‌های آستنیت و از روی آخال‌های غیرفلزی شروع می‌شود. این نوع فریت با جهت‌گیری تصادفی از روی آخال‌ها جوانه‌زنی می‌کند. اندازه مؤثر آن بسیار کوچک است و با مرزهای زاویه بزرگ از هم جدا می شوند، هم‌چنین ساختار آشفته و درهم‌بافته آن‌ها از جمله سازوکارهای افزایش استحکام و چقرمگی توسط این ساختار است. از جمله پارامترهایی که برای جوانه‌زنی فریت سوزنی از روی آخال‌ها مهم است، فازهای موجود در آخال‌ها و اندازه آن‌ها است. برای دستیابی به ریزساختار غالب فریت

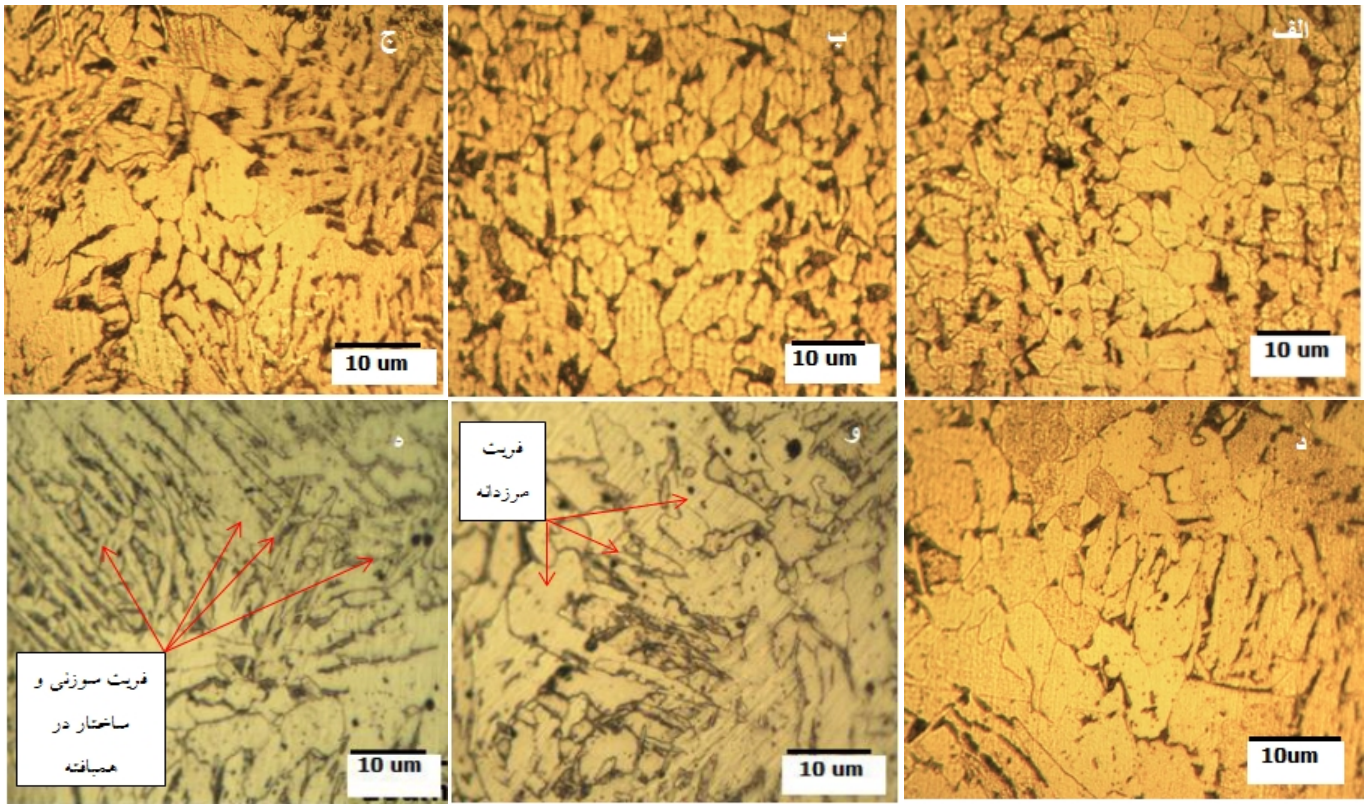
1 -Allotriomorphic

2 -Primary

3 -Grain boundary

4 -Widmanstätten

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]



شکل6- تصویر متالوگرافی از فلز پایه. (الف)نمونه 32، (ب) نمونه 22، تصویر متالوگرافی از ناحیه HAZ :(ج) نمونه 32، (د)نمونه 22، تصویر متالوگرافی از فلز جوش: (و) نمونه22، (ه) نمونه 32

سوزنی از نانوذرات ZrO_2 به عنوان آخال، استفاده شده است و همان‌طورکه در تصاویر ریزساختاری مشاهده می‌شود، ریزساختار غالب فریت سوزنی است [28 و29].

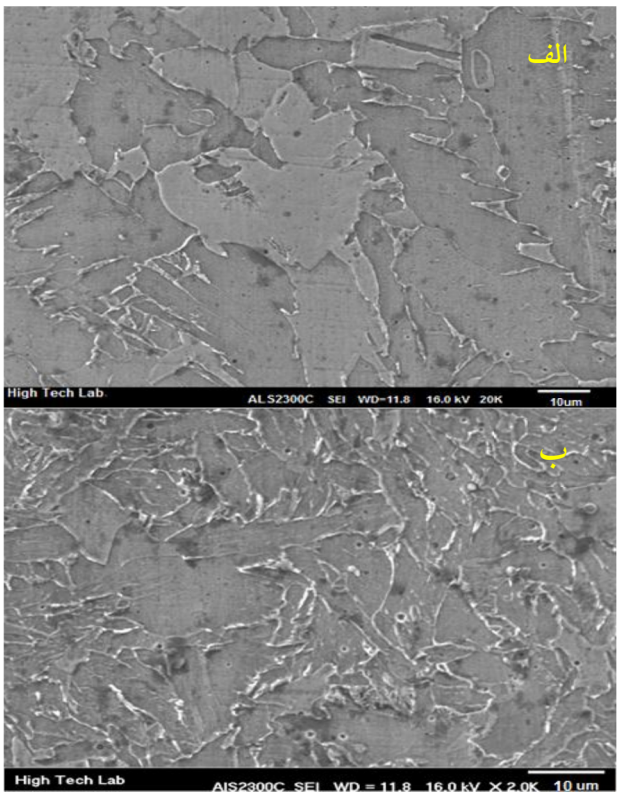
یکی از عوامل تأثیرگذار بر سختی منطقه جوش، مقدار گرمای ورودی و نرخ سرمایش است. سختی منطقه جوش به طور مستقیم با ریزساختار و اندازه دانه‌ها ارتباط دارد (شکل (6)). از این‌رو با افزایش و کاهش گرمای ورودی و اثری که این تغییر بر ریزساختار و اندازه دانه‌ها دارد، سختی تغییر می‌کند [17]. از سوی دیگر نرخ سرمایش نیز بر رشد دانه‌ها تأثیرگذار است و به نوبه خود سختی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش ولتاژ جوشکاری سبب افزایش گرمای ورودی و کاهش نرخ سرمایش می شود که این امر موجب کاهش سختی می‌گردد. با توجه به تأثیر مشابه ولتاژ و جریان جوشکاری بر گرمای ورودی و نرخ سرمایش، افزایش جریان جوشکاری مشابه با اثر افزایش ولتاژ منجر به کاهش سختی می‌شود. همچنین اثر سرعت جوشکاری بر سختی منطقه جوش مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این امر که افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش گرمای ورودی و افزایش نرخ سرمایش می‌شود و سختی را افزایش داده است. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر سختی منطقه جوش، وجود نانوذرات اکسید فلزی است، که مورد بررسی قرار گرفت. حضور نانوذرات اکسید زیرکونیوم روی سطح قطعه کار قبل از جوشکاری نیز می‌تواند باعث تغییردر سختی منطقه جوش شود. از یک سو دمای ذوب اکسید فلزات به طور معمول بالاتر از دمای ذوب آن‌ها در حالت خالص است؛ بنابرین مقداری از گرمای ورودی به جای ذوب‌کردن فلز پایه و سیم‌جوش، صرف ذوب‌کردن اکسیدهای فلزی می‌شود و از سوی دیگر، حضور این ترکیبات در سطح فلز ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی فلز را تغییر می‌دهد و موجب تغییر نرخ سرمایش می‌شود. علاوه بر این موارد باتوجه به ابعاد نانومتری این ذرات، واردشدن آن‌ها به منطقه مذاب موجب ایجاد ذرات اکسیدی و به تبع آن تغییر خواص مکانیکی از جمله سختی شده است. همچنین حضور این مواد در منطقه جوش تعداد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

نقاط شروع جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد و سبب ریزدانه‌شدن منطقه جوش شده است. با افزایش ضخامت پوشش نانواکسید زیرکونیوم از 0/25 تا 1 میلیمتر سختی افزایش یافته است. با توجه به نتایج سختی سنجی مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت نانوذرات تا حدود 1 میلی‌متر، سختی مناطق جوش نمونه‌های مختلف افزایش پیدا کرده است. می‌توان دلیل این امر را میزان ایجاد آخال‌های ریز بیشتر و مناطق مناسب برای جوانه‌زنی و رشد فریت سوزنی و کاهش اندازه دانه ربط داد (شکل (7))؛ زیرا ساختار با آخال‌های ریز و زیاد و با توجه به کاهش حرارت ورودی که منجر به ریزدانه‌شدن ساختار شده است، سختی در مقیاس راکول افزایش یافته است.

برای بررسی اثر نانوذرات به حوضچه جوش کافی است در ناحیه جوش آنالیزترکیب شیمیایی گرفته شود. پراکندگی نانوذرات در شکل (8) نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز ترکیب شیمیایی نیز نمونه ثابت می‌کند که نانوذرات وارد حوضچه جوش شده است.

در اثر عملیات جوشکاری با ثابت درنظرگرفتن پارامترهای جوشکاری، با افزایش میزان نانوذرات عمق نفوذ افزایش و پهنای جوش کاهش یافته است. یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی هندسه جوش، جریان سیال در حوضچه جوش است که از نیروی ایجادشده در اثر اختلاف در کشش سطحی مذاب تاثیر می‌پذیرد. برای فلزات در حالت کلی با افزایش دما کشش سطحی کاهش پیدا می‌کند. در حوضچه مذاب این فلز، کشش سطحی منفی است ($\partial\sigma/\partial T < 0$). در نقاط سردترکه مربوط به گوشه های حوضچه است، کشش سطحی بیشتر از مرکز حوضچه است. در نتیجه فلز مذاب گرم‌تر با کشش سطحی کمتر در مرکز، به وسیله فلز مذاب سردتر با کشش سطحی بیشتر در گوشه‌ها، به طرف بیرون کشیده می‌شود. این مساله سبب کاهش عمق نفوذ می شود [18 و27]. انتقال حرارت با محرک کشش سطحی، کنوکسیون حرارتی[1] نامیده می‌شود [28]. یکی از اهداف این کار تحقیقاتی، افزودن نانوذرات به عنوان اکسید فعال به حوضچه جوش است که باعث افزایش کشش سطحی شده است و کنوکسیون مارانگونی را از منفی به مثبت تغییر داده است و با تمرکز قوس، حوضچه جوش را عمیق‌تر نموده است (شکل9) [18، 27 و28].



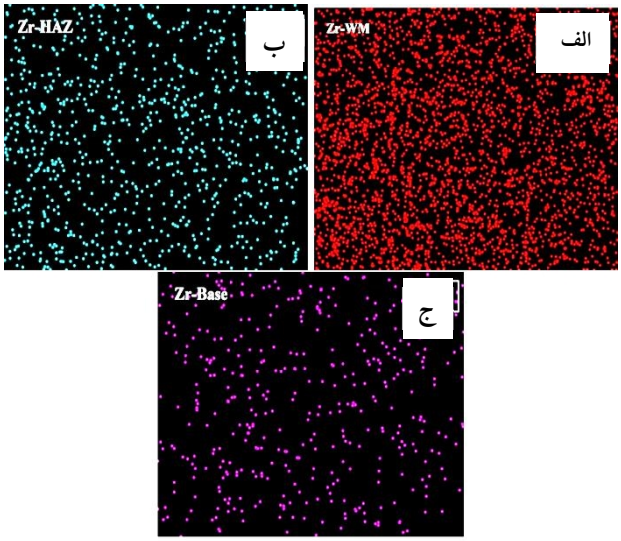
شکل7- الف) نمونه شماره 22 بدون نانو نانو ذرات و ب) نمونه شماره 32 با حداکثر مقدار نانوذرات اکسید زیرکونیوم

اثرات اصلی پنج پارامتر ورودی بر روی سختی ناحیه ذوب شده توسط پیش‌بینی منطق فازی به صورت گرافیکی در شکل (10) نمایش داده شده است. سختی ناحیه ذوب‌شده به طور جزیی با افزایش ولتاژ قوس کاهش یافته است (شکل(10-الف)). با افزایش ولتاژ انرژی حرارتی بیشتر می‌شود، در نتیجه با افزایش حرارت ورودی و کاهش سرعت سرد شدن، منجر به بزرگ‌شدن اندازه دانه و کاهش سختی می‌شود [29]. با افزایش شدت جریان جوشکاری سختی ناحیه ذوب کاهش یافته است که همانند افزایش ولتاژ عمل می‌کند. با این تفاوت که با افزایش مقدار کمی شدت جریان، سختی مقدار زیادی کاهش می یابد (شکل(10-ب))[32]. افزایش طول موثر الکترود موجب

1 -Marangoni

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

افزایش مقاومت گرمایی الکترود، بالا رفتن دمای الکترود، و افزایش نرخ ذوب سیم‌جوش شده است.

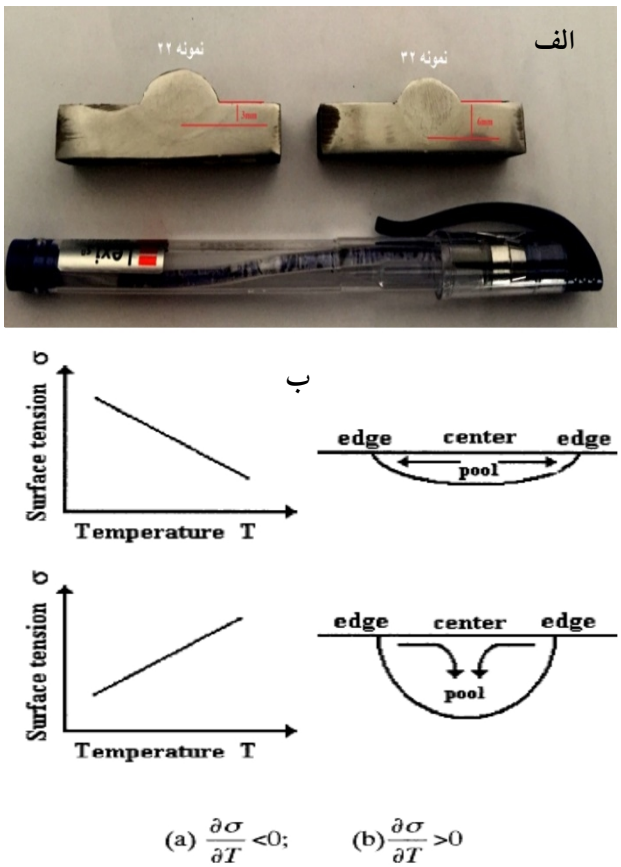


شکل8- آنالیزنقشه ترکیب شیمیایی از مناطق مختلف جوش: الف) وجود حداکثری نانوذرات اکسید زیرکونیوم در فلز جوش، ب) وجود مقادیر کم نانوذرات اکسید زیرکونیوم در ناحیه متاثر از حرارت و ج) عدم‌حضور نانوذرات در فلز پایه.

از طرفی افزایش مقاومت الکتریکی، موجب افت ولتاژ بیشتر، از مجرای اتصال تا قطعه کار می‌شود، که این عامل باعث کاهش جریان توسط منبع تغذیه شده است. در نتیجه باعث افزایش سرعت ذوب الکترود وکاهش حرارت ورودی به قطعه کار می‌شود و درنتیجه منجر به افزایش سختی شده است. (شکل (10-ج))[23 و30]. اثر تغییرات سرعت جوشکاری را از جنبه متالورژیکی به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. از جنبه متالورژیکی، اثر تغییر سرعت جوشکاری، تغییر رفتار انجماد و به تبع آن تغییر ریزساختار انجمادی جوش است. با کاهش سرعت جوشکاری، گرمای ورودی به حوضچه جوش بیشتر، شیب دمایی کمتر(G) و بنابرین نسبت G/R کمتر خواهد شد و منجر به درشت دانه‌شدن ساختار و کاهش سختی نمونه‌ها شده است. هم‌چنین، با افزایش سرعت جوشکاری، ساختارجوش ریزتر شده است. زیرا با افزایش سرعت جوشکاری و با اعمال همان گرمای ورودی، سرعت سرمایش و لذا سرعت انجماد افزایش می‌یابد و بدین ترتیب محصول ساختار انجمادی حاصل از این شرایط به سمت یک ساختار ریز دانه سوق پیدا کرده است. گفته شده است که شیب دمایی در فاز مایع رابطه معکوس با حرارت ورودی دارد.

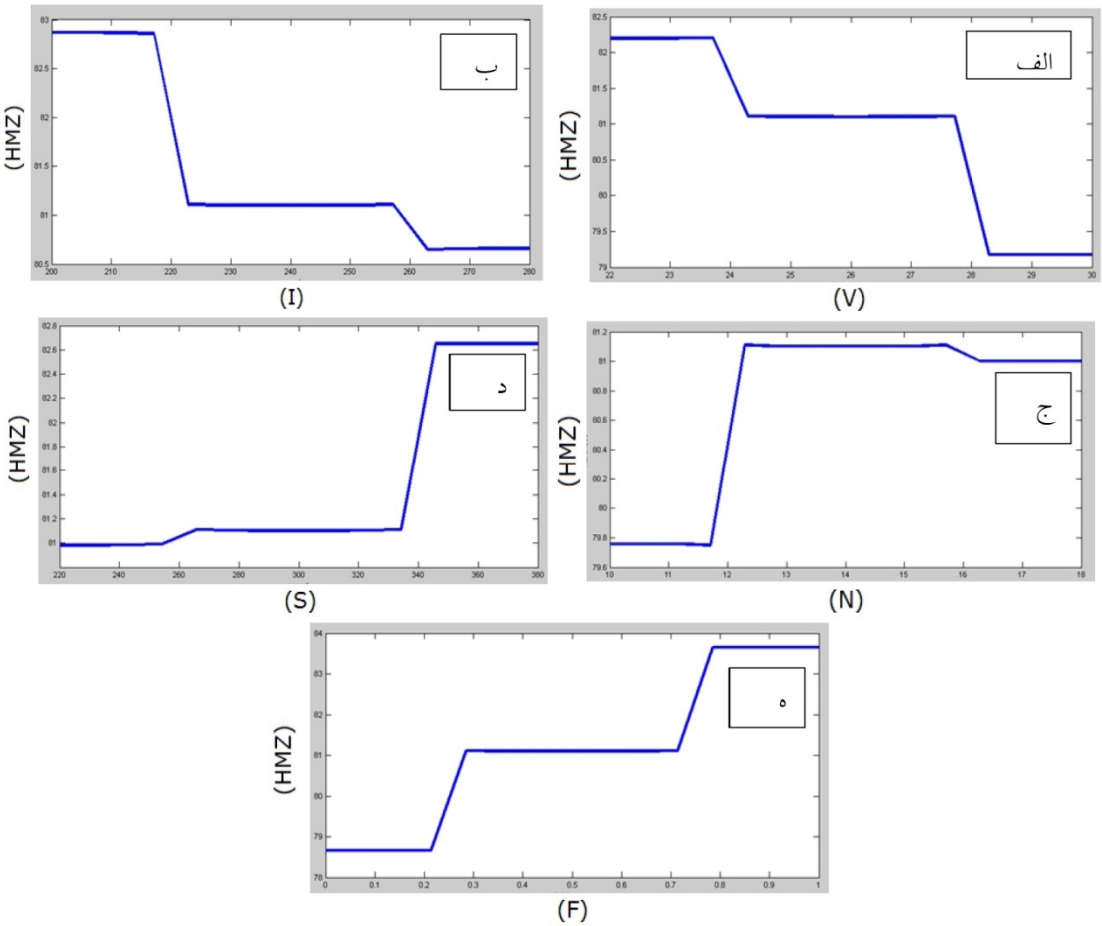
$$H=\frac{\eta EI}{S} \qquad (5)$$

در این رابطه H حرارت وردی، η راندمان فرآیند جوشکاری، E ولتاژ قوس، I شدت جریان قوس، و S نیز معرف سرعت جوشکاری هستند. براساس این رابطه با کاهش ولتاژ و یا کاهش جریان قوس و با افزایش سرعت جوشکاری، پارامتر G افزایش داده شد. سرعت انجماد متناسب با سرعت جوشکاری در نظر گرفته می‌شود. بنابرین بدیهی است که با افزایش ولتاژ، سرعت انجماد نیز افزایش یافته که به تبع آن میزان تحت تبرید افزایش یافته است. نتیجه این رویداد، تغییر ساختار دانه فلز جوش به ساختار ریزتر است (شکل (10-د)).



شکل9- الف) تصویر نمونه‌های 22 و 33 و ب) تغییر جهت همرفت مارانگونی در ارتباط با کشش سطحی در حوضچه جوش [18 و28].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]



شکل10- مقدار پیش‌بینی‌شده سختی ناحیه ذوب توسط منطق فازی: الف) اثر ولتاژ جوشکاری بر سختی، ب) اثر جریان جوشکاری بر سختی، ج) اثر طول موثر سیم جوش بر سختی، د) اثر سرعت جوشکاری بر سختی و ه) اثر نانوذراتZrO_2 بر سختی

تحلیل تأثیر نانوذرات ZrO_2 بر سختی بسیار پیچیده است. نانوذرات با ضخامت mm 0/25 هیچگونه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سختی ناحیه ذوب نشان نمی‌دهد. مطابق با شکل (10-ه)، حضور نانو اکسید فلزی روی سطح قطعه کار قبل از جوشکاری نیز می توان سبب تغییر سختی منطقه جوش شود. از یک سو دمای ذوب اکسید فلزات به طور معمول بالاتر از دمای ذوب آن‌ها نسبت به حالت خالص است، بنابرین مقداری از گرمای ورودی به جای ذوب‌کردن فلز پایه و سیم جوش، صرف ذوب‌کردن اکسیدهای فلزی می‌شود و از سوی دیگر؛ حضور این ترکیبات در سطح فلز ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی فلز را تغییر می‌دهد و موجب تغییر نرخ سرمایش می‌شود [7، 10 و12]. علاوه بر این موارد باتوجه به ابعاد نانومتری این ذرات، واردشـــدن آن‌ها به منطقه مـذاب مـوجب ایجـاد ذرات کاربیدی و به تبع آن تغییـر خـواص مکـانیکی از جمـله سختی شده است. همچنین حضور این مواد در منطقه جوش تعداد نقاط شروع جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد و سبب ریزدانه‌شدن دانه‌ها در منطقه جوش شده است [32]. با افزایش ضخامت پوشش نانواکسید زیرکونیوم از 0/25 تا 1 میلیمتر سختی افزایش یافته است (شکل (10-ه)).

نتایج مدل فازی و خطای نسبی آن در جدول (6) و شکل‌های (11) و (12) ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در جدول (6)، MRE از مدل فازی برابر با 0/252 درصد است. بنابراین پیش‌بینی انجام‌شده به وسیله منطق فازی هماهنگی خوبی با داده‌های آزمایشی دارد (شکل (11))، هم‌چنین، متوسط خطای مدل 0/172 درصد گزارش شده است.

$$MRE = (1/N)\sum(HMZ_{\text{آزمایشی}} - HMZ_{\text{پیش بینی شده}})/HMZ_{\text{آزمایشی}} \quad (6)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

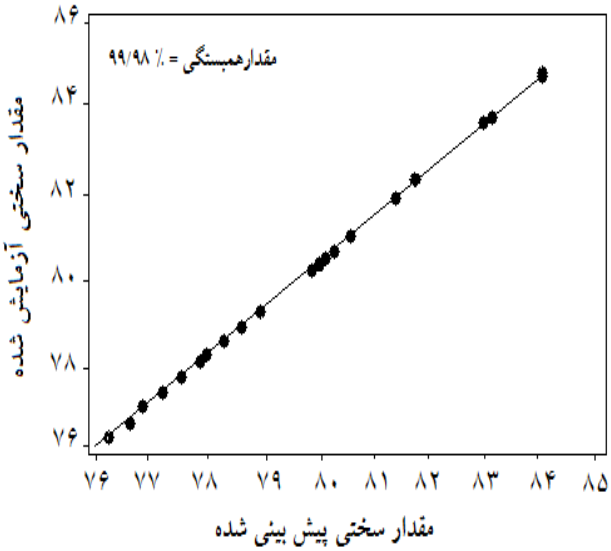
مقدار سختی آزمایش‌شده ($HMZ_{آزمایشی}$)، مقدار سختی پیش‌بینی‌شده ($HMZ_{پیش بینی شده}$) و N تعداد اجراهای جوشکاری (تعداد نمونه ها) هستند. در این‌جا به ترتیب مقادیر آزمایشی و پیش‌بینی‌شده سختی ناحیه ذوب نشان داده شده است (شکل (12)).

جدول 6- مقایسه سختی به دست آمده بین روش تجربی و روش منطق فازی

شماره	مقدار سختی بدست آمده از آزمایش های تجربی	مقدار سختی بدست آمده از منطق فازی	خطا
1	79/20	79/682	0/482
2	81/08	80/985	0/105
3	81/27	81/021	0/252
4	82/01	81/074	0/064
5	81/08	81/251	0/171
6	81/28	81/361	0/081
7	82/23	82/361	0/131
8	79/98	80/015	0/025
9-12-14-15-17-21	80/78	81/021	0/121
10	80/24	80/688	0/441
11	81/28	81/487	0/020
13	81/68	82/024	0/301
16	78/68	78/851	0/177
18	83/08	83/066	0/026
19	78/58	78/611	0/034
20	80/02	80/487	0/464
22	81/32	81/331	0/011
23	82/14	82/141	0/00
24	80/04	79/854	0/119
25	81/01	81/214	0/207
26	80/19	80/102	0/014
27	81/67	82/214	0/544
28	82/42	81/783	0/461
29	81/17	81/162	0/012
30	82/07	82/172	0/118
31	82/05	82/015	0/00
32	83/92	83/964	0/044

6- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این واکاوی توانایی بالایی در پیش‌بینی سختی جوش در فرایند GMAW ورق‌های فولادی کم کربن استفاده شده را دارد. با توجه به دقت بالای مدل طراحی‌شده می‌توان از آن برای مدل‌سازی GMAW استفاده کرد. بر این اساس با معلوم‌بودن پارامترهای ورودی (جریان، سرعت و ولتاژ) می‌توان خروجی (سختی) را پیش‌بینی کرد استفاده از مدل پیش‌بینی‌شده باعث کاهش هزینه ناشی از عدم کیفیت مورد نظر جوشکاری و اتلاف وقت در فرآیند تولید می‌شود.



شکل 11- نمودار همبستگی بین روش آزمایشی و مقدار پیش‌بینی‌شده

در این تحقیق اثر ترکیبی از پارامترهای ورودی جوشکاری (ولتاژ ، شدت جریان، سرعت جوشکاری، طول موثر الکترود و ضخامت پوشش نانو ذرات اکسید زیرکونیوم) بر سختی ناحیه جوش به وسیله مدل منطق فازی در فرآیند GMAW بررسی شد. نتایج نشان داد که وقتی ولتاژ از 22 به 30 ولت افزایش یافته، سختی از 80 به 78 راکول بی کاهش یافته است. افزایش جریان جوشکاری از 200 به 280 آمپرسبب کاهش سختی از 81 به 75 راکول بی شده است. همچنین با افزایش طول موثر الکترود از 10 به 18 میلیمتر سختی افزایش پیدا کرده است. با افزایش سرعت جوشکاری از 220 به 380 میلیمتر بر دقیقه سختی ناحیه جوش از 78 به 81 راکول بی افزایش یافته است. در آخر، با افزایش نانوذرات اکسید زیرکونیوم با ضخامت 1 میلیمتر، سختی از 78 به 84 راکول بی افزایش یافت. وجود تطابق بین اعداد سختی به دست آمده از مدل فازی و سختی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

به دست آمده از روش آزمایشی نشان دهنده دقت و اعتبار مدل است. بنابرین نتایج نشان می‌دهد که منطق فازی یک تکنیک دقیق و قابل اجرا در پیش‌بینی سختی فلز جوش در فرآیند GMAW هست. همان‌طور که نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد ورود نانوذرات به حوضچه جوش باعث تغییر ریزساختار از فریت ویدمن اشتاتن و مرزدانه ای به فریت سوزنی شده است. همچنین نانوذرات اکسید زیرکونیوم باعث تغییر در هندسه جوش با افزایش 2 برابری نفوذ و کاهش در ارتفاع و پهنای جوش شده است.

منابع

[1] AWS Handbook, "Gas Metal Arc Welding", Vol.20, 1997.

[2] عباسی، م.، نجفی دژده منفرد، ح.، خدابنده، ع.، " جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L به فولاد زنگ نزن 409 فریتی با فرآیند GMAW و سیم جوش‌های ER316 LSi , 309LMo " ER ، علوم و فناوری جوشکاری ایران، 4 (1) 19-1397.28.

[3] Kolahan, F. , Heidari, M., "A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW", International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, 2010.

[2] گلابچی، م. ، نقی زاده،ک.، شروش نیا، الف.، " نانو فناوری در معماری و مهندسی ساختمان" ، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، 1390.

[5] Macwan, D. , Dave, P. N. and Chaturvedi , S., "A review on nano-TiO2 sol-gel type syntheses and its applications", J. Mater. Sci., 3669-3686, 2011.

[6] Chen, B. , Han, F. , Huang, Y. , Lu, K., Liu, Y. and Li. L., "Influence of Nano scale marble (Calcium Carbonate CaCO3) on properties of D600R surfacing electrode", Weld. J. AWS Suppl. Res., 99-s-103-s. 88, 2009.

[7] Fattahi, M. , Nabhani, N. , Vaezi, M. and Rahimi, E., "Improvement of impact toughness of AWS E6010 weld metal by adding TiO2 nanoparticles to the electrode coating", J. Mater. Sci. Eng., 528 (27) 8031-8039, 2011.

[8] Pal, T. K. and Maity, U. K., "Effect of nano size TiO2 particles on mechanical properties of AWS E 11018M type electrode", Mat. Sci. Appl., 2 (9) 1258-1292, 2011.

[9] Aghakhani, M. , Ghaderi, M. R., Eslampanah, A. H., and Farzamnia, S.,"Prediction of Bead width inSubmerged Arc Welding Process using NanoTiO2 by Fuzzy Logic", Proc. of 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering, ISME, Shiraz, Iran, 2012.

[10] Aghakhani, M. , Ghaderi, M. R. , Karami, A., Derakhshan, A., "Combined effect of TiO2 nanoparticles and input welding parameters on the weld bead penetration in submerged arc welding process using fuzzy logic", Int J Adv Manuf Technol, 70:63–72, 2014.

[11] Aghakhani, M. , Naderian, P. , "Modeling and optimization of dilution in SAW in the presenceof Cr2O3 nano-particles", Int J Adv Manuf Technol, 78:1665–1676, 2015.

[12] ملاپور، ی.، آقاخانی. م، اسکندری،م.، آذریون،الف.، "مدلسازی نفوذ جوش درجوشکاری زیرپودری درحضور نانوذرات بوهمیت جذب سطحی شده با اسید بوریک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی" . مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران. 2 (2) ،47-55. 1395.

[13] Yang, Y. , "The effect of submerged arc welding parameters on the properties of pressure vessels and wind turbine tower steels", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2008.

[14] Hall, A. ,"The Effect of Welding Speed on the Properties of ASME SA 516 Grade 70 Steel", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2010.

[15] Xie, X. , Shen, J., Cheng, L., Li, Y., Pu, Y., "Effects of nano-particles strengthening activating flux on the microstructures and mechanical properties of TIG welded AZ31 magnesium alloy joints", Materials and Design, 05.024, 2015.

[16] Bin Ibrahim, A. , Faizal, M. , Che Ku, B. , "Effect of Nano Particle Deposition on Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminium Alloys by Taguchi Technique" ,Trans Indian Inst Met, 2016.

[17] Fallahi, A. A. , Shokuhfar, A. , Ostovari Moghaddam, A. , Abdolahzadeh, A. , "Analysis of SiC Nano-powder effects on friction stir welding of dissimilar Al-Mg alloy to A316L stainless steel" Journal of Manufacturing Processes. 30. 418–430, 2017.

[18] Muzamila, M., Wua. J., Akhtarc ,M., et al, "Multicomponent enabled MWCNTs-TiO2 nano-activating flux for controlling the geometrical behavior of modified TIG welding joint process" Diamond & Related Materials 97, 107442, 2019.

[19] Babuska, R. , "Fuzzy modeling for control", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.

[20] Zadeh, L. A. , "Fuzzy sets", J. Inf. cont., 8. 338-353, 1965.

[21] Karami, A. , Rezaei, E. , Shahhosseni, M. and Aghakhani, M., "Fuzzy logic to predict the heat transfer in an air cooler equipped with different tube inserts", Int. J. of Therm. Sci., 53 141-147, 2012.

[22] حمیدنیا، م. ، مصطفی پور، الف. ،"استفاده از منطق فازی برای پیش بینی خواص مکانیکی قطعات جوشکاری به روش نقطه جوش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]

با جریان پالس" ، نهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت تولید،1387.

[23] قره آغاجی، م. ، کشمیری حق، ر. ، " مدلسازی فرایند جوشکاری اصطکاکی برای تولید یوغ فرمان با استفاده از منطق فازی" ،کنفرانس ملی مهندسی مکانیک ایران، 1392.

[24] ASM Handbook , "Welding Brazing And Soldering ",Publication Information Contributors, vol6. 1993.

[25] ASTM Handbook, "Metals Mechanical Testing Elevated and Low Temperature Tests Metallograph", vol1. 2013.

[26] Tarng, Y. , Yang, W. and Juang, S. ,"The use of fuzzy logic in the Taguchi method for the optimisation of the submerged arc welding process", Int. J. of Adv. Man. Tech., 688-694, 2000.

[27] Aghakhani, M. and Nickzad, A. , "Modeling of Weld Height In The Process of GMAW In The Presences TiO2 Nano Particles by Neural Network", Journal of Mechanical Science and Technology of Modares, 15-7, 2015 (In Persian).

[28] Kou, S. , "Welding Metallurgy", New Jersy, John Wiley and Sons, 2003.

[29] Aghakhani.M,Ghaderi.M.R.,Mahdipour.M,Jalilian and Derakhshan.A., "Predicting the combined effect of TiO2 nano-particles and welding input parameterson the hardness of melted zone in submerged arc welding by fuzzy logic". Journal of Mechanical Science and Technology 27 (7) 21072113. 2013.

[30] Pan.T, et al., "Kinetics and mechanisms of intragranular ferrite nucleation on nano- metallic inclusions in low carbon steel", Materials Science and Engineering .A,Vol 438-440,pp.1128-1132.2006.

[31] Shim,J. H, Cho.Y. W, S. H. Chung, and etc., "Nucleation Of Intragranular Ferrite At Ti2o3 Particle In Low Carbon Steel", South Korea.Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742. 1999.

[32] Hashemi, S. H. and Mohammadyani,D., "Characterisation of weldment hardness impact energy and microstructure in API X65 steel", Int. J. Pres. Vess. Pip, 98 8-15. 2012.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-15]