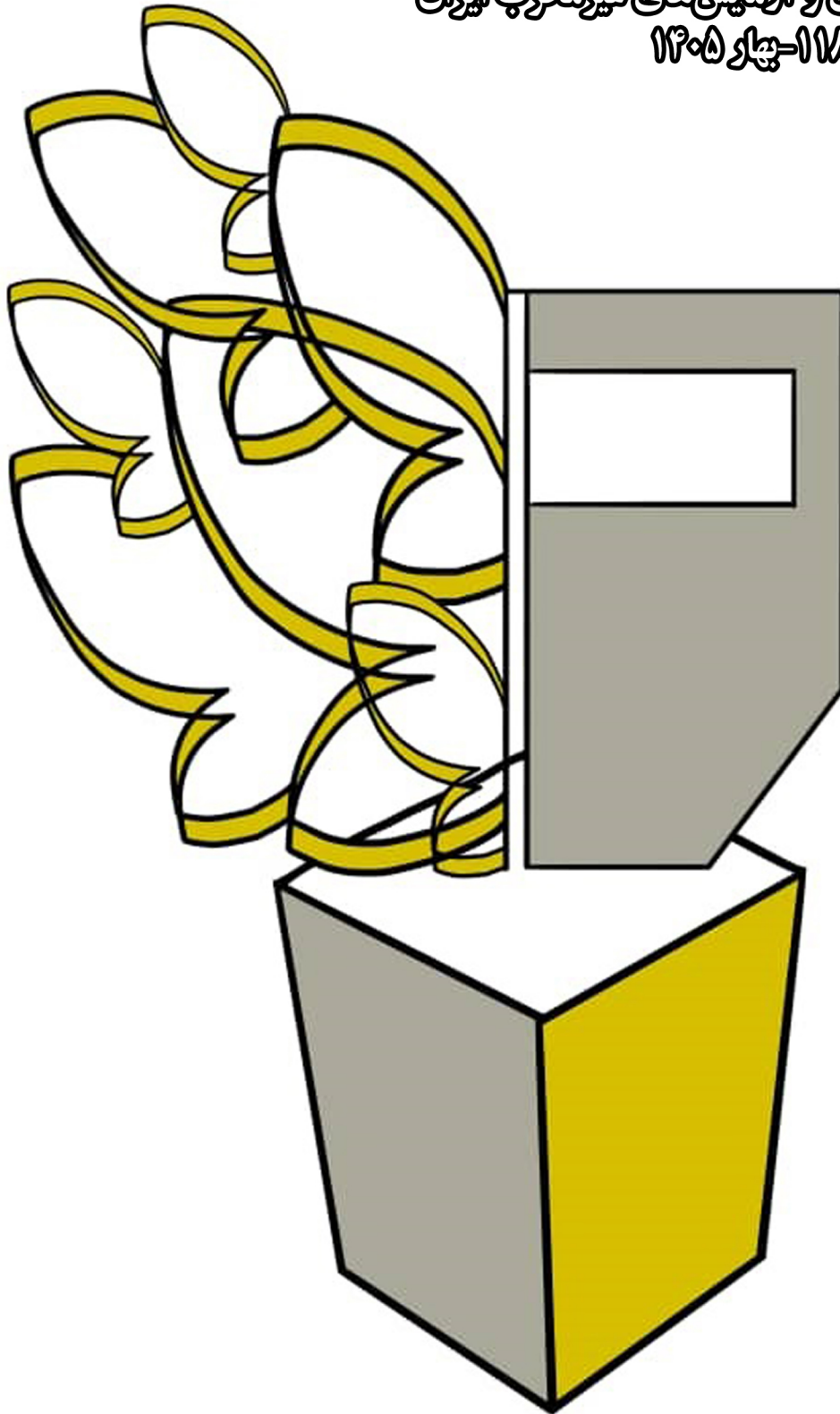


# بوشکاری

فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران  
شماره ۱۱۸-۱-۱۴۰۵





- 1 تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی فلز جوش ایجاد شده با الکتروود E6013 بر فولاد St37 در نتیجه تعمیرات متوالی، مسعود مصلاهی پور - سیدابوالفضل حسینی - مجید فاخری - مهدی راستی - کاظم عمانی
- 6 جوشکاری ذوبی فلزات نامشابه، مهندس عبدالوهاب ادب آوازه
- 11 بکارگیری جوش میانی جهت افزایش استحکام اتصالات در ساختمان های اسکلت فلزی، مجید توحیدلو - فرزاد سلیمانی
- 16 بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG موندل ۴۰۰ به نایمونیک ۷۵، رامین مهدی زاده - سید علی اصغر اکبری موسوی - سعید مهدی پور
- 23 پیش بینی استحکام کششی Al-5083 جوش اصطکاکی اغتشاشی داده شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مسعود مصلاهی - قاسم عزیزی - امین حسین مرشدی
- 29 ساخت دستگاه آزمون LB-TRC جهت بررسی ترک سرد، مهرداد حسین پور - علیرضا ابراهیمی
- 34 بررسی ریز ساختار و رفتار خوردگی داغ اتصال TLP سوپر آلیاژ Hastelloy X، حمید بختیاری - محمد رضا رحیمی پور - محمد فرویزی - احمد ملکان
- 38 تاثیر اعمال لرزش الکترومغناطیسی همزمان با جوشکاری بر رفتار فرسایشی روکش فولاد زنگ نزن دوفازی روی فولاد ساده کربنی، محمد رخش ماه - رضا دهملایی - مهدی یگانه
- 44 عملکرد تخلخل ها در نمونه های خستگی تولید شده توسط ذوب لیزر بستر پودر (L-PBF)، آرزو ابیضی - فائزه فاخری - بهمن ولیزاده

انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران  
موسسه مرجع ملی در زمینه تکنولوژی جوشکاری و  
آزمایش های غیرمخرب در جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: مهندس عبدالوهاب ادب آوازه

زیر نظر شورای نویسندگان

مسئول اجرایی: کمیته انتشارات

مدیر اجرایی و گرافیک: دکتر نازیلا ادب آوازه

نشانی دبیرخانه انجمن:

اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس -  
طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325 فاکس: 03132231765

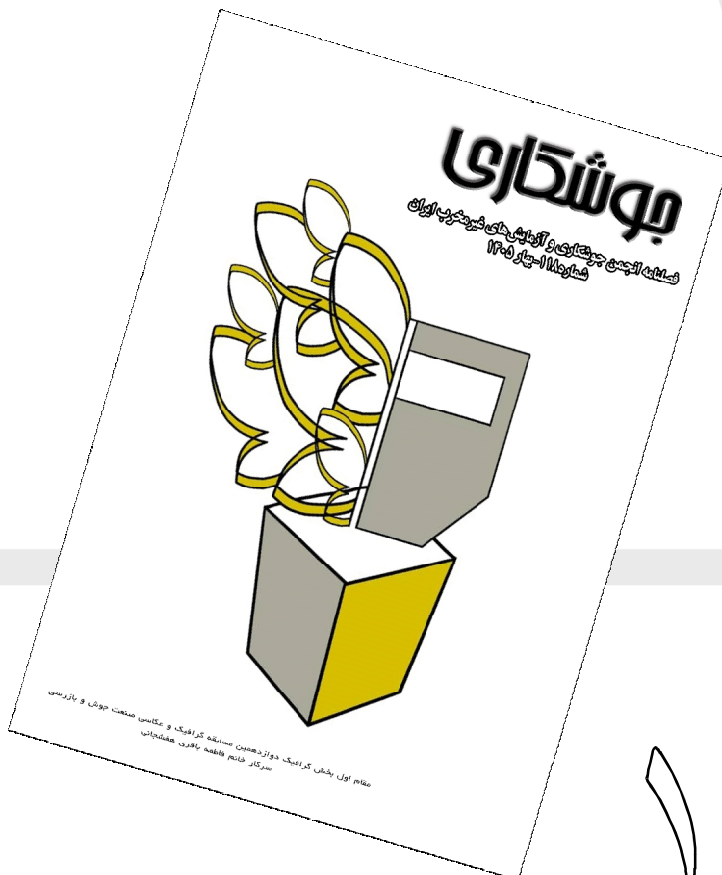
پست الکترونیک:

[Email: info@iwnt.com](mailto:info@iwnt.com)

فصلنامه جوشکاری نشریه ای در زمینه موضوعات و  
مسائل مرتبط با جوشکاری و آزمایش های غیر مخرب  
است.

فصلنامه در ویرایش مقالات رسیده آزاد است

نقل نوشته ها با ذکر ماخذ بلامانع است.





## تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی فلز جوش ایجاد شده با الکتروود E6013 بر فولاد St37 در نتیجه تعمیرات متوالی

مسعود مصلاهی پور<sup>۱</sup>، سیدابوالفضل حسینی<sup>۲</sup>، مجید فاخری<sup>۳</sup>، مهدی راستی<sup>۴</sup>، کاظم عمانی<sup>۵</sup>

### چکیده

اتصالات ایجاد شده با فرایند جوشکاری به دلایل مختلفی مانند فرسوده شدن با گذشت زمان، مشکلات جوشکاری و غیره کارایی لازم را نداشته و نیاز به تعمیر دارند. امروزه فرایند جوشکاری تعمیراتی بسیار مورد توجه صنایع مختلف می باشد که می تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه ها به همراه داشته باشد. فرایند جوش تعمیراتی به سبب ورود حرارت چندباره بر موضع اتصال موجب تشدید تغییرات ریزساختاری در نواحی مختلف جوش و در نتیجه خواص مکانیکی جوش می شود. در این تحقیق فلز جوش حاصل از الکتروود E6013 تهیه و در شرایط بدون تعمیر، یک مرتبه تعمیر شده و دو مرتبه تعمیر شده، مورد بررسی های ریزساختاری و مکانیکی واقع شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استحکام کششی نمونه جوشکاری شده از ۵۴۴٫۲Mpa به ۴۴۱٫۲Mpa با دو مرتبه جوشکاری کاهش می یابد. همچنین با افزایش تعداد دفعات تعمیر، کاهش استحکام ضربه و در نتیجه افزایش تردی فلز جوش رخ داد. در بررسی های ریزساختاری نیز افزایش اندازه دانه در نواحی مختلف جوش مشاهده شد.

کلمات کلیدی: تعمیر جوش؛ E6013؛ فولاد کم کربن؛ ریزساختار؛ حرارت ورودی.

### مقدمه

فولادهای ساده کربنی به دلیل برخورداری از استحکام بالا و قابلیت جوشکاری مناسب، در صنعت ساخت و ساز از قبیل سازه های فولادی، بدنه های مخازن، کشتی سازی و غیره مورد استفاده روزافزون می باشند [۱].

از متداولترین و پرکاربردترین تکنیکهای جوشکاری صنعتی می توان به فرایند جوشکاری قوس الکتریکی دستی (SMAW) اشاره نمود که در زمینه های مختلف اعم از تولید، تعمیرات و غیره بسیار مورد توجه است [۲]. در فرایند SMAW قوس الکتریکی منبع ایجاد حرارت در موضع اتصال است [۳]. حرارت ایجاد شده با قوس الکتریکی تابعی از پارامترهای جوشکاری (شدت جریان، ولتاژ دو سر قوس، قطبیت جوشکاری، سرعت جوشکاری و غیره) است. رابطه (۱) عموماً برای بیان مقدار حرارت ایجاد شده در موضع اتصال حین

فرایند جوشکاری تعریف شده است (ا شدت جریان، ولتاژ و S سرعت جوشکاری) [۴].

$$Q_{in} = \eta \times \frac{IV}{S} \quad (1)$$

حرارت ورودی به موضع اتصال، موجب ذوب شدن سطوح تماس و تشکیل فاز مذاب بین دو سطح شده که انجماد این فاز مذاب اتصال جوشی ایجاد می کند. اختلاف دمای بین موضع اتصال و نواحی اطراف موجب فعال شدن انتقال حرارت از فلز جوش به نواحی اطراف آن می شود [۵]. فلز پایه مجاور فلز جوش که دستخوش تغییرات ساختاری و خواص مکانیکی ناشی از انتقال حرارت واقع شده، منطقه متأثر از حرارت (HAZ) نامیده می شود. مطالعات زیادی در خصوص ارتباط پارامترهای جوشکاری و تغییرات ساختاری در HAZ ارائه شده است [۶-۱۱]. کشاو پراساد و همکاران در رابطه با تأثیر شدت

## مواد و روش پژوهش

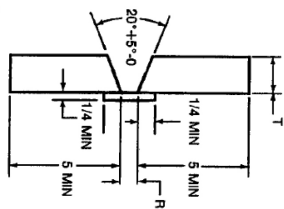
در این تحقیق از ورق فولادی **St-37** به ضخامت **15 mm** در ابعاد **12x26 cm** با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. سطوح اتصال با شیار **V** شکل مطابق با استاندارد **AWSA5.1** و شکل (۱) آماده سازی شدند. جوشکاری با فرایند **SMAW**، با الکتروود **E6013** با قطر **3/2 mm** با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) انجام گرفت. به دلیل ضخامت بالای قطعه، جوشکاری طی **24 پاس** در **12 لایه** انجام شد. قبل از انجام فرایند جوشکاری الکتروودها در دمای **100** درجه سانتی گراد پیش گرم شدند و دمای جوشکاری هر پاس در حدود **175** درجه سانتی گراد بود. سایر پارامترهای جوشکاری در جدول شماره (۲) آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی الکتروود E6013 و فولاد St37

	%C	%Si	%Mn	%P	%Cr	%S
الکتروود E6013	0.064	0.39	0.4	0.033	0.025	0.016
فولاد ST37	0.11	0.05	0.56	0.07	0.07	0.005

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری

شدت جریان (A)	ولتاژ دو سر قوس (V)	قطبیت	سرعت حرکت الکتروود (mm/s)
125	20-25	DCRP	2-2.5



شکل ۱- طرح اتصال v شکل (T=15mm, R=14mm)

بعد از انجام فرایند جوشکاری بر قطعه، به منظور بررسی تأثیر بازسازی بر جوش‌های ایجاد شده، از سنگ زدن و جوشکاری مجدد بر فلز جوش استفاده شد. بدین صورت که جوش‌های ایجاد شده سنگ زده شدند و مجدداً تحت عملیات جوشکاری قرار گرفتند. فرایند سنگ زدن و جوشکاری مجدد بر سه نمونه مختلف انجام گرفت که در جدول (۳) مشخصات و نامگذاری هر بخش از انجام این فرایندها آورده شده است.

جدول ۳- نامگذاری نمونه‌ها و فرایندهای انجام شده بر آنها

نام نمونه	جزئیات سنگ زدن و جوشکاری
0R-SMW	نمونه جوشکاری شده بدون تعمیر
1R-SMW	نمونه یکبار سنگ زده شده و تحت جوشکاری تعمیر قرار گرفته
2R-SMW	نمونه دوبار سنگ زده شده و دوبار تحت جوشکاری تعمیر قرار گرفته

به منظور بررسی خواص مکانیکی، هر سه نمونه تحت آزمون‌های کشش و ضربه واقع شدند. نمونه‌های آزمون ضربه مطابق با استاندارد **AWSA5.1** در ابعاد **1x1x5/5 cm** آماده شدند و توسط دستگاه **SANTAM-SIT-300** انرژی جذب شده هر نمونه بعد از انجام آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون برای هر نمونه در سه نوبت انجام گرفت. اطلاعات مربوط به آزمون کشش عرضی نمونه‌ها نیز

جریان بر سختی ناحیه متأثر از حرارت فولاد **HSLA** به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان از **500** آمپر به **700** آمپر، میزان سختی از **310** ویکرز به **260** ویکرز کاهش می‌یابد و همچنین دریافتند که با افزایش جریان از **500** آمپر به **600** آمپر چقرمگی افزایش می‌یابد اما افزایش جریان تا **700** آمپر موجب کاهش چقرمگی می‌شود [۱۲]. شومه و همکاران مشاهده کردند که در دو حرارت ورودی متفاوت **10 KJ/cm** و **40 KJ/cm**، اندازه دانه به ترتیب از **80** میکرون به **130** میکرون افزایش یافته است [۱۳]. شن و همکاران نیز به مطالعه در رابطه با تأثیر حرارت ورودی در ناحیه **HAZ** پرداختند. طی این مطالعه مشاهده شد که با افزایش حرارت ورودی از **3 KJ/mm** به **3/5 KJ/mm**، انتقال حرارت به فلز پایه مسافت بیشتری را طی کرده و به سبب آن پهنای ناحیه **HAZ** از **2/2 mm** به **3/2 mm** افزایش یافته است [۱۴]. اورغلو و همکاران گزارش کردند که با افزایش گرمای ورودی از **0/5 KJ/mm** به **2 KJ/mm** در فولاد کم کربن **SAE1020**، تغییراتی در ریزساختار رخ می‌دهد، به این صورت که در ناحیه ریز دانه **HAZ**، ریزساختار از فریت مرزدانه‌ای و پرلیت ریزدانه به فریت چندضلعی و پرلیت ریز دانه تغییر می‌کند و در ناحیه درشت دانه **HAZ** تغییر ساختار از مارتنیزیت به فریت مرزدانه و پرلیت ریز دانه مشاهده می‌شود [۱۵].

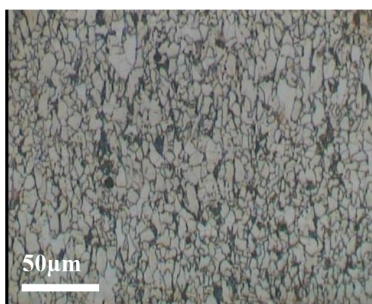
از جمله مشکلات و نگرانی‌های مرتبط با جوش و اتصالات جوش داده شده، بازسازی و تعمیر جوش‌های ایجاد شده است. به عبارت دیگر جوشکاری یا تعمیر جوش‌های قبلی می‌تواند موجب تحمیل شدن سیکل‌های حرارتی جدیدی بر **HAZ**‌های قبلی شود و در نتیجه موجب تشدید بهم ریختگی ساختاری و خواص از قبیل رشد دانه، تغییر در مقاومت به خوردگی، کاهش سختی، ایجاد تنش‌های پسماند و غیره در این ناحیه می‌شود [۱۶]. بعنوان مثال مشاهده شد که تعمیر بر جوش اولیه سبب رشد دانه و افزایش اندازه عیوب در منطقه **HAZ** می‌شود [۱۷]. همچنین ناحیه متأثر از حرارت نمونه تعمیر شده، تمایل به خوردگی بیشتری از خود نشان می‌دهد [۱۸].

به منظور تعیین تغییرات ساختاری و خواص موضع اتصال در نتیجه اعمال چندباره جوشکاری تحقیقات مختلفی از قبیل استفاده از فرایندهای حالت جامد مانند **FSW** [۱۹]، محدودیت در ابعاد پخ‌های ایجاد شده برای جوش تعمیر [۲۰]، تحلیل تنش‌های پسماند ناشی از تعمیر [۲۱]، مطالعه تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌ی تعمیر یافته [۲۲]، تأثیر میزان حرارت ورودی تعمیر بر ماهیت ریزساختار فلز جوش و نواحی اطراف آن [۲۳]، انجام عملیات حرارتی پس از تعمیر (**PWHT**) [۲۴] و غیره انجام گرفته است.

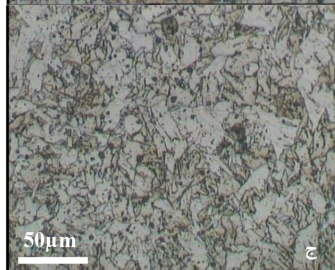
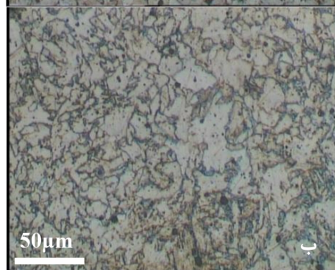
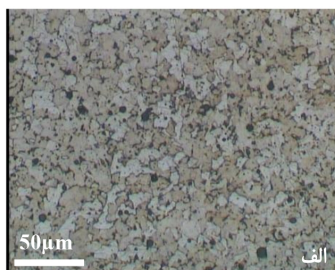
در موارد متعددی در صنعت با مقوله بازسازی و تعمیر جوش‌های فرسوده مواجه هستیم. فرایند تعمیر جوش به سبب اعمال حرارت بر جوش‌های قبلی موجب تغییراتی در ساختار و خواص فلز جوش و نواحی اطراف آن می‌شود. بنابراین انجام تحقیقات متمرکز بر روی این تغییرات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق سعی بر این شد تا تغییرات ساختاری و خواص مکانیکی بعد از هر نوبت از تعمیر جوش مورد بررسی قرار بگیرد.

منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در اطراف فلز جوش می شود. با افزایش فاصله از مرز WM/HAZ به سمت فلز پایه، حرارت ورودی به HAZ کاهش می یابد. بنابراین در HAZ نزدیک به WM به دلیل حرارت ورودی بیشتر با پدیده رشد دانه (شکل ۴) و در HAZ دورتر از مرز WM/HAZ، پدیده نرماله شدن یا تبلور مجدد (برحسب سابقه کار مکانیکی اعمال شده بر فلز پایه) و در نتیجه ایجاد ساختار ریزدانه مواجه می شویم (شکل ۵).

بسا اعمال تعمیر و افزایش تعداد دفعات تعمیر در فلز جوش ایجاد حرارت ورودی به فلز پایه اطراف فلز جوش افزایش می یابد در نتیجه با فعال شدن نفوذ و حرکت اتمی و در نتیجه رشد دانه (کاهش مساحت مرزدانه ها و کاهش انرژی مرزدانه ها) ایجاد می شود.



شکل ۲- ریز ساختار ناحیه فلز پایه.



شکل ۳- ریز ساختار ناحیه فلز جوش.

الف- نمونه 0R-SMAW، ب- نمونه 1R-SMAW، ج- نمونه 2R-SMAW

بوسیله دستگاه SANTAM-STM-400 با سرعت کشش 10 mm/min بدست آمد و گزارش شد. برای بررسی ریزساختار هر نمونه، برش از مقطع عرضی جوش هر نمونه انجام گرفت و تحت عملیات سنباده زنی و سپس پولیش با پودر آلومینا قرار گرفتند و در انتها حکاکی سطح با عملیات اچ کردن در محلول نایتال ۲ درصد به مدت ۲۰ ثانیه انجام شد. ریزساختار هر یک از نمونه ها در سه ناحیه ی فلز جوش، فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی ریزساختاری نوری واقع شدند.

## نتایج و بحث

### - بررسی های خواص مکانیکی

نتایج بدست آمده از آزمون کشش بررسی و در جدول (۴) نشان داده شده اند. ملاحظه می شود که با انجام یکبار تعمیر استحکام کششی و استحکام تسلیم کاهش پیدا می کند اما در نوبت دوم از تعمیر استحکام کششی و تسلیم افزایش یافته است که این میزان در مقایسه با نمونه بدون تعمیر (0R-SMAW) کمتر است. مطابق با جدول (۴) نمونه 2R-SMAW رفتار تردی داشته و کمترین تغییر طول را از خود نشان می دهد. به نحوی که می توان گفت گلوبی شدن در آن صورت نگرفته است. نمونه 1R-SMAW در مقایسه با نمونه 2R-SMAW رفتار نرم تر و در مقایسه با نمونه 0R-SMAW رفتار تردتری را دارا است. محل شکست نمونه 2R-SMAW از فلز جوش است که نشان می دهد بعد از انجام دو بار تعمیر، جوش کارایی خود را از دست داده است.

نتایج آزمون ضربه در جدول (۵) آمده است. مشاهده می شود که نمونه 0R-SMAW از بالاترین استحکام ضربه نسبت به دو نمونه دیگر برخوردار است و نمونه 2R-SMAW کمترین استحکام ضربه را دارد که این نشان دهنده ترد شدن نمونه بعد از انجام هر بار تعمیر است.

جدول ۴- نتایج آزمون کشش

نام نمونه	استحکام کششی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	ازدیاد طول (%)	استحکام شکست (Mpa)	محل شکست
0R-SMAW	544	418	19	406	فلز پایه
1R-SMAW	383	288	14	299	فلز پایه
2R-SMAW	441	386	12	437	فلز جوش

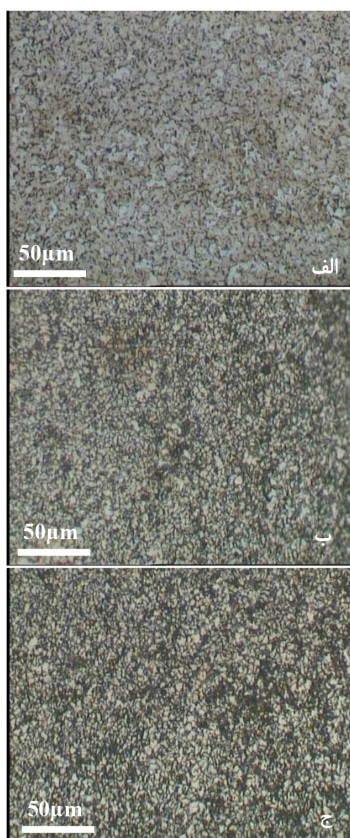
جدول ۵- نتایج آزمون ضربه

نام نمونه	انرژی ضربه نوبت اول (J)	انرژی ضربه نوبت دوم (J)	انرژی ضربه نوبت سوم (J)	متوسط انرژی ضربه (J)
0R-SMAW	66	65	72	68
1R-SMAW	57	58	73	63
2R-SMAW	53	51	54	53

### - بررسی های ریزساختاری

بررسی های ریزساختاری فلز پایه و مناطق متأثر از حرارت و فلز جوش در نمونه های جوشکاری و تعمیر شده در شکل های (۲) تا (۵) ارائه شده است. فولاد St-37 یک فولاد ساده کربنی با ساختار فریتی و جزایر پرلیتی در مناطق برخورد دانه های فریت می باشد (شکل ۲). حرارت ورودی به موضع اتصال موجب ایجاد فاز مذاب در فلز جوش (WM) و انتقال حرارت به فلز پایه اطراف موضع اتصال موجب ایجاد

سازه‌های St-37 تغییر چندانی در قابلیت تحمل موضع اتصال ایجاد نمی‌شود. افزایش بیشتر دفعات تعمیر بایستی با دقت و محدودیت‌های کاربرد بعدی انجام شود تا از بروز حوادث ناخواسته به دلیل تردی موضع اتصال جلوگیری شود.



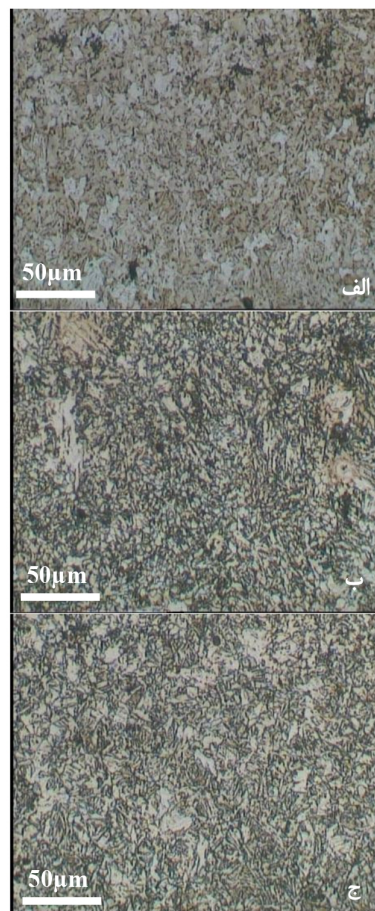
شکل ۵- ریز ساختار ناحیه متأثر از حرارت ریزدانه.  
الف - نمونه 0R-SMAW، ب - نمونه IR-SMAW، ج - نمونه 2R-SMAW

#### تقدیر و تشکر

در پایان از مدیریت محترم و مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت الکترون یزد که ما را در انجام این پروژه یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

#### مراجع

- 1-A.R. Bahman, E. Alialhosseini, "Change in hardness, yield strength and UTS of welded joints produced in St37 grade steel", *Indian Journal of Science and Technology*, No.12,2010.
- 2-Ibrahim Alkahla, Salman Pervaiz, "Sustainability assessment of shielded metal arc welding (SMAW) process", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. United Arab Emirates*, 2017.
- 3-Amanie, "Effect of Submerged Arc Welding Parameters on the Microstructure of SA516 and A709 Steel Welds". Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, 2011.



شکل ۴- ریز ساختار ناحیه متأثر از حرارت درشت‌دانه.  
الف - نمونه 0R-SMAW، ب - نمونه IR-SMAW، ج - نمونه 2R-SMAW

انجماد فلز جوش در حوضچه مذاب با انجماد رونشستی (اپیتکسیال) بر دانه‌های منطقه همجوشی شروع و به سمت منطقه مرکزی فلز جوش گسترش می‌یابد. افزایش دانه‌ها در منطقه همجوشی با افزایش دفعات تعمیر (شکل ۳) موجب کاهش مراکز جوانه‌زنی فلز جوش و در نتیجه درشت شدن دانه‌ها در فلز جوش می‌شود که این درشت‌دانه‌گی موجب افت پلاستیسیته یا افزایش تردی موضع اتصال با افزایش دفعات تعمیر فلز جوش شده که نتایج آزمون ضربه و کششی (جدول ۴ و جدول ۵) موید این مطالب است.

نتیجه‌گیری در این پژوهش تأثیر تعداد دفعات تعمیر بر تغییرات ساختاری و خواص مکانیکی نمونه جوشکاری شده، مورد بررسی و پژوهش واقع شد. از بهترین نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: با افزایش تعداد دفعات تعمیر در ناحیه جوشکاری شده، درشت شدن دانه و زمختی ساختار در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت رخ می‌دهد. با افزایش تعداد دفعات تعمیر در ناحیه جوشکاری شده، استحکام کششی و مقاومت به ضربه فلز جوش دستخوش تغییر و در نمونه‌های تعمیر شده برای دو دفعه تا حدودی ترد شدن ناحیه جوش رخ داد. تا یک دفعه تعمیر فلز جوش در فولاد

on microstructure and toughness of intercritical heat-affected zone of a low carbon steel", *Mater. Sci. Eng. A*, 286, 2000, pp.289-297

16-A.Jannifar, T.A.Ichsan, Hamdani Nurdin, Fakhriza Mukhtar, Wahdania Wahyudi, "Welding current effect of welded joints of base metal st37 on characteristics: corrosion rate and hardness", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 268, 2019, 012167.

17-Krishnakumar Shankar, Weidong Wu, "Effect of welding and weld repair on crack propagation behaviour in aluminium alloy 5083 plates", *Mater. Des.*, 23, 2002, pp.201-208.

18-AghaAli, I.Farzam, M.Golozar, M.A.Danaee, "The effect of repeated repair welding on mechanical and corrosion properties of stainless steel 316L", *Mater. Des.*, 54, 2014, 331-341.

19-LIU Hui-jie, ZHANG Hui-jie, "Repair welding process of friction stir welding groove defect", *Trans. Nonferrous Met. Soc, China*, 19, 2009, 563-567

20-Pingsha Dong, "On repair weld residual stresses and significance to structural integrity", *International Institute of Welding*, 2018

21-Dong, P.Zhang, J.Bouchard, "Effects of repair weld length on residual stress distribution", *Trans. ASME J. Press. Vessel. Technol.*, 2002, 124, pp.74-80.

22-O.E.Vegaa, J.M. Hallena, A.Villagomez, A.Contreras, "Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties", *Materials Characterization*, 59, 2008, pp.1498-1507

23- Yun Luo, Wenbin Gu, Wei Peng, Qiang Jin, Qingliang Qin, Chunmei Yi, "A Study on Microstructure, Residual Stresses and Stress Corrosion Cracking of Repair Welding on 304 Stainless Steel: Part I-Effects of Heat Input", *Materials*. MDPI, 13, 2020.

24-A.Aloraier, P.Thomson, "FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 83, Issue 5, 2006, pp.394-398.

4-Rohit Jha, A.K.Jha, "Influence of Welding Current and Joint Design on the Tensile Properties of SMAW Welded Mild Steel Joints", *Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, pp.106-111.

5-T.DebRoy, S.A.David, "Physical processes in fusion welding", *The American Physical Society, USA*, 1992

6-Moeinifar, S.Kokabi, A.H.Hossemi, H.R.M, "Effect of tandem submerged arc welding process and parameters of gleeble simulator thermal cycles on properties of the intercritically reheated heat affected zone", *Material and Design*, 32, 2010, pp.869-876.

7-Gunaraj, V.Murugun, "Prediction of heat affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes", *Welding Journal*, 5, 2002, pp.94-98.

8-Lianghong XU, Zhang Jun C, Yanqing N, "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of 07MnCrMoVR weld joints", *Chin J Mech Eng*, 24, pp.1-7.

9-L.Y.Lan, C.L.Qiu, D.W.Zhao, X.H.Gao and L.X.Du, "Effect of single pass welding heat input on microstructure and hardness of submerged arc welded high strength low carbon bainitic steel", *Science and Technology of Welding and Joining, China*, 2012, VOL 17 NO 7.

10-Narender Sura, Kanwarpal Singh, "Experimental Study on Effects of Process Parameters on HAZ of Plain Carbon Steel Using GMAW", *International Conference on Emerging Trends in Science & Technology, India*, 13th April 2018.

11-A.H.Price, "Significant system parameters influencing HAZ properties in 9%Ni steel", *science and technology of welding and joining, Volume 6*, 2013, pp.255-260.

12-Prasad K, Dwivedi DK, "Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints", *Int J Adv Manuf Technol*, 36, pp.475-483.

13-M.Shome, "Effect of heat-input on austenite grain size in the heat-affected zone of HSLA-100 steel", *Mater. Sci. Eng A*, 2007, pp.454-460.

14-S.Shen, I.N.A.Oguocha, S.Yannacopoulos, "Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints", *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2012, pp.286-294.

15-M.Eroglu, M.Aksoy, "Effect of initial grain size

#### پی نوشت

- 1- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران
- 2- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران؛
- 3- مدیر تحقیقات و آزمایشگاه شرکت الکتروود یزد، ایران؛
- 4- مدیر کنترل کیفیت شرکت الکتروود یزد، ایران
- 5- مدیر تولید شرکت الکتروود یزد، ایران

## جوشکاری ذوبی فلزات نامشابه

### 1- مقدمه

در صنعت گاهی به فلزاتی با خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوت احتیاج است که جوشکاری آن‌ها به یکدیگر در این نوشته بررسی می‌شود.

اتصال فلزات نامشابه با خواص مورد نظر نیاز به طراحی و برنامه‌های اجرایی مهندسی شده دارد. در یک مجموعه صنعتی گاهی یک قطعه نیاز به مقاومت در مقابل دمای بالا دارد، در حالیکه قطعه دیگر نیاز به مقاومت خوب به خوردگی دارد.

گاهی سازه‌ای یا قطعه‌ای نیاز به چقرمگی بالا یا مقاومت به سایش خوب در یک ناحیه دارد، در حالیکه در ناحیه دیگر نیاز به استحکام بالا دارد. با ایجاد توانایی اتصال مواد نامشابه با خواص مهندسی شده می‌توان سازه‌های خودرویی سبک وزن ارائه کرد، روش‌های تولید انرژی را بهبود بخشید و محصولات نسل جدید ایجاد کرد.

جوشکاری فلزات نامشابه، اغلب از جوشکاری فلزات یا آلیاژهایی که تفاوت کمی در ترکیب شیمیایی دارند، دشوارتر است. معهداً بسیاری از فلزات نامشابه با فرایندهای اتصال مناسب و دستورالعمل‌های تخصصی، بطور موفقیت آمیز جوش داده می‌شوند.

در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، نیروگاه‌ها و صنایع نفت و گاز که قطعه یا مجموعه‌ای در یک کاربرد در معرض محیط‌های چندگانه قرار می‌گیرد، جوشکاری فلزات نامشابه حائز اهمیت است.

### 2- ملاحظات جوشکاری ذوبی فلزات نامشابه

در جوشکاری ذوبی اتصالات فلزی نامشابه، مهم‌ترین ملاحظه، ترکیب شیمیایی فلز جوش و خواص فلز جوش است.

ترکیب شیمیایی جوش به ترکیب شیمیایی دو فلز پایه، فلز پرکننده و رقیق شدن جوش بستگی دارد. ترکیب فلز جوش معمولاً یکنواخت

مهندس عبدالوهاب ادب آوازه<sup>1</sup>

نیست (به ویژه در جوش‌های چندپاسه) و تغییرات ترکیبی یا شیب ترکیبی در فلز جوش نزدیک فلز پایه طرفین احتمال دارد. این خصوصیات از نظر احتمال پیدایش ترک گرم در فلز جوش حین انجماد اهمیت دارند. در طراحی اتصال جوش فلزات نامشابه لازم است جنبه‌های اصلی آلیاژی، خصوصیات متالورژی حاصله و خواص مکانیکی و فیزیکی جوش مورد توجه قرار گیرد.

اگر مذاب دوفلز پایه نامشابه یک سری پیوسته محلول جامد تشکیل دهند (مثل مس و نیکل)، تولید جوش ذوبی بین آن‌ها به آسانی انجام می‌شود. برعکس، اگر مذاب دو فلز پایه نامشابه، فازها یا ترکیب‌های بین‌فلزی پیچیده تشکیل دهند، جوشکاری ذوبی موفقیت آمیز به در دسترس بودن فلز پرکننده و دستورالعمل جوشکاری مناسب که از تشکیل چنین ترکیب‌ها یا فازها جلوگیری کنند و جوش سالم با خواص قابل قبول برای کاربری مورد نظر ارائه دهند، بستگی دارد.

### 2-1- رقیق شدن و آلیاژی شدن

حین جوشکاری ذوبی، دو فلز پایه نامشابه و فلز پرکننده ذوب شده و حوضچه جوش را تشکیل می‌دهند که پس از انجماد فلز جوش تک فاز یا مخلوطی از دو یا چند فاز خواهد شد. فلز جوش تک فاز ممکن است محلول جامد (مثل  $\text{Cu-Ni}$ )، ترکیب بین‌فلزی مثل  $\text{CuAl}_2$  یا  $\text{TiC}$  و  $\text{Fe}_3\text{C}$  باشد. تعداد، نوع، مقدار و ترتیب متالورژی فازها، خواص و سلامت فلز جوش را معین می‌کند.

نحوه انجماد و نرخ سرد شدن نیز تاثیر قابل توجهی بر حضور فازها و ساختار متالورژی فلز جوش دارد. در جوشکاری فلزات نامشابه، فلز پرکننده باید به آسانی با فلزات پایه آلیاژ شود و فلز جوش با فاز پیوسته و زمینه انعطاف پذیر تشکیل دهد. به ویژه، فلز پرکننده باید

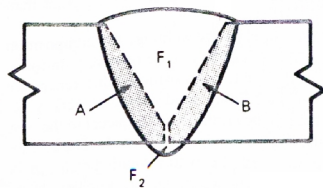
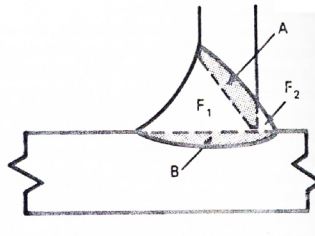
بتواند بدون تولید ریزساختار حساس به ترک، با فلزات پایه همجوشی داشته باشد. ریزساختار فلز جوش باید تحت شرایط بهره برداری پایدار باشد. استحکام فاز جوش باید معادل یا بهتر از استحکام فلز پایه ضعیف تر باشد. در حوضچه جوش مذاب بیشتر فرایندهای جوشکاری ذوبی، هم زنی قابل توجهی پیش می آید. هم زنی فلز جوش تمایل به یکنواخت شدن ایجاد می کند (بجز در منطقه باریک تحت تاثیر حرارت طرفین جوش).

وقتی فلز پرکننده دارای نقطه ذوب بالاتر از نقطه ذوب فلز پایه است، پهنای نوار فلز پایه ذوب شده بیشتر می شود. تفاوت ترکیبی معینی در پاس های جوش به ویژه بین پاس ریشه، پاس های مجاور فلزات پایه و بقیه پاس های پرکنی وجود داشته باشد. ترکیب میانگین فلز جوش کل را می توان با ضریب رقیق شدن (نسبت حجمی فلزات پایه ذوب شده به حجم کل فلز جوش) محاسبه کرد.

## 2-2- دمای ذوب

برای اتصال فلزات نامشابه با جوشکاری ذوبی، نیاز به ذوب هر دو فلز پایه است. اگر دماهای ذوب دو فلز نامشابه نزدیک به هم باشند تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد اختلاف داشته باشند، تکنیک ها و دستورالعمل های عادی جوشکاری رضایتبخش هستند، اما اگر دماهای ذوب دو فلز تفاوت زیادی داشته باشند، مسائل جوشکاری خیلی پیچیده می شود. در آن صورت بهتر است از لحیمکاری سخت، لحیم جوشکاری یا فنون جوشکاری حالت جامد برای متصل کردن آن فلزات استفاده کرد.

در جدول (۱) خواص فیزیکی چند فلز نسبت به فولاد کربنی ارائه شده است.



$$\text{درصد رقیق شدن فلز A} = \frac{A}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100 \quad \text{درصد رقیق شدن فلز B} = \frac{B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100$$

$$\text{درصد رقیق شدن کل} = \frac{A+B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100$$

شکل ۱

جدول ۱- خواص فیزیکی فلزات نسبت به فولاد کربنی

76Ni-16Cr-8Fe	70Ni-30Cr	فولاد زنگ زن آستنیتی	آلومینیوم	مس	فولاد کربنی	خواص نسبی
۱/۰	۱/۲	۱/۴	۲/۱	۱/۵	۱/۰	متوسط ضریب انبساط حرارتی
۰/۲	۰/۴	۰/۷	۳/۱	۵/۹	۱/۰	هدایت حرارتی
۰/۹	۱/۱	۱/۰	۱/۹	۰/۸	۱/۰	گرمای ویژه
۱/۱	۱/۱	۱/۰	۱/۹	۱/۱	۱/۰	چگالی
۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۴	۰/۷	۱/۰	دمای ذوب

با توجه به داده های جدول (۱) می توان دریافت که جوشکاری آلومینیوم به فولاد یا به آلیاژهای نیکل دشوار است. تفاوت قابل توجه در دماهای ذوب دو فلز پایه یا فلز جوش و یک فلز پایه ممکن است منتج به پارگی فلز دارای دمای ذوب پایین تر شود.

انجماد و انقباض فلز با دمای ذوب بالاتر، تنش را در فلز دیگر می افزاید، در حالیکه در شرایط انجماد نسبی یک ضعف محسوب می شود.

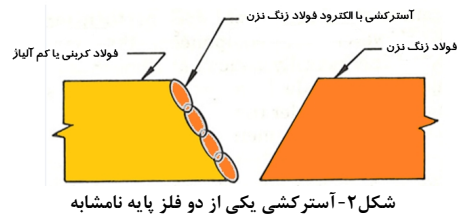
این مسئله را می توان با رسوب دادن یک یا چند لایه فلز پرکننده با دمای ذوب میانه بر روی فلز پایه با نقطه ذوب بالاتر حل نمود (این دستورالعمل به آسترکاری معروف است).

آنگاه رویه فلز آسترکشی شده به فلز پایه دیگر جوش داده می شود. آسترکاری به کاهش اختلاف دمای ذوب دو فلز پایه نامشابه کمک می کند (شکل ۲).

## 2-3- رسانایی حرارتی

رسانایی حرارتی بیشتر فلزات و آلیاژها نسبتا خوب است، اما بعضی از فلزات رسانایی حرارتی خیلی بهتر از دیگران دارند. رسانایی سریع حرارت از حوضچه جوش مذاب به یک فلز پایه مجاور ممکن است بر ورودی انرژی لازم برای ذوب موضعی فلز پایه تاثیر نامطلوب بگذارد. وقتی دو فلز نامشابه که دارای رسانایی حرارتی بسیار متفاوت هستند قرار است به یکدیگر جوش داده شوند، دستورالعمل جوشکاری باید این مشکل را حل کند. اغلب منبع حرارت جوشکاری باید بیشتر به طرف فلز دارای رسانایی حرارتی بالاتر گرفته شود تا موازنه حرارتی برقرار شود. در این موارد بهتر است فلز با رسانایی حرارتی بالاتر

نرخ سرد شدن فلز جوش و منطقه تاثیر حرارت را کاهش می دهد.



## 2-4- انبساط حرارتی

خصوصیات انبساط حرارتی دو فلز پایه نامشابه و فلز جوش از ملاحظات مهم محسوب می شود. اگر تفاوت ضریب انبساط حرارتی زیاد باشد، حین سرد شدن جوش در یک فلز تنش کششی و در فلز دیگر تنش فشاری ایجاد می شود.

فلز در معرض تنش کششی ممکن است ضمن جوشکاری ترک گرم بخورد یا ممکن است در بهره برداری ترک سرد بخورد مگر آنکه تنش ها بطور حرارتی یا بطور مکانیکی آزاد شوند.

تفاوت یا ناهمخوانی ضرایب انبساط حرارتی بین فلزات نامشابه در یک اتصال فلزی نامشابه تولید تنش در اتصال می کنند.

این عامل به ویژه در اتصالاتی که در دماهای بالا بطور دوره ای کار می کنند، حائز اهمیت است (به عنوان مثال می توان اتصال لوله انتقال از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی به فولاد فریتی در نیروگاه های فسیلی را نام برد).

بطور ایده آل، ضریب انبساط حرارتی خطی فلز جوش باید بین ضرایب انبساط حرارتی خطی دو فلز پایه نامشابه باشد (به ویژه اگر اختلاف ضرایب دو فلز نامشابه زیاد باشد) اگر اختلاف ضرایب انبساط حرارتی دو فلز کم باشد، ضریب انبساط حرارتی فلز جوش ممکن است معادل ضریب انبساط حرارتی یکی از دو فلز نامشابه باشد. رقیق شدن فلز جوش رسوب داده شده ممکن است بر ضریب انبساط حرارتی تاثیر بگذارد. به عنوان مثال رقیق شدن نیکل خالص یا مس، ضریب انبساط حرارتی را افزایش می دهد، اما رقیق شدن با آهن، گرم یا مولیبدن موجب کاهش ضریب انبساط حرارتی می شود.



شکل ۳

## 2-5- عملیات پیش گرمایش و پس گرمایش

انتخاب مناسب پیش گرمایش یا عملیات حرارتی پس گرمایش برای اتصال جوش داده شده، ممکن است برای بعضی از فلز نامشابه مشکل ایجاد کند. اگر یک آلیاژ نیاز به پیش گرمایش دارد و آلیاژ دیگر نیاز به پیش گرمایش ندارد، پیش گرمایش به طرف مربوطه داده شود. الزامات عملیات حرارتی پس از جوشکاری برای اتصالات فلزی نامشابه ممکن است برای طراح چالش ایجاد کند. انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری که برای یکی از دو فلز نامشابه مناسب است، ممکن است برای فلز دیگر در سرویس مورد نظر زیان آور باشد. به عنوان مثال اگر یک آلیاژ کرم- نیکل پیرسختی پذیر به فولاد زنگ نزن آستنیتی پایدار نشده جوش داده شود، عملیات حرارتی پیرسازی که بخاطر آلیاژ کرم- نیکل انجام شود فولاد زنگ نزن آستنیتی را حساس می کند و مقاومت به خوردگی بین دانه ای آن را کاهش می دهد. در این مورد یک راه حل، استفاده از فولاد زنگ نزن آستنیتی پایدار شده است (اگر قابل قبول باشد). راه حل دیگر آن است که اول روی قطعه آلیاژ کرم- نیکل پیرسختی پذیر با یک آلیاژ مشابه که پیرسختی پذیر نباشد، آسترکاری (Buttering) شود و برای بدست آوردن خواص مطلوب عملیات حرارتی انجام گیرد. سرانجام رویه آسترکاری شده به قطعه فولاد زنگ نزن آستنیتی جوش داده می شود.



شکل ۴- جوشکاری پره ها به محفظه توربین

## 2-6- عوامل مورد ملاحظه

در طراحی اتصال فلزات نامشابه باید عوامل زیرمورد ملاحظه باشد:

- طرح اتصال و ضخامت فلزات،
- تفاوت دمای ذوب،
- ناهمخوانی انبساط- انقباض حرارتی حین جوشکاری و حین بهره برداری،
- اثرات گیره بندی و ممانعت تنش های جوشکاری،
- تشکیل ترکیب های بین فلزی شکننده حین جوشکاری که ممکن است موجب شکست شود،
- اثرات نرخ گرمایش و سردایش روی ریزساختار اتصال که ممکن است بر استحکام و کنترل دقیق حرارت ورودی تاثیر بگذارد،
- نیاز به پیش گرم کردن و پس گرم کردن به منظور به حداقل رسانیدن تنش ها حین جوشکاری و سرد کردن،

-نیاز به مواد با ترکیب انتقالی و یا مواد پرکننده ویژه حین جوشکاری،  
-احتمال خوردگی گالوانیکی حین بهره برداری.



شکل ۵- جوشکاری های فلزات نامشابه

## 2-7- چند نکته

-فلز جوش در اتصال فلزات نامشابه نباید فاز شکننده ایجاد کند. از اینرو در بعضی موارد از لایه های واسطه استفاده می شود.  
- مقاومت به خوردگی فلز جوش در اتصال فلزات نامشابه از مقاومت به خوردگی طرف ضعیف تر بیشتر نخواهد شد. غالباً در توصیه های جوشکاری فلزات نامشابه به استحکام مکانیکی اتصال توجه می شود. بنابراین جنبه های مقاومت به خوردگی باید قبلاً مورد توجه قرار گیرد.  
- برای اجتناب از بروز ترک های هیدروژنی در طرف فولاد، بیشتر از الکترودهای روکش قلیایی (کم هیدروژن) استفاده می شود.  
- در جوشکاری فلزات نامشابه باید هر فلز فراخور حال خود پیش گرم شود. دمای پیش گرمایش فولادهای کربنی و کم آلیاژ با توجه به معادل کربن و عوامل دیگر تعیین می شود.

جدول ۳- جوشکاری لوله کشی و تجهیزات تحت فشار - فلز پرکننده برای اتصال مواد فلزی نامشابه

شماره مواد پایه	نوع مواد پایه	شماره مواد پایه															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Carbon Steel	A	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
2	Carbon-molybdenum Steel		D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
3	3 1/2 % Nickel Steel			E	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
4	9% Nickel Steel				B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
5	AISI Type 410 S					B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
6	AISI Type 410						B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
7	AISI Type 304							G	G	H	H	H	H	H	H	H	H
8	AISI Type 304 L								K	H	H	H	H	H	H	H	H
9	AISI Type 321									H	H	H	H	H	H	H	H
10	AISI Type 347										H	H	H	H	H	H	H
11	AISI Type 316											L	L	C	N	B	B
12	AISI Type 316 L												M	C	N	B	B
13	AISI Type 309S													C	N	B	B
14	AISI Type 310														N	B	B
15	Incoloy 825															B	B
16	Incoloy 625																B

### طبقه بندی AWS مواد پرکننده : Filler Material AWS Classification :

- A- E-XX16 or E-XX18
- B- Inco-Weld A. Inconel 82 or Inconel 182
- C - E309 - 15 or E309 - 16
- D- E7018 - A<sup>1</sup>
- E- E80XX-C1
- A.5.11 :  
E Ni Cr Fe - 3 or E Ni Cr Mo - AWS بطور جایگزین یکی از طبقه بندی used.
- G- E308 - 15 or E308 - 16 با تصویب ... نیز استفاده می شود
- H- E347 - 15 or E 347 - 16
- J- فلز پرکننده و منطبق با طبقه بندی زیر استفاده شود
- AWS A 5.11 : E Ni Cr Fe - 3 or E Ni Cr Mo - 3
- K- E308L - 15 or E308L - 16
- L- E316 - 15 or E316-16
- M- E316L - 15 or E316L-16
- N- E310 - 15 or E310-16

جدول ۲- پیش گرمایش برحسب معادل کربن فولاد کربنی و کم آلیاژ

معادل کربن	دمای توصیه شده برای پیش گرمایش (درجه سانتی گراد)
کمتر از ۰/۴	کمتر از ۱۰۰
۰/۴ الی ۰/۶	۱۵۰ تا ۲۰۰
بیشتر از ۰/۶	۲۵۰ تا ۳۰۰

فرمول معادل کربن برای فولادهای کربنی و کم آلیاژ بدین شرح است:

$$C_{eC} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$$

داشته باشد. فولاد زنگ نزن آستنیتی نباید پیش گرم شود، زیرا پیش گرم کردن فولاد زنگ نزن آستنیتی احتمال ته نشینی کاربیدی در مرز دانه و تشکیل فاز زیگما را زیاد می کند. فاز زیگما، فاز شکننده و سخت است که شدیداً خطر ترک خوردن را افزایش می دهد. فولاد فریتی یا فریتی - مارتنزیتی ۱۳ درصد کرم از این قاعده مستثنی هستند و پیش گرمایش ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای این فولادها، خطر ترک خوردن را کاهش می دهد.

منابع

- Metals and Their Weldability, Dissimilar Metals
- Dissimilar Metal Weldability Concepts-Alber-Sadek.
- Dissimilar Ferrous Metal Welding using Advanced Gas Metal Arc Welding Processes -B. Mvola, P. Kah and J. Martikanen.
- Inspection of dissimilar Metal Welds in Reactor Pressure Vessels in Spain.- J.R. Gadea, J.J. Regidor,
- J.A. Pelaes, P. Serrano - Tecnomat, SA
- Dissimilar Materials Weldability Concepts.- Dr. Alber Salek.
- Mechanical and Microstructural Analysis or Dissimilar Metal Welds- Farzaen Shahid, Abid Ali Khan & M. Saqib Hameed.
- Dissimilar Materials Joining.- Richard Tenaglia.

پی نوشت

1-انجمن جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب ایران

3- اتصال فولاد زنگ نزن به فولاد کربنی

ترکیب فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی موجب تشکیل ساختارهای شکننده می شود. تشکیل ساختارهای شکننده به ترکیب شیمیایی فلز جوش بستگی دارد. ساختار شکننده مارتنزیت است که بطور کلی برای اجتناب از تشکیل ناحیه مارتنزیتی باید فلز جوش به سمت ناحیه کم خطرتر سوق داده شود. این کار با استفاده از فلز پرکننده با جنس متفاوت با هردو جنس متصل شونده انجام می شود. اگر از فلز پرکننده فولاد کربنی استفاده شود، در طرف فولاد زنگ نزن، ساختار میکروسکوپی مارتنزیتی در طرف فولاد کربنی تشکیل می شود. ساختار میکروسکوپی مارتنزیتی بطور زیادی موجب ترک خوردن می شود که غالباً مشاهده این ترک ها خیلی دشوار است.

در عوض فلز پرکننده صحیح باید از نوع فولاد زنگ نزن پرالیاژتر یا از نوع آلیاژهای پایه نیکل باشد تا فلز جوش قابلیت نرمی و انعطاف



## بکارگیری جوش میانی جهت افزایش استحکام اتصالات در ساختمان های اسکلت فلزی

مجید توحیدلو<sup>۱</sup>، فرزاد سلیمانی<sup>۲</sup>

### چکیده

یکی از بزرگترین چالشهای استحکام ساختمانهای اسکلت فولادی نحوه متصل کردن قسمتهای مختلف آن به یکدیگر است. در بناهایی که از جوش برای برقراری اتصالات استفاده می شود، درستی و دقت در نحوه انجام جوشکاری، بازرسی جوش و انجام آزمایشات مربوطه تاثیر مستقیمی بر استحکام و پایداری بنا و مقاومت آن در برابر زلزله و تنشهای خارجی دارد. با توجه به اینکه این مهم معمولا در جوشکاریهای کارگاهی در محل پروژه با دقت انجام نمی شود، بنابراین همواره ارایه روش و یا دستورالعملهایی برای بهبود کیفیت جوش های اتصالات اسکلت ساختمان مورد توجه بوده است. در این مقاله تاثیر استفاده از جوش میانی به دو شکل کام و انگشتانه در بعضی اتصالات اسکلت های فولادی بر افزایش مقاومت و استحکام آن و بالا بردن ضریب اطمینان مقاومت بنا در برابر تنشهای برشی و همچنین کاهش هزینه های ساخت و اجرا مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل محاسباتی اجرای روش فوق برای یک اتصال گیردار کله گاوی ارائه گردیده است.

**کلمات کلیدی:** جوش میانی، جوش کام، جوش انگشتانه، اسکلت فولادی.

### مقدمه

در ساختمان های اسکلت فلزی برای متصل کردن قسمتهای مختلف سازه مانند ستونها، تیرها، بادبندها، راه پله و غیره از سه روش جوشکاری قطعات، اتصال پیچ و مهره ای، و اتصال پرچی استفاده می شود. هر یک از سه روش فوق دارای مزایا و معایب مختص به خود می باشد و در برخی موارد تلفیقی از دو روش مورد استفاده قرار می گیرد. امروزه بیشتر از اتصالات پیچ و مهره ای در ساختمانهای چند طبقه استفاده می شود و اتصال قطعات با جوش، بیشتر در سازه های کوچک و کم ارتفاع بکار می رود. همین موضوع اغلب موجب این تلقی می گردد که اتصالات جوشی نسبت به اتصالات پیچ و مهره ای ذاتا از استحکام کمتری برخوردارند. در واقع این مطلب بطور کلی صحیح نیست و نقاط ضعفی که معمولا برای جوشکاری برشمرده می شوند اغلب بعلاوه نحوه اجرای ناصحیح جوشکاری، عدم انجام

آزمایش روی قطعات جوش داده شده و یا بازرسی ناکافی و کم دقت اتصالات جوشی می باشد و نه خصیصه های ذاتی جوش. گواه این مطلب اینکه حتی در سازه های پیچ و مهره ای، قطعات پیش ساخته سازه مانند ستونها، نشمین تیرها روی ستون، اتصالات فلنجی به ستون و ... همگی در کارخانه جوش داده می شوند و تنها اتصالات کارگاهی در محل اجرای بنا با استفاده از پیچ و مهره به هم مرتبط می گردند. لذا چنانچه اجرا و نظارت هر دو به درستی انجام پذیرد اتصالات جوش داده شده استحکام بیشتری نسبت به اتصالات پیچ و مهره ای دارند و با توجه به خواص متالورژیکی و مکانیکی ناحیه جوش، ایراد خاصی در رفتار اتصال جوشی نباید به وجود آید [۱]. مضافا اینکه هزینه های اجرای سازه های جوشی کمتر از سازه های پیچ و مهره ای است و چنانچه بتوان ایرادات ناشی از اجرا و بازرسی ناکارآمد را به نحوی جبران نمود، سازه های جوشی علاوه بر تامین

استحکام لازم، برتری های اقتصادی نیز به همراه خواهد داشت. در ساختمان های اسکلت فلزی غیر از مواردی که جوشکاری روی زمین یا در کارخانه به همراه بازرسی و آزمایش انجام شده باشد، بعضاً دستورالعملهای جوشکاری اتصالات و ضوابط طراحی ساختمانهای فولادی مورد سهل انگاری واقع می شوند و سایر قسمت های جوش داده شده در ارتفاع که در برخی موارد نیز بصورت جوش سربالا انجام شده مورد آزمایش و بازرسی دقیق قرار نمی گیرند و به همین دلیل از استحکام کمتری برخوردارند. به همین سبب در محاسبات طراحی سازه های جوشی، ضریب بازرسی جوش (B) برای جوشهای کارخانه ای همراه با آزمایش عدد یک، و برای جوشهای کارگاهی در ارتفاع ۰/۷۵ و گاهی ۰/۵ در نظر گرفته می شود [۲]. بررسی ساختمانهای تخریب شده در اثر زلزله های اخیر نشان می دهد که خسارات اساسی در سازه های فلزی جوشی پس از بریدن اتصال و به تبع آن افزایش فشار به سایر نقاط و از هم پاشی اسکلت پدید می آید. (شکل ۱).



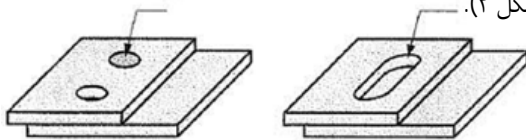
شکل ۱- نمونه هایی از باز شدن اتصالات جوشی در اثر زلزله [۳].

عوامل مختلفی در کاهش کیفیت جوشکاری کارگاهی تاثیرگذار هستند. استفاده از نیروی انسانی غیر مجرب از عوامل اصلی پایین آمدن کیفیت جوشکاری ساختمان است. گاه در فاصله بین پاس های متوالی جوش ————تی از جدا نمودن گل جوش کاری خودداری می شود. یکی از انواع جوشهایی که در ساختمان بسیار از آن استفاده می شود جوش سربالاست که به علت سختی اجرا و عدم تسلط جوشکار در آن موقعیت در غالب اوقات از کیفیت پایینی برخوردار است. همچنین در بسیاری از موارد در اثر تکنیکهای نامناسب جوشکاری نقایصی چون تابیدگی و پیچش در قطعات اتفاق می افتد. با توجه با مطالب فوق، ارایه طرح، روش و یا دستورالعملهایی که بتوانند هرچه بیشتر از ضعف ها و اشکالات اجرایی جوشکاری کاسته و بهبود کیفیت اتصالات را به همراه داشته باشند همواره مورد توجه و استقبال طراحان و مسئولین نظارت و اجرای پروژه های ساختمانی بوده است. در برخی طرحها برای افزایش ضریب اطمینان و استحکام

اتصالات جوشی به کارگیری المانهای تقویتی و کمکی مانند لچکی های تک یا دوتایی در اتصالات مفصلی و یا اتصالات گیردار توصیه شده و در اغلب این روشها مبنای کار "افزایش طول موثر جوش" و در نتیجه افزایش استحکام اتصالات جوشی است. یکی دیگر از روشهای افزایش استحکام استفاده از جوش کام (slot) و انگشتانه (plug) در بعضی اتصالات اسکلت های فلزی است که در این مقاله به تشریح بیشتر آن و ارایه نمونه ای عملی به همراه ذکر مزایای اقتصادی و فنی آن پرداخته شده است. جوش میانی در دو شکل کام و انگشتانه به عنوان جوش مکمل در سازه های فلزی می تواند علیرغم وجود مشکلات جوشکاری، ضریب اطمینان را بالا برده و استحکام اسکلت های فلزی جوشی را تا حدی ارتقا بخشد. البته استفاده از این نوع جوش در صنعت ساختمان موضوعی جدید نبوده و در مواردی که مقاومت جوش انجام شده در لبه ها (جوش شیاری و جوش گوشه) به حد کافی نرسیده باشد مورد استفاده قرار گرفته است. لیکن این کاربرد خیلی بندرت مورد توجه قرار گرفته و از آن به عنوان روشی استاندارد در طراحی اتصالات استفاده نمی شود. سعی ما در این مقاله بررسی این نوع جوش بعنوان روشی قابل استاندارد شدن در طراحی و اجرای برخی اتصالات سازه های فولادی خواهد بود. در ادامه این مقاله و در بخش دوم به معرفی اجمالی جوش میانی و مشخصه ها و الزامات اجرایی آن پرداخته ایم. بخش سوم مقاله به ارایه الگوی پیشنهادی در اتصالات مفصلی و اتصالات گیردار پرداخته و در ادامه به ارایه مثالی عملی در طراحی یک اتصال گیردار با استفاده از ورقهای بالاسری و زیرسری بهره مند از جوش میانی از نوع کام و مزیت های آن در کاهش هزینه های اقتصادی و افزایش استحکام اتصال و همچنین پایداری سازه در برابر زلزله پرداخته ایم.

### روش تحقیق و انجام کار

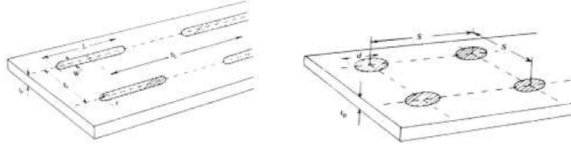
جوش میانی مشتمل بر دو گونه جوش کام و جوش انگشتانه روشی است که برای ایجاد اتصالات روی هم یا پوششی مورد استفاده قرار می گیرد. در جوش انگشتانه یک یا چند سوراخ یا حفره دایره ای شکل روی "صفحه بالایی" یا قطعه فلزی رویی ایجاد می شود و در جوش کام با زبانه این سوراخ ها جای خود را به یک یا چند شکاف تقریباً بیضوی شکل با ابتدا و انتهای دایره ای می دهند. این سوراخ ها و یا شکافها بطور کامل با فلز جوش (یعنی الکتروود جوش قوسی) پر می شوند و بدین سان قطعات مربوطه به هم متصل می گردند (شکل ۲).



شکل ۲- جوش کام و انگشتانه.

از این نوع جوش برای مقابله با نیروهای برشی و جلوگیری از خم شدن (کمانش) و یا پیچ خوردن و جدا شدن قطعات از استفاده می شود. این روش جوشکاری اگر به درستی انجام شود دارای

امتداد طولی مساوی ۲ برابر طول شکاف است (شکل ۳).



شکل ۳- فواصل بین سوراخها و شکاف ها در جوش انگشترانه و کام

یک حسن استفاده از جوش میانی این است که رواداری آن نسبت به سوراخهای پیچ دامنه وسیع تری دارد. در استفاده از پیچ، دو سوراخ باید روبروی هم باشند و تنها تا ۲ میلیمتر انحراف پذیرفته می‌گردد اما در مورد محل انجام جوش میانی، با توجه به نسبت میان عرض شکاف به ابعاد صفحه، جابجایی‌های به مراتب بیشتر نیز مشکلی در استحکام ایجاد نمی‌کند. مقدار تنش برشی سطحی ( $\tau_z$ ) و جانبی ( $\tau_o$ ) در جوش انگشترانه از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau_z = \frac{F}{A_{wb}} \quad \tau_o = \frac{F}{A_{wp}} \quad [MPa \cdot psi] \quad (1)$$

که در آن  $F$  نیروی برشی بر حسب نیوتن،  $A_{wb}$  مساحت پایه جوش و  $A_{wp}$  مساحت پیرامونی جوش بر حسب میلیمتر مربع می‌باشند و برای جوشهای انگشترانه و کام طبق روابط جدول (۱) محاسبه می‌شوند که در آن  $d$  عرض سوراخ یا قطر شکاف،  $L$  طول شکاف،  $S$  ضخامت قطعه، و  $n$  تعداد سوراخها یا شکافها هستند:

جدول ۱- مساحت پایه و پیرامونی جوش انگشترانه و کام

جوش کام	جوش انگشترانه	
$i \cdot [d \cdot (L - d) + \frac{\pi \cdot d^2}{4}]$	$\frac{i \cdot \pi \cdot d^2}{4}$	$A_{wb}$ مساحت پایه جوش
$i \cdot [2 \cdot (L - d) + \pi \cdot d] \cdot s$	$i \cdot \pi \cdot d \cdot s$	$A_{wp}$ مساحت پیرامونی جوش

### طرح و روش اجرا

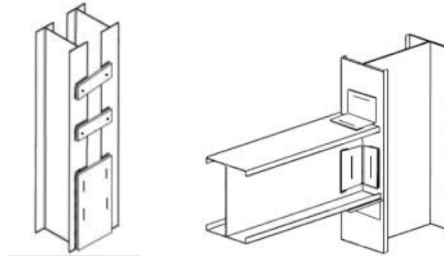
امروزه در صنعت ساختمان استفاده از جوش کام و انگشترانه به کمتر از پنج درصد محدود می‌شود و همیشه همراه با سایر جوشها به منظور افزایش استحکام، در مواقعی که مقاومت جوش انجام شده در لبه‌ها (جوش شیاری و جوش گوشه) به حد کافی نرسیده باشد استفاده می‌شود ولی هنگام طراحی اسکلت فولادی متاسفانه مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در این مقاله سعی شده است که استفاده از این جوش به عنوان روشی استاندارد در افزایش استحکام یک سری اتصالات مشخص در اسکلت‌های فلزی و افزایش ضریب بازرسی  $\beta$  معرفی گردد. در اسکلت‌های فولادی که بخشی از اتصالات به صورت جوش کارگاهی در محل اجرای ساختمان انجام می‌شوند، ضریب بازرسی چشمی  $0/5$  در نظر گرفته می‌شود. با تلقیق جوش میانی و جوش گوشه در اتصالات روی هم مانند اتصال نبشی‌های زیر سری و بالا سری، در اتصال‌های مفصلی تیر به ستون و یا وصله‌های ستون بصورت صفحه یا تسمه (شکل ۴) در عمل میزان طول جوش موثر در قطعه افزایش می‌یابد که در نتیجه آن استحکام قطعه جوش داده شده نیز زیاده‌تر خواهد شد. البته موقعیت مکانی سوراخ یا شکاف روی قطعه با توجه به نوع اتصال انتخاب شود تا عملکرد اتصال تحت تنشهای وارده تغییر نیابد. برای مثال در نبشی بالاسری اتصال مفصلی، شکاف باید به موازات جوش گوشه و نزدیک به آن اجرا شود

استحکام و دوام فوق‌العاده‌ای خواهد بود و به همین دلیل کاربردهای فراوانی در صنعت دارد. در صنعت هوافضا معمولاً از این نوع جوش برای تعمیرات بدنه‌های هواپیماها و یا سفینه‌های فضایی (بجای تعویض قطعه معیوب) استفاده می‌شود و همچنین در ساخت بدنه موشک‌ها نیز کاربرد دارد [۴]. در صنعت خودروسازی نیز از این جوش بجای جوش نقطه‌ای روی بدنه خودرو و در قسمتهایی که دسترسی به ورق پستی جهت قرارگیری الکتروود حامل جریان میسر نباشد استفاده می‌شود [۵]. همچنین می‌توان جهت تقویت بدنه نفربرهای زرهی سبک (نه تانک) در مقابل گلوله‌های سنگین یا ترکشهای احتمالی، در هر نقطه که لازم باشد ورق‌های را به عنوان ورق دوم روی بدنه نفربر متصل نمود. اینجا با تنشهای برشی، کششی، خمشی یا پیچشی سروکار نداریم و تنها نیروهای وارده به ورق، یکی وزن آن و دیگری نیروی لحظه‌ای ضربه‌ای، ناشی از اصابت ترکش یا گلوله است. با این احوال برای اتصال ورق پشتیبان به بدنه نیازی به جوش کامل دور تادور نیست، تنها جوش در نقاطی که ممکن باشد و وزن را تحمل نماید کافیسست و سپس برای تقویت اتصال می‌توان حسب ابعاد ورق در چند نقطه از جوش میانی هم بهره برد. الزامات ابعادی این جوش از این قرار است:

حداقل قطر سوراخ جوش انگشترانه نباید کمتر از ضخامت ورق نازکتر (در صورت اختلاف ضخامت دو ورق) بعلاوه ۸ میلیمتر باشد. حداکثر قطر سوراخ نیز مساوی حداقل قطر بعلاوه ۳ میلیمتر یا  $2/25$  برابر ضخامت ورق (هر کدام که بزرگتر باشد) خواهد بود (شکل ۳). طول شکاف جوش کام نباید بیش از ۱۰ برابر ضخامت ورق باشد که در آن ایجاد می‌شود. حداقل و حداکثر عرض شکاف نیز همانند قطر سوراخ جوش انگشترانه محاسبه می‌شود، البته با استفاده از روشهای تجربی و آزمایشگاهی مقدار بهینه برای عرض شکاف در جوش کام قابل دستیابی می‌باشد [۶]. انتهای شکاف باید به صورت نیم دایره و یا در صورت گوشه دار بودن دارای گردی با شعاع حداقل ضخامت ورق باشد. اندازه ضخامت جوش نیز تابعی از ضخامت قطعه کار می‌باشد. در صورتی که ضخامت ورق مساوی و یا کوچکتر از ۱۶ میلیمتر باشد تمام ضخامت سوراخ و یا شکاف باید با جوش پر شود. در صورتی که ضخامت ورق بزرگتر از ۱۶ میلیمتر باشد ضخامت جوش مساوی نصف ضخامت ورق و یا ۱۶ میلیمتر (هر کدام بزرگتر است) می‌باشد. برای حفظ کیفیت جوش، در صورت کمی قطر سوراخ یا عرض شکاف، باید با یک دور جوشکاری (اصطلاحاً یک پاس) کار به انجام رسد اما در صورت بزرگ بودن قطر یا عرض مربوطه و لاجرم توقف جوش، پیش از شروع مجدد باید تمام سرباره برداشته شود و سپس پاس بعدی جوشکاری تا تامین ضخامت مورد نیاز انجام شود.

محل ایجاد سوراخ یا شکاف بر روی قطعه بالایی و همینطور فاصله‌های عرضی و طولی بین سوراخها یا شکافها در جوش انگشترانه و کام تابع الزامات خاصی است. فاصله مرکز سوراخها در جوش انگشترانه از لبه صفحه یک سوم فاصله مراکز سوراخها از یکدیگر است و حداقل فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌های جوش انگشترانه ۴ برابر قطر سوراخ می‌باشد. در جوش کام حداقل فاصله محور به محور شکافها در امتداد عرضی ۴ برابر عرض شکاف و حداقل فاصله مرکز به مرکز شکافها در

تا عملکرد مفصلی اتصال تحت تنش دستخوش تغییر نشود.



شکل ۴- استفاده از جوش کام و انگشتانه برای تقویت اتصالات مفصلی و وصله ستون

مشخصات داده شده در جدول (۲) را در نظر می‌گیریم.

جدول ۲- مشخصات اتصال کله گاوی

ابعاد مقطع ستون باکس شکل	۳۵ × ۳۵ × ۲/۵ cm
عرض بال تیر	$b_{fb} = ۲۲$ cm
ضخامت بال تیر	$t_{fb} = ۱/۲$ cm
ضخامت جان تیر	$t_{wb} = ۱$ cm
عمق جان تیر	$d_b = ۳۰$ cm
فاصله اکس به اکس ستون های دو طرف تیر	۵/۱۲ cm
بار مرده وارده بر تیر	۵۱۰ kg/cm <sup>2</sup>
بار زنده وارده بر تیر	۳۱۵ kg/cm <sup>2</sup>

برای محاسبه ابعاد ورقهای بالاسری، زیرسری، و ورق جان برای اتصال مورد نظر در روش عادی، بدون استفاده از جوش کام، در گام اول به محاسبه لنگر پلاستیک مقطع تیر ( $M_p$ ) که از حاصلضرب اساس مقطع پلاستیک تیر ( $Z$ ) و تنش تسلیم فولاد استفاده شده در تیر ( $F_y$ ) بدست می‌آید پرداخته و سپس در گامهای بعدی به محاسبه پارامترهای زیر مطابق با فرمولهای ذکر شده مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۳] اقدام می‌کنیم:

- لنگر ایجاد شده در محل تشکیل مفصل پلاستیک ( $M_{pb}$ )  
- ظرفیت مورد نیاز خمشی برای طراحی ورق های بالاسری و زیر سری ( $M_u$ )

- تبدیل لنگر خمشی  $M_u$  به نیروی محوری وارده بر ورق های بالاسری و زیر سری و طراحی آن ها ( $F_u$ )

عرض ورق بالاسری ( $b_1$ ) در قسمت عریض که به بال ستون متصل می‌شود باید حدود ۳ تا ۵ سانتی متر کمتر از عرض بال ستون اختیار شود. دلیل آن راحتی در اجرای جوش با بال ستون می‌باشد. همچنین قسمت عریض تر باید دارای عرضی بیشتر از عرض بال تیر باشد. در قسمت کم عرض ( $b_2$ )، عرض ورق روسری باید حدود ۳ تا ۵ سانتی متر از عرض بال تیر کمتر باشد. دلیل این امر هم مثل قبل اجرای راحت تر جوش ورق به بال تیر می‌باشد. با در دست داشتن سطح مقطع کلی عضو ( $A_g$ )، سطح مقطع خالص موثر عضو ( $A_e$ )، تنش تسلیم فولاد ( $F_y$ )، تنش کششی نهایی فولاد ( $F_u$ )، مقاومت کششی اسمی عضو ( $P_n$ )، و با فرض مقدار  $b_1$  با توجه به محدودیت های آیین نامه، می‌توانیم با استفاده از روابط زیر عرض و ضخامت ورق روسری را محاسبه کنیم:

$$F_u = P_u = \frac{M_u}{d + 2t_{fb}} < \phi_t P_n = \phi_t F_y A_g = \phi_t F_y b_2 t_{tp} \quad (2)$$

$$b_2 = \beta b_1 \quad (3)$$

$$t_{tp} > \frac{M_u}{(d + 2t_{fb})(\beta \phi_t F_y b_1)} \quad (4)$$

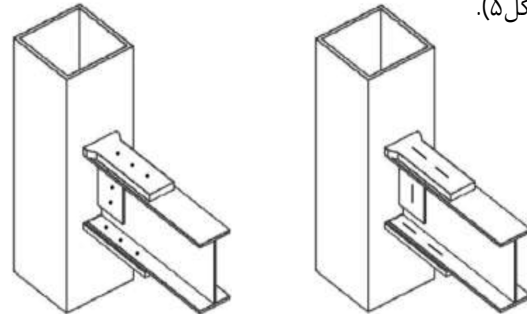
$$\beta = 0.75 \quad \phi_t = 0.75 \quad (5)$$

برای محاسبه طول ورق روسری و زیرسری باید طول جوش کافی ( $L_w$ ) برای تحمل و انتقال نیروی محوری ( $F_u$ ) ناشی از لنگر خمشی انتهای تیر را طبق رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$L_w > \frac{F_u}{0.286 F_{ue} a} \quad (6)$$

که در آن  $F_{ue}$  مقاومت نهایی کششی فلز الکتروود  $a$  بعد جوش است

کاربرد دیگر این نوع جوش در صفحات تقویتی ستونها و یا وصله های ستون می‌باشد که علاوه بر افزایش استحکام جوش، مانع از کمانش ستون تحت نیروهای فشاری می‌شود. همچنین استفاده از این نوع جوش برای تقویت اتصالات صفحه های روسری و زیر سری و صفحه جان در اتصالات گیردار کله گاوی ضمن افزایش استحکام منجر به کاهش ضخامت و ابعاد ورقهای مذکور و در نتیجه کاهش هزینه های ساخت، سبکتر شدن اسکلت و همچنین کم شدن فاصله موضعی تشکیل مفصل پلاستیک در اتصالات مذکور خواهد شد که این موضوع در پایداری اسکلت های فلزی در برابر تنشهای ناشی از زلزله در قابهای خمشی متوسط دارای اهمیت ویژه ای می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- استفاده از جوش کام و انگشتانه در اتصال گیر دار کله گاوی

برای این موضوع، شکافهایی (سوراخهایی) در میانه ورق روسری و ورق جان و همچنین بال پایینی تیر که روی ورق زیر سری قرار می‌گیرد ایجاد شده (با رعایت فواصل مطابق با الزامات جوش میانی) و هنگام نصب علاوه بر جوش های گوشه ای معمول، این شکافها نیز جوش داده می‌شوند و بدین طریق طول موثر جوش افزایش یافته و از افزایش طول و ضخامت این ورقها برای تامین طول جوش مورد نیاز اجتناب می‌شود. برای روشن تر شدن مطلب در بخش بعدی به ارایه یک مثال عملی و آنالیز آن می‌پردازیم.

## نتایج و بحث

یک اتصال گیردار کله گاوی با استفاده از صفحات زیرسری، بالاسری، و جان بین یک ستون مکعبی ساخته شده از ورق و یک تیر I شکل با

و طبق جدول مبحث دهم مقررات ملی ساختمان بدست می آید. در ادامه طول ورق روسری اتصال کله گاوی از معادله زیر محاسبه می شود:

$$L_{tp} = 2.5 + \frac{b_1 - b_2}{2 \tan \alpha} \quad (7)$$

طول ورق زیر سری و ابعاد آن به همین روش بدست می آید. محاسبه ابعاد ورق جان نیز از روشی مشابه مراحل فوق بدست می آید که در اینجا جهت اختصار از ذکر مراحل آن اجتناب کرده و خواننده را برای توضیحات بیشتر به مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ارجاع می دهیم.

برای مثال مطرح شده پس از طی مراحل فوق، ابعاد مورد نیاز ورقهای روسری، زیر سری و جان مطابق جدول زیر بدست می آیند.

جدول ۳- ابعاد ورقهای مورد نیاز برای اتصال کله گاوی با مشخصات جدول (۱) بدون جوش کام

اجزا اتصال	عرض (cm)		طول (cm)	ضخامت (cm)
	قسمت کم عرض	قسمت عریض		
ورق روسری	۱۹	۳۰	۸۰	۴
ورق زیرسری	۳۰		۶۸/۵	۳
نیسی جان	۱۰		۱۶	۲/۲

حال محاسبات فوق را برای همان اتصال ولی اینبار با در نظر گرفتن جوشهای کام مطابق شکل انجام می دهیم. در این محاسبات یک شکاف با طولی برابر ربع طول موثر جوشهای گوشه در هریک از ورقهای روسری، زیرسری، و ورق جان در نظر گرفته ایم. نتیجه محاسبات به قرار جدول (۴) می باشد.

جدول ۴- ابعاد ورقهای مورد نیاز برای اتصال کله گاوی با مشخصات جدول (۱) با جوش کام

اجزا اتصال	عرض (cm)		طول (cm)	ضخامت (cm)
	قسمت کم عرض	قسمت عریض		
ورق روسری	۱۹	۳۰	۶۰	۳
ورق زیرسری	۳۰		۵۲/۵	۲/۵
نیسی جان	۱۰		۱۴	۲/۲

با مقایسه این دو جدول مشاهده می شود که استفاده از تنها یک خط جوش کام بطول یک چهارم مجموع طول جوشهای گوشه معمول در صفحه بالاسری و ۲ خط جوش در طرفین بال تیر یا طول مجموع ربع طول جوشهای گوشه در ورق زیر سری، ضمن حفظ استحکام، کاهش قابل ملاحظه هم در قطر و هم در طول صفحات بالاسری و زیرسری اتصال کله گاوی حاصل می آید که هم از نظر اقتصادی به صرفه تر و هم در سبکتر شدن اسکلت موثر می باشد. علاوه بر آن، به علت کوتاه شدن طول ورقهای بالاسری و زیرسری، فاصله محل تشکیل مفصل پلاستیک تا ستون نیز کاهش می یابد که این موضوع در پایداری سازه در هنگام زلزله اهمیت ویژه ای دارد.

## نتیجه گیری و جمع بندی

از آنجا که هدف این مقاله تنها معرفی الگویی برای جوش میانی و

پیشنهاد استفاده از آن بوده، در این سطح از آزمایشات مربوط به حوزه متالورژی مکانیکی همچون آزمایش کشش و سختی سنجی استفاده نشده اما در صورت لزوم جهت پشتیبانی بیشتر، الگوی پیشنهادی در مقاله می تواند با این آزمایشات نیز تایید گردد. گرچه باید در نظر داشت چون این قبیل آزمایشات از مقطعی به مقطع دیگر تفاوت می کند باید در صورت اجرا، آنها را در مقیاس واقعی به انجام رساند و گرنه آزمایش روی نمونه های کوچک و سپس عددسازی آن برای مدلهای واقعی، نتایج گمراه کننده ای به بار خواهد آورد.

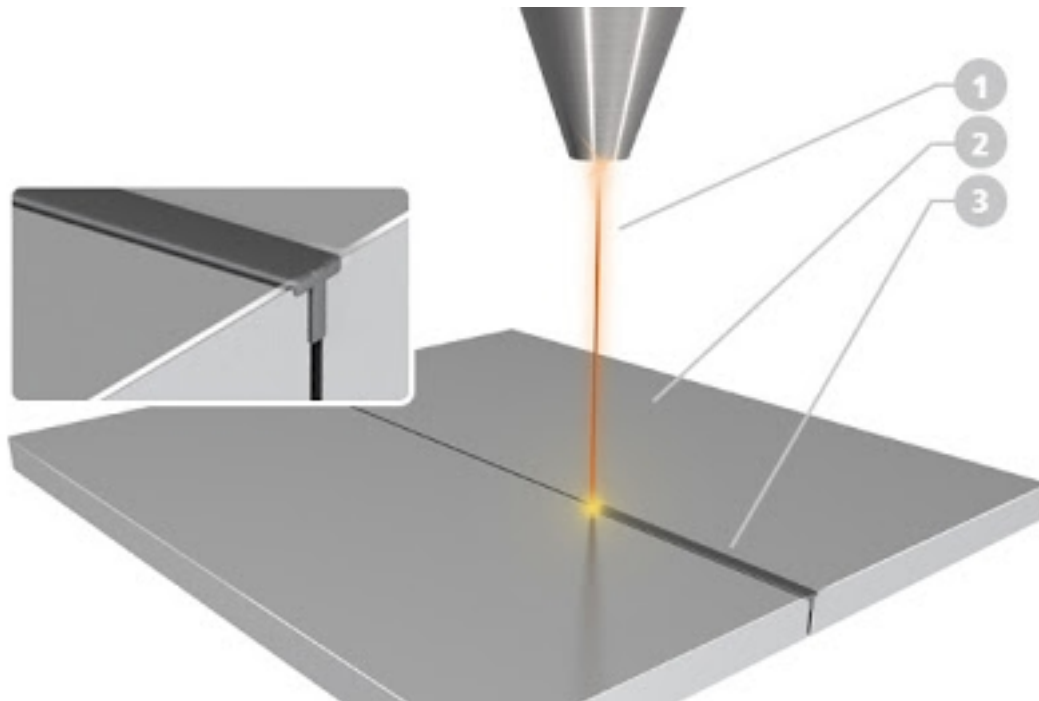
در این مقاله به بررسی استفاده از جوش میانی به دو صورت انگشترانه و کام در ساختمانهای اسکلت فولادی به عنوان روشی برای افزایش استحکام جوش های کارگاهی در اینگونه سازه ها پرداخته و ضمن برشمردن خصوصیات و الزامات این نوع جوش، قابلیت ها و تاثیر آن در ارتقای بعضی اتصالات مشخص در سازه های فولادی مورد بحث قرار گرفت. ارایه یک مثال کاربردی به همراه تحلیل عملکردی و محاسبات طراحی ابعاد ورق های مورد نیاز در یک اتصال گیردار کله گاوی با استفاده از جوش کام نشان داد که این روش ضمن افزایش استحکام اتصال مذکور و مقاومت در برابر زلزله، باعث کاهش هزینه های ساخت سازه نیز خواهد شد. لذا می توان با بررسی و تحقیق بیشتر و تدوین شیوه نامه های دقیق، این روش را به عنوان روشی استاندارد در اجرای سازه های فولادی جوشی بکار گرفت.

## منابع

- 1- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، آیین نامه جوشکاری ساختمانی ایران.
- 2- وزارت مسکن و شهرسازی، راهنمای جوش و اتصالات جوشی در ساختمانهای فولادی.
- 3- فولاد/فرایندهای جوشکاری، عیوب جوش و بازرسی/ <http://ppt90.ir/powepoint-projects/>
- 4-P.F. Mendez, and T.W. Eagar, " Welding Processes for Aeronautics" Advanced Materials and Processes Journal, May 2001.
- 5-T. Saeheaw, "Regression Modeling and Process Analysis of Plug and Spot Welds Used in Automotive Body Panel Assembly", IJE TRANSACTIONS B: Applications, Vol. 33, No. 11, November 2020, 2384-2398.
- 6-E. A. Martin and F. R. Rutz, "Optimum Slot Weld Width for Cold-Formed Steel", International specialty conference on cold-formed steel, structures, Nov 2018.
- 7-M. Stary, F. Novotny, M. Horka, M. Star, and Z. Vt." Experimental optimization of tab and slot plug welding method suitable for unique lightweight frame structures" Journal of Manufacturing Processes, No. 31, 2018, pp. 453-467.
- 8- وزارت مسکن و شهرسازی، مقررات ملی ساختمان، مبحث دهم.

## پی نوشت

- 1- دانشجوی دوره کارشناسی مهندسی متالورژی
- 2- دکتری مهندسی متالورژی



## بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG ۴۰۰ به نایمونیک ۷۵

رامین مهدی زاده<sup>۱</sup>، سید علی اصغر اکبری موسوی<sup>۲</sup>، سعید مهدی پور<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، جوشکاری غیرهمجنس ابرآلیاژ نایمونیک ۷۵ به مونل ۴۰۰ با ضخامت ۱ میلیمتر به روش جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG مورد پژوهش قرار گرفت. با آزمون‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس، میکروسختی سنجی و آزمون کشش خواص مکانیکی اتصال بررسی شد. در مورد جوشکاری غیرهمجنس ابر آلیاژ نایمونیک ۷۵ به مونل ۴۰۰ عیوبی مانند ترک ذوبی و تخلخل در نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده شد که با افزایش دمای پیشگرم و کاهش حرارت ورودی این عیوب رفع شدند. نتایج نشان داد، برای رسیدن به عمق نفوذ مناسب، ولتاژ، پهنای زمانی ضربان، بسامد ضربان و سرعت جوشکاری به ترتیب ۵۰۰ ولت، ۹ میلی ثانیه، ۳ هرتز و ۰٫۹ میلیمتر بر ثانیه انتخاب شود. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ساختار حاصل از جوشکاری، از زمینه آستنیتی حاوی دندریت‌های ستونی و در برخی مناطق سلولی تشکیل شده است. خصوصیات مکانیکی فلز جوش، پس از اتصال کاهش یافته و جدایش موجب تغییر در مقدار عناصر و پیدایش ترکیبات بین فلزی در فواصل بین دندریت‌ها و سلول‌ها می‌گردد. همه نمونه‌های غیرهمجنس در آزمون کشش از ناحیه فلز جوش دچار شکست گردیدند.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری غیرهمجنس لیزر ضربانی، ابرآلیاژ نایمونیک ۷۵، مونل ۴۰۰، دندریت‌های ستونی و هم محور.

### مقدمه

رسوبی استفاده می‌شود. این آلیاژها شامل افزودنی‌های آلیاژی مانند تیتانیوم، آلومینیوم و نایوبیوم جهت تشکیل رسوب‌های استحکام دهنده با نیکل بعد از انجام عملیات حرارتی هستند. قابلیت آلیاژهای استحکام یافته با رسوب‌ها، برای حفظ استحکام در دماهای بالا می‌تواند با تغییرات در ساختار بوسیله عملیات حرارتی همراه با تغییر در ترکیب شیمیایی تأمین شود. در بیشتر موارد، رسوب‌های مورد نظر، با زمینه هم‌سیما هستند و سبب افزایش استحکام زمینه می‌شوند. مهم‌ترین رسوب‌های موجود در ساختار آلیاژهای رسوب سخت شده، رسوب‌های  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) و  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) هستند. با بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی، این آلیاژها می‌توانند دارای استحکامی تا میزان ۱۳۸۰ مگاپاسکال و

ابر آلیاژهای پایه نیکل بدلیل کاربردهای بسیار زیاد، یکی از مهم‌ترین خانواده‌های فلزات در طبقه بندی مواد مهندسی دمای بالا هستند. ابر آلیاژهای پایه نیکل بطور کلی به ۳ دسته تقسیم بندی می‌شوند: آلیاژهای محلول جامد، آلیاژهای رسوب سخت شده و آلیاژهای خاص مانند بین فلزی Ni-Al و استحکام یافته با ذرات اکسید. آلیاژهای محلول جامد دارای دامنه وسیعی از عناصر آلیاژی محلول در نیکل مانند  $\text{Co}$ ،  $\text{Mo}$ ،  $\text{Fe}$ ،  $\text{Cr}$  هستند. این آلیاژها بر حسب میزان و نوع عناصر آلیاژی محلول دارای کاربردهای مختلفی مانند مقاومت به خوردگی در آب دریا و یا کاربردهای الکتریکی هستند. در کاربردهای نیازمند استحکام بالاتر، از آلیاژهای استحکام یافته

تسلیم بیش از ۱۰۳۵ مگاپاسکال باشند [۲-۱].

استین و همکاران در پژوهشی به بررسی متغیرهای جوشکاری لیزر ضربانی **Nd:YAG** و لیزر پیوسته پرداختند. متغیرهای لیزر ضربانی شامل انرژی ضربان (**Ep**)، مدت ضربان (**tp**)، اندازه نقطه لیزر (**b**) و سرعت جوش (**v**) می باشند. چگالی توان پرتو لیزر ضربانی باعث می شود ذوب و انجماد به صورت متوالی اتفاق افتد و زمان انجماد کوتاه تر از لیزر پیوسته باشد [۲]. کیم و همکاران جوشکاری موفق لوله ای از جنس **Inconel 600** را گزارش کرده اند [۳].

جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و فولاد زنگ نزن مارتنیتی ۴۲۰ با استفاده از لیزر ضربانی **Nd:YAG** توسط برتا و همکاران مورد مطالعه قرار دادند [۴]. بینگ و مولیان از سامانه لیزری **Nd:YAG** ضربانی برای جوشکاری فولاد زنگ نزن **AISI 304** استفاده کردند. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که امکان جوشکاری موفق این آلیاژ از نظر ریزساختاری و مکانیکی، با کنترل دقیق انرژی ضربان لیزر امکان پذیر است [۵]. ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری مونل ۴۰۰ با لیزر ضربانی **Nd:YAG** در انرژی ضربان های متفاوت توسط کومار و همکاران مطالعه شد و نتایج پژوهش نشان داد که عرض و مورفولوژی جوش ایجاد شده با شبیه سازی عددی به خوبی مطابقت دارد و دمای بیشینه و ابعاد **HAZ** با افزایش انرژی ضربان افزایش می یابد و دانه های درشت تر در انرژی ضربان پایین و بالاتر بوجود آمده اند [۶].

در تحقیقی توسط ونترلا و همکاران از لیزر ضربانی **Nd:YAG** برای اتصال فویل نازک ۴۰۰ میکرومتری **Monel 400** استفاده شد. با افزایش انرژی ضربان، عرض منطقه جوش افزایش می یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که گسیختگی همه نمونه ها در ناحیه فلز پایه، در کنار خط همجوشی رخ می دهد. استحکام کششی نهایی (**UTS**) ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش انرژی ضربان (**Ep**) کاهش می یابد. حداکثر مقدار **UTS**، با انرژی ضربان ۱/۵ ژول به دست آمده است و برابر ۹۴ درصد فلز پایه می باشد [۷]. راماکریشنان و همکاران تعامل قطر لیزر و توان در جوشکاری لیزر **Nd:YAG** ضربانی مونل ۴۰۰ و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ را بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که سهم توان در مقایسه با قطر لیزر بسیار کم است. افزایش قطر لیزر منجر به کاهش سختی می گردد. ضمناً، توان و بسامد، کم و بیش دارای سهم مساوی در افزایش سختی منطقه جوش دارند [۸].

در تحقیق دیگر، یک رابطه تجربی برای پیش بینی مقاومت کششی جوشکاری لیزر **Nd:YAG** ضربانی ورق های آلیاژی **Hastelloy C-276-Monel 400** توسط کومار و همکاران به دست آمده است. متغیرهای سرعت جوشکاری، ضربان، انرژی و مدت زمان ضربان در سه سطح انتخاب شده اند و حالت بهینه مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج تجزیه واریانس (**ANOVA**) نشان می دهد که سرعت جوشکاری بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی دارد و پس از آن انرژی ضربان و مدت زمان ضربان قرار دارد [۹]. تا به امروز، چند تحقیق بر روی روش های جوشکاری ابرآلیاژهای نیکل تمرکز کرده اند. می و همکاران جوشکاری ابرآلیاژ ۷۱۸ با پرتو الکترونی را بررسی نمودند و ترک خوردگی در ناحیه جوش را گزارش داده اند. آنها بیان نموده اند که استحکام جوش بستگی به اندازه دانه و سرعت

جوشکاری دارد [۱۰]. اونو و همکاران به بررسی خستگی چرخه بالا قطعه جوشکاری ابرآلیاژ ۷۱۸ با پرتو الکترونی پرداخته اند [۱۱]. شکل و همکاران در پژوهشی جوشکاری پرتو الکترونی غیرهم جنس آلیاژهای **Inconel 625** و آلیاژ **SS 304L** را از منظر ریزساختاری و ریزسختی سنجی مطالعه نموده اند [۱۱]. ریزساختار، خواص مکانیکی و ریزسختی جوشکاری ورق از جنس نایمونیک با پرتو الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، بررسی ریزساختار اتصال نشان می دهد که منطقه جوش عمدتاً از دندربیت ستونی تشکیل شده است و حالت های انجماد را می توان با توجه به میزان سرمایه گذاری تغییر داد. علاوه بر این، رسوبات کمی وجود دارد و کاربیدهای **MC** در ناحیه جوش مشاهده می شوند. نتایج پراش پرتو ایکس نشان می دهد که ساختار فلز جوش پس از جوشکاری پرتو الکترونی تغییر نکرده است. علاوه بر این، نشان می دهد که منطقه جوش و فلز پایه تفاوت آشکاری در خصوصیات مرزدانه ها و جهت گیری نادرست هسته دارند. بنابراین سختی، استحکام و مقاومت به خستگی اتصال جوش داده شده کمتر از فلز پایه است [۱۲]. در ارتباط با کاهش تنش های حرارتی در مقاله ای که در سال ۲۰۰۹ میلادی توسط چیانگ ارائه شده است، جوشکاری لیزر همراه با پیش گرم موضعی جلو جوش تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد با روش پیش گرم القایی و استفاده از پودر **NI-284-10** که دارای ترکیب شیمیایی مشابه آلیاژ نایمونیک ۹۰ است، بطور پاشش هم محور با لیزر پیوسته **CO<sub>2</sub>** انجام شد. پس از جوشکاری عملیات پیرسازی دوباره بر روی آلیاژ نایمونیک ۹۰ انجام شده است. در این تحقیق ترک ذوبی در منطقه متأثر از حرارت مشاهده نشده است. طول جوش به این روش محدود به ۷ سانتی متر بوده و حفرات و آخال از جمله عیوب این روش است و همچنین ممکن است با افزایش طول جوشکاری ترک در منطقه جوش و **HAZ** پدید بیاید. نتایج بیانگر این امر است که اگر چه میزان ذوب شدگی مرزدانه زیاد است، ولی به علت کاهش تنش وارده در جوشکاری، ترک ذوبی در **HAZ** مشاهده نشد [۱۳].

مواد و روش پژوهش با توجه به کوچک بودن قطعات مورد جوشکاری و ظریف بودن اتصال، روش جوشکاری پرتو لیزر مناسب است. برای جوشکاری لیزر از دستگاه **Nd:YAG** میکرو لیزر ضربانی مدل **SW 1** با توان متوسط ۹۰ وات استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژهای نایمونیک ۷۵ و مونل ۴۰۰ که با آزمون طیف سنجی نشر نوری تعیین شده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در پژوهش

آلیاژ	Ni	Cr	Cu	Mn	C	Ti	Al	Fe	Si	S
نایمونیک ۷۵	بقیه	۲۰/۵۴	۰/۵	۱	۰/۱۲	۰/۵	-	۵	۰/۹	-
مونل ۴۰۰	بقیه	-	۳۱	۱/۸۴	۰/۳	-	-	۲/۵	۰/۵	۰/۰۲۴

برای انجام آزمایش های جوشکاری، نمونه های آنیل انحلالی ورق به ضخامت ۱ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. قبل از جوشکاری، آماده سازی های سطحی برای افزایش جذب پرتو لیزر روی

نمونه‌ها انجام نشد. بعد از برشکاری، سمباده زنی سطحی جهت رفع آلودگی‌های اکسیدی و شستشوی نمونه‌ها با استون در حمام التراسونیک، انجام شده و سپس نمونه‌ها جوشکاری شدند. پیش از انجام جوشکاری هر یک از نمونه‌ها بصورت یکنواخت با استفاده از المنت حرارتی در دماهای مختلف طبق جدول ۲ پیش گرم شده‌اند. دمای پیش گرم بوسیله ترموکوپل با دقت  $\pm 5^\circ\text{C}$  اندازه‌گیری شده است.

### جوشکاری نمونه‌ها

با توجه به تعداد بسیار زیاد متغیرهای جوشکاری لیزر، در ابتدا مجموعه‌ای از آزمون‌ها جهت دستیابی به نمایه جوش قابل قبول و حاوی حداقل عیوب انجام شد و محدوده بهینه متغیرهای جوشکاری لیزر تعیین گردید که مقادیر آن در جدول آورده شده است. انتخاب صحیح مقدار متغیرهای جوشکاری لیزر از جمله عواملی است که بر رفتار جوش لیزر تأثیر مستقیم دارد. در این پژوهش تلاش شده است، بررسی‌های دقیقی بر تأثیر متغیرهای پهنای زمانی ضربانی و بسامد جوشکاری لیزر بر ریزساختار و عیوب جوش انجام شود. هدف از مطالعه دست‌یابی به جوش‌کاری از هر گونه عیوب در ساختار است. در جدول ۲ متغیر بهینه به رنگ قرمز نشان داده شده است.

### مشخصه‌یابی نمونه‌های جوش

نمونه‌ها پس از انجام جوشکاری در راستای مقطع عرضی جوش، برش داده شده و در حالت جهت سنباده زنی قرار داده شد. جهت سمباده زنی از برکه‌های شماره ۶۰ تا ۳۰۰ استفاده گردید. بعد از سنباده زنی، برای صیقل کاری نمونه‌ها از پودر آلومینا  $0.5/\mu\text{m}$  میکرون استفاده شد. برای حکاکی نمونه‌ها از محلول سوپر کالینگ (supper Kaling) استفاده گردید. میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به کار گرفته شد. همچنین برای بررسی ترکیب شیمیایی حوضچه جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت و عناصر و فازهای موجود در این دو ناحیه از آنالیز شیمیایی EDS استفاده شد. جهت آگاهی از سختی جوش نمونه‌ها و بررسی خواص جوشکاری با متغیرهای مختلف و با توجه به کوچک بودن منطقه جوش مورد مطالعه از ریز سختی سنجی استفاده شد. ریز سختی موضع جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت با دستگاه ریز سختی ویکرز با بار ۱۰۰ گرم به انجام رسید. ریز سختی سنجی در جهت عمود بر سطح مقطع عرضی جوش نیز انجام شد و در نهایت میانگین نتایج به دست آمده گزارش شد. پس از انجام جوشکاری آماده‌سازی نمونه کَشش شامل برش با ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام گرفت، زیرا به دلیل ضخامت بسیار کم، ماشین کاری و یا پانچ نمونه می‌تواند منجر به خم شدن آن و یا ایجاد تمرکز تنش در نمونه شود. ابعاد نمونه کَشش نیز بر اساس استاندارد ASTM-E8 انجام شد.

### نتایج و بحث

از جمله مهم‌ترین اقدام در مطالعه جوش پذیری یک ماده، مطالعه خواص مکانیکی، فیزیکی و ریزساختار فلز پایه است، به دلیل اینکه این موضوع اثر بسزایی در خواص و ساختار جوش به دست آمده

خواهد داشت. حضور عناصر کاربیدزای قوی مانند تیتانیوم، وجود کاربیدها مخصوصاً کاربید تیتانیوم (TiC) و کاربید کروم ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) در ناحیه جوش امری بدیهی است. شمایل میکروسکوپ گسیل میدانی و نوری و همچنین آزمون EDS خطی به ترتیب در شکل ۱ آورده شده است. ساختار درون دانه‌ها در مرز ناحیه جوش از دندریت‌های ستونی تشکیل شده است که به طرف درون ناحیه جوش کشیده شده‌اند. اما این ریزساختار درون دانه‌های با حرکت به طرف مرکز خط جوش تغییر می‌کند. در مرکز خط جوش داخل هر دانه مجموعه‌ای از دندریت‌های هم جهت مشاهده می‌شود. دندریت‌های تشکیل شده بسته به جهت مرجح در جهات مختلف جوانه زده و رشد می‌کنند.

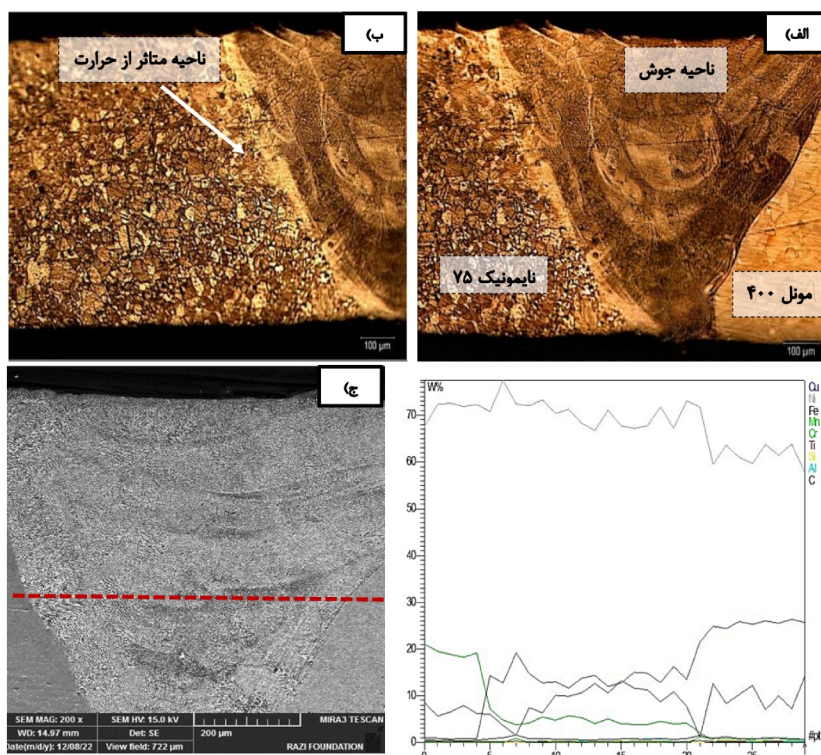
با توجه به خصوصیات ریزساختاری و تجزیه و تحلیل تصاویر با SEM حضور فازهای ثانویه در ریزساختار داخل فلز جوش مشاهده گردید. این فازها معمولاً در امتداد مرزهای انجمادی قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این رسوب نشانگر یک ساختار پیوسته است که به صورت شکل کشیده در مرزها دیده می‌شود. مورفولوژی فاز تشکیل شده در این نواحی به میزان حرارت ورودی و نرخ سرمایش حوضچه جوش بستگی دارد. تجزیه شیمیایی عنصری خطی از این فازهای نشانگر غلظت بالا عنصر تیتانیوم است. همچنین عناصر کروم و نیکل در داخل رسوب کاهش یافته و به اطراف پس زده شده است. از نظر شکل ظاهری، این رسوبات به صورت پیوسته که در امتداد مرز انجمادی بین دانه‌ها گسترش یافته است منجمد شده‌اند. کربن به دلیل اینکه یک اتم محلول بین نشین است دارای انرژی فعالسازی نفوذ بسیار کمتری در مقایسه با آهن و کروم است. علاوه بر این مشاهده شده است که ضریب جدایش کربن در آلیاژهای نیکل بسیار کمتر از آهن و کروم و در حدود  $0.2$  است. در نتیجه انتظار می‌رود که حتی با وجود نفوذ اتم بین نشین کربن به درون دندریتها پس از انجماد (نفوذ بازگشتی)، در مقایسه با دیگر عناصر با شدت بیشتری دچار جدایش شود. در حقیقت مشاهده شده است که کربن در آلیاژهای نیکل دارای بیشترین حد جدایش است. لذا مشاهده ترکیبات کاربیدی در مرز دندریتها پس از انجماد آلیاژ جوش داده شده امری عادی است.

### عیوب جوشکاری

انبساط حرارتی ابرآلیاژها همانند فولاد کربنی است ولی هدایت حرارتی ابرآلیاژها بسیار کمتر از فولاد کربنی است و حرارت جوشکاری در فلز اطراف جوش حین جوشکاری ابرآلیاژها، سریع پخش نمی‌شود. آلیاژهای نیکل - آهن - کروم به صورت تک فاز و آستنیتی منجمد می‌شوند و در نتیجه به جدایش عناصر آلیاژی و ناخالصیها مستعد هستند. اینگونه جدایشها سبب می‌شود تا این آلیاژها به ترکه‌های ذوبی در حین انجماد حساس باشند. در تشکیل ترکه‌های ذوبی عوامل مکانیکی و متالورژیکی به طور همزمان دخیل هستند. در اثر ذوب و انجماد غیر تعادلی حوضچه جوش، عناصر آلیاژی با دمای ذوب بالا مانند کروم و تیتانیوم به مرزها پس زده می‌شوند و جدایش رخ میدهد. در اثر این جدایش در مرزها، ترکیب یوتکتیکی و یا نزدیک به یوتکتیک پدید می‌آید که دمای ذوب

جدول ۲- متغیرهای جوشکاری لیزر انجام گرفته در این پژوهش

شماره نمونه	ولتاژ (V)	بسامد (Hz)	پهنای زمانی ضربان (ms)	قطر لیزر (mm)	سرعت (mm/s)	دبی گاز محافظ (Lit/min)	دمای پیش گرم (°C)
۱	۴۵۰	۳.۵	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۲	۴۶۵	۴.۵	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۳	۴۲۰	۶	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۴	۴۲۰	۷	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۵	۵۰۰	۵	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۶	۴۸۵	۵.۵	۶	۰.۲	۱	۱۵	۱۵۰
۷	۴۹۵	۳.۵	۶.۵	۰.۲	۰.۹	۱۵	۱۶۰
۸	۵۰۰	۳	۷	۰.۲	۰.۸	۱۵	۱۸۰
۹	۵۰۰	۳	۸	۰.۲	۱.۲	۱۵	۱۹۰
۱۰	۵۰۰	۳	۸.۵	۰.۲	۱.۴	۱۵	۲۰۵
۱۱	۵۰۰	۳	۹	۰.۲	۰.۹	۱۵	۲۲۰
۱۲	۵۰۰	۳	۱۰	۰.۲	۱.۸	۱۵	۱۷۰



شکل ۱- الف و ب) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه جوش نمونه شماره ۱۱ (ج) آزمون EDS خطی از ناحیه جوش.

### راهکارهای حذف ترک های ذوبی

همانطور که اشاره شد، جدایش عناصر آلیاژی و تشکیل رسوبات غنی از تیتانیوم و کروم در ریزساختار جوش نایمونیک به مونل به دلیل رسوب ترکیبات ثانویه، ترک ذوبی ایجاد می شود. در نتیجه برای حذف ترک لازم است که متغیرها و شرایط جوشکاری به گونه ای انتخاب شوند که با کاهش جدایش از تشکیل پیوسته این رسوبات در

پایینی دارد. همچنین در مراحل نهایی انجماد، هنگامیکه فیلم مذاب باقیمانده در نواحی بین دندریتی به صورت یک فیلم پیوسته پخش می شود. در اثر این پدیده کرنش های انقباضی در این نواحی ایجاد می شوند که فلز زمینه نمی تواند نیروهای ناشی از آنها را تحمل کرده و این امر منجر به ایجاد ترک ذوبی می گردد. شکل ۳ ترک ذوبی ایجاد شده را در نمونه شماره ۹ نشان می دهد.

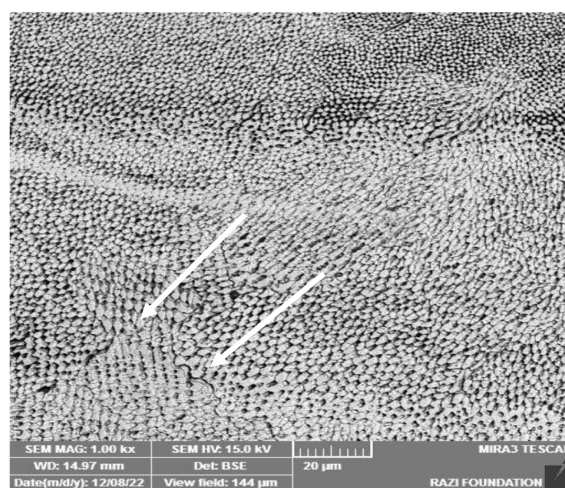
شماره ۷)، نمونه جوش شماره ۹ و همچنین نمونه های فلز پایه دو آلیاژ است (شکل ۶).



شکل ۳ - ریزساختار فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و ترک ذوبی نمونه شماره ۵.

پایین بودن استحکام شکست در نمونه بهینه شماره ۱۱ به علت تشکیل حفره های ریز در ریزساختار آن است، که با توجه به شکل ۷ قابل مشاهده است. استحکام شکست نمونه های جوش داده شده در اثر درشت شدن دانه های ناشی از افزایش حرارت ورودی جوشکاری کاهش یافته است. علاوه بر این همانطور که پیش تر اشاره گردید، در اثر ریز جدایش، ترکیبات کاربیدی و ترکیبات یوکتیک در امتداد مرزهای دندریتی جوانه زده و رشد می کنند. این ذرات با وجود داشتن حالت منفصل و پراکنده در ریزساختار، حین اعمال تنش سبب گسسته شدن دندریت ها از همین نقاط می گردند. (بررسی های انجام شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می دهند که سطح شکست در برخی نقاط مشخصه های شکست نرم را داشته ولی قسمت بیشتر شکست نمونه به صورت ترد از میان نواحی بین دندریتی اتفاق افتاده است). دانه ها و دندریت های درون دانه های ناحیه جوش به خصوص با نزدیک شدن به سطح شکست در راستای محور کشش کشیده شده اند. تجزیه شیمیایی عنصری نقطه A در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رفت در این نقطه A کاربید غنی از تیتانیوم و

مرزها جلوگیری شود. از طرفی برای دستیابی به ابعاد جوش مناسب، نیاز به جوشکاری با حرارت ورودی بالاتر است که این امر موجب کمتر شدن سرعت سرد شدن فلز جوش و افزایش جدایش می گردد. با تغییر زاویه تابش پرتو لیزر امکان دستیابی به عمق نفوذ دلخواه میسر نمی گردد. استفاده از پیشگرم به میزان زیادی سبب کاهش تنش های حرارتی ناشی از شیب دمایی، توزیع یکنواخت حرارت در دو سمت اتصال و کاهش عامل مکانیکی ایجاد ترک ذوبی می گردد. همچنین تأثیر مطلوب آن در کاهش و حذف ترک های ذوبی جوشکاری همجنس نایمونیک ۷۵ نیز مشاهده شد. به دلیل کاهش شیب حرارتی، طول ترک ذوبی کاهش و رفع شد (شکل ۴).

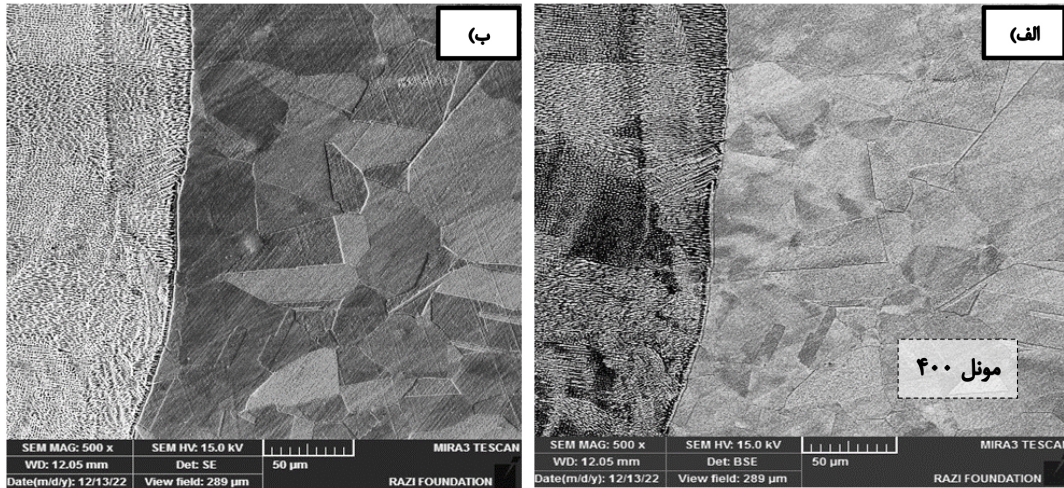


شکل ۲ - رسوبات مختلف تشکیل شده در نواحی مختلف ریزساختار جوش نمونه

### خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس

تغییر ریزساختار بر خصوصیات مکانیکی آلیاژ، نظیر سختی، استحکام کششی و استحکام شکست آن تأثیر می گذارد. مشخص شده است که در آلیاژهای جوش داده شده، پدیده هایی مانند رشد دانه و ایجاد فازهای ترد بسین فلزی در مرزدانه ها موجب کاهش استحکام و چقرمگی آنها می گردد. با توجه به نمایه ریز سختی در مقطع جوش مطابق شکل طرح واره ۵، برای نمونه شماره ۱۱ می توان دید که در این نمونه سختی فلز جوش کمتر از سختی فلزات پایه نایمونیک و بیشتر از سختی فلز پایه مونل است. همچنین سختی نایمونیک به دلیل داشتن عناصر کاربید زا بیشتر از مونل است. در ناحیه متأثر از حرارت مونل ۴۰۰، افزایش سختی مشاهده می گردد. دلیل این امر، رسوب کاربید های MC در این ناحیه است. در ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه نایمونیک نیز مطابق جوشکاری همجنس به دلیل انحلال رسوبات و فازهای استحکام بخش، مقدار سختی کمی افت پیدا کرده و سپس با دور شدن از منطقه متأثر از حرارت افزایش یافته است.

نمونه هایی که مورد آزمون کشش قرار گرفتند شامل نمونه جوش بهینه با متغیرهای نمونه شماره ۱۱، یک نمونه جوش ترک دار (نمونه



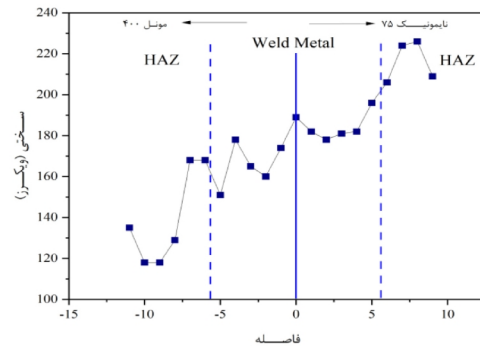
شکل ۴- ریزساختار فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و حذف ترک ذوبی، نمونه شماره ۱۱

رسوبات متعددی در نواحی بین دندریتی و مرزدانه ها در اثر جدایش تشکیل یافته اند.  
 -برای رفع تخلخل جوش باید متغیرهای جوشکاری به نحوی انتخاب شوند که شیب دمایی کم شده و در نتیجه نیروهای مارانگونی و شناوری در حوضچه جوش کاهش یابند.  
 -جدایش در همه نمونه های جوش داده شده مشاهده شد، همچنین رسوبات تشکیل شده در فرایند جوشکاری از نوع کاربیدهای غنی از تیتانیوم و کروم بود.  
 -در اعمال حرارت ورودی کم به ناحیه جوش، به تدریج طول و ضخامت ترک های ذوبی کاهش بسیار یافته و حذف شد.  
 -خصوصیات مکانیکی آلیاژها پس از اتصال کاهش یافته و در همه نمونه های جوش داده شده دارای استحکام شکست تقریباً حدود ۹۵ درصد فلز پایه مونل ۴۰۰ و ۸۰ درصد فلز پایه نایمونیک ۷۵ بودند.  
 نمونه های جوش داده شده دارای درصد ازدیاد طول کمی بودند و سطح شکست در همه نمونه ها به صورت دندریتی است.  
 -سختی فلز جوش غیرهمجنس از فلز پایه نایمونیک کمتر و از فلز پایه مونل بیشتر است. همچنین سختی در ناحیه متأثر از حرارت نایمونیک افزایش و سپس کاهش یافته است.

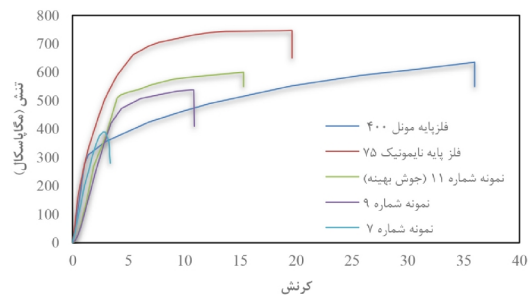
#### منابع

- 1-Knock NO. Characterization of Inconel 718: Using Gleeble and Vareststraint Testing Methods to Determine the Weldability of Inconel 718. MSc thesis. 2010.
- 2-John N. DuPont, John C. Lippold SDK. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. New Jersey: John Wiley & Sons; 2009.
- 3-Steen, W.M. and J. Mazumder, Laser material processing. 2010: springer science & business media.
- 4-Kim, J.-D., C.-J. Kim, and C.-M.J.J.o.M.P.T. Chung, Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd: YAG laser. 2001. 114(1): p. 51-56

کروم مشاهده شد که حین انجماد در داخل حفره به دام افتاده است. همچنین در شکل ۸ نتایج آنالیز شیمیایی طیف سنجی پراش پرتوی ایکس از سطح شکست نمونه شماره ۱۱ آورده شده است.



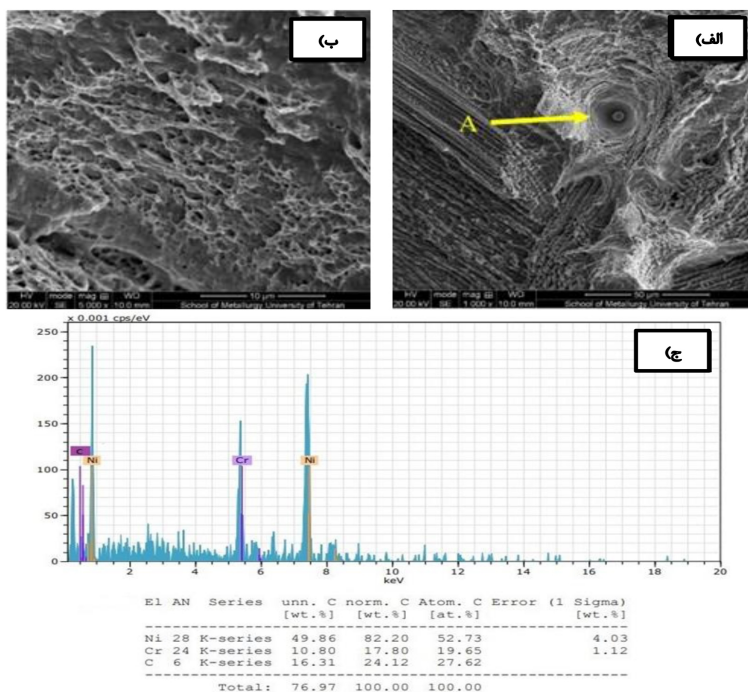
شکل ۵- نمایه ریز سختی در مقطع جوش نمونه شماره ۱۱.



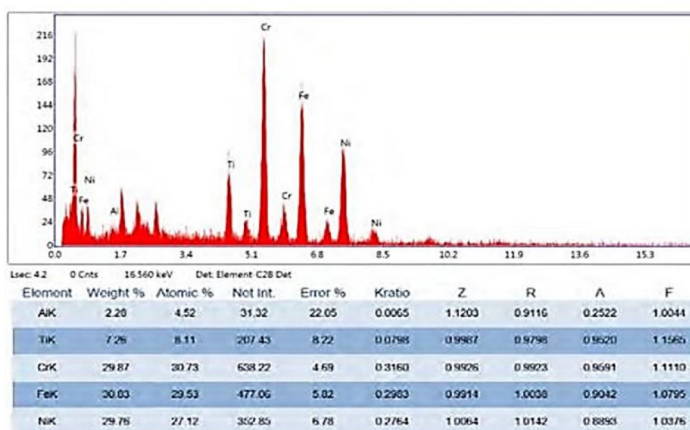
شکل ۶- نتایج آزمون کشش نمونه های شماره ۹، ۱۱، ۷ و فلز پایه مونل ۴۰۰، نایمونیک ۷۵.

#### نتیجه گیری و جمع بندی

ساختار درون دانه ها به صورت دندریتی است، مگر در نقاط نزدیک به فلز پایه مونل که ساختار به صورت سلولی تشکیل شده است.



شکل ۷- الف و ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی حاصل از شکست نگاری نمونه آزمون کشش ج-آزمون EDS نقطه ای از نقطه A.



شکل ۸- نتایج آنالیز شیمیایی طیف سنجی پرتو ایکس از سطح شکست نمونه شماره ۱۱.

electron-beam welded Inconel 718. 2016. 89: p. 964-977.  
 11-Ono, Y., et al., High-cycle fatigue properties of Alloy718 base metal and electron beam welded joint. 2015. 67: p. 1028-1035.  
 12-Shakil, M., Microstructure and hardness studies of electron beam welded stainless steel 304L and Inconel 625. 2014. 110: p. 121-126.  
 13-Chiang MF, Chen C. Induction-assisted laser welding of IN-738 nickel - base superalloy . Mater Chem Phys. 2009;114:415-9.

#### پی نوشت

- 1- کارشناسی ارشد، دانشکده مواد و متالورژی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
- 2- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشکده مواد و متالورژی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
- 3- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی گرایش جوشکاری، دانشکده مواد و متالورژی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

5-Berretta, J.R., et al., Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. 2007. 45(9): p. 960-966.  
 6-P'ng, D., P.J.M.S. Molian, and E. A, Q-switch Nd: YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils. 2008. 486(1-2): p. 680-685.  
 7-Kumar, G.S., et al., Numerical and experimental studies on the effect of varied pulse energy in Nd: YAG laser welding of Monel 400 sheets. 2018. 93: p. 184-191.  
 8-Ramakrishnan, H., et al., Experimental investigation on properties of dissimilar laser welding of AISI 316L to monel 400. 2020. 33: p. 4059-4064.  
 9-Kumar, G.S., et al., Optimization of parameters to attain higher tensile strength in pulsed Nd: YAG laser welded Hastelloy C-276-Monel 400 sheets. 2019. 100: p. 1-10.  
 Mei, Y., et al., Effect of metal and welding speed on-10 fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of



## پیش بینی استحکام کششی AI-5083 جوش اصطکاکی اغتشاشی داده شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

مسعود مصلاهی<sup>۱</sup>، قاسم عزیزی<sup>۲</sup>، امین حسین مرشدی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق بهینه‌سازی اتصال اصطکاکی اغتشاشی (FSW) آلیاژ AI-5083 با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پارامترهای همچون سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار به عنوان ورودی شبکه عصبی و استحکام کششی اتصال ایجاد شده بعنوان خروجی شبکه انتخاب شد. مطالعات ریزساختاری و مکانیکی اتصال ایجاد شده نشان داد که سرعت پیشروی بالای ابزار موجب به هم زدن نامطلوب ناحیه مرکزی اتصال و حفره دار شدن موضع اتصال بعلاوه عدم هدایت مناسب ماده به پشت ابزار می‌شود. سرعت پیشروی ابزار بسیار پایین نیز منجر به اختلاف در ساختار و خواص ناحیه مرکزی اتصال و نواحی مجاور و در نتیجه افت خواص اتصال می‌شود. بطور مشابه حصول استحکام حداکثر در سرعت چرخش بهینه ابزار بدست آمد. بررسی‌های انجام شده نشان داد شبکه عصبی از قابلیت بالایی در پیش‌بینی استحکام اتصال ایجاد شده برخوردار است و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با سه لایه میانی با مقدار خطای میانگین مربعات ۰/۰۳۳ و ضریب همبستگی کل ۰/۹۴ از قابلیت مطلوب تعمیم‌یافتگی و دقت بالایی برای برآورد استحکام کششی AI-5083 اتصال FSW داده شده برخوردار است.

کلمات کلیدی: FSW، AI-5083، استحکام، سرعت چرخش، سرعت پیش‌روی، شبکه عصبی مصنوعی.

### مقدمه

آلیاژ AI-5083 یک آلیاژ عملیات حرارتی ناپذیر پایه Al-Mg است که خصوصیتی از قبیل قیمت نسبتاً پایین، استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی خوب، شکل‌پذیری بالا موجب شده این آلیاژ بعنوان یک آلیاژ سازه‌ای در صنعت شناخته شود. قابلیت شکل‌پذیری بالای AI-5083 موجب توجه بالای به آن در صنعت خودروسازی بعنوان جایگزین فولادها در بدنه خودرو برای تولید وسایل نقلیه با راندمان بالای سوخت شده است [۱ و ۲]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، که توسط موسسه جوشکاری انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ ابداع شد، یک روش اتصال دهی حالت جامد است که برای آلیاژهای آلومینیومی که اغلب با مشکلاتی حین جوشکاری ذوبی از قبیل ترک داغ و تخلخل مواجه هستند، فرایندی مناسب

است [۳، ۴]. فرایند FSW قابلیت اتصال مواد غیر مشابه را دارا می‌باشد [۶]. یکی از جنبه‌های جالب FSW توانایی آن در کنترل از طریق پارامترهای خارجی مانند سرعت چرخش و پیشروی ابزار و همچنین نیروهای اعمال شده است. بنابراین درجه بالایی از تکرارپذیری فرایند FSW موجب توجه به این فرایند در صنایع مختلف می‌شود [۷]. مفهوم اصلی FSW بسیار ساده است. یک ابزار چرخشی غیر مصرفی حاوی پین و شانه با طراحی خاص در لبه‌های مجاور ورقه‌ها یا صفحات وارد و با حرکت چرخشی در امتداد خط اتصال موجب اتصال صفحات بهم می‌شود. ابزار دو وظیفه اصلی را انجام می‌دهد:

الف - گرم کردن قطعه کار،  
ب - حرکت مواد برای تولید اتصال. گرمایش با اصطکاک بین ابزار و

قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک قطعه کار انجام می شود. گرمایش موضعی مواد اطراف پین را نرم می کند و ترکیب چرخش ابزار و انتقال منجر به حرکت مواد از جلوی پین به پشت پین می شود [۸]. در فرایند FSW، دو پارامتر بسیار مهم، سرعت چرخش ابزار ( $\omega$ )، rpm) در جهت عقربه‌ای ساعت یا خلاف جهت عقربه‌ای ساعت و سرعت عبور ابزار ( $v$ ، mm/min) در امتداد خط اتصال می باشد. چرخش ابزار منجر به هم زدن و اختلاط مواد در اطراف پین دوار می شود و ترجمه ابزار مواد هم زده را از جلو به پشت پین حرکت می دهد و فرآیند جوشکاری را به پایان می رساند. سرعت چرخش ابزار بالاتر، دمای بالاتری را به دلیل گرمایش اصطکاک بالاتر ایجاد می کند و منجر به هم زدن و اختلاط شدیدتر مواد می شود [۸]. چالش اصلی فرایند FSW، انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری برای رسیدن به یک اتصال مطلوب می باشد. روش های سنتی انتخاب پارامترهای جوشکاری برای تولید اتصال جوشکاری عمدتاً زمان بر و هزینه بر می باشد. پارامترهای جوشکاری را می توان با تعداد محدودی آزمایش تجربی و با استفاده از تحلیل رگرسیون، روش سطح پاسخ، نرم افزارهای محاسباتی مانند سیستم های مبتنی بر منطق فازی و غیره و ایجاد ارتباط منطقی بین پارامترهای ورودی فرایند و نتایج حاصله با دقت بالایی بهینه نمود. شبکه عصبی مصنوعی یک تکنیک قابل اطمینان برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای یک فرآیند و یادگیری تأثیر هر پارامتر بر نتایج حاصله و در نتیجه پیش بینی پاسخ های فرایند بر اساس آموزش شبکه با داده های تجربی است [۹ و ۱۰].

در سال های اخیر، شبکه های عصبی مصنوعی به عنوان شاخه جدیدی از هوش مصنوعی در محاسبات و مدل سازی توسعه یافته اند و در کاربردها و شاخه های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته اند. شبکه عصبی مصنوعی یک رویکرد مدل سازی مبتنی بر الگوریتم یادگیری نظارت شده هوش مصنوعی است. ANN از ساختار عصبی مغز انسان الهام گرفته است که داده ها را بین چندین نورون (به عنوان واحد اساسی شبکه) پردازش می کند. این نورون ها بر اساس یک عامل وزنی یا یکدیگر مرتبط هستند که تأثیر متقابل بین نورون ها را تعیین می کند. فرایند آموزش شبکه های عصبی را می توان با تغییر مقادیر عوامل وزنی در میان نورون ها، بر اساس داده های آزمایشی خارج از شبکه یا در پاسخ به بازخوردهای خود نورون را بهینه سازی کرد. این ویژگی شاخص ANN را قادر می سازد تا بر اساس یادگیری قابل تعمیم یافتگی برای داده های خارج از مجموعه آموزش دیده را به دست آورد. در علم مهندسی مواد، مطالعات مختلفی در زمینه پیش بینی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی برای ترکیب های مختلف انجام شده است. تا به امروز، گسترده ترین شبکه عصبی ارائه شده در مطالعات مختلف، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه است که در این پژوهش به کار گرفته شده است [۱۱].

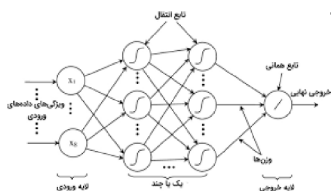
از تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از ANN در فرایند FSW می توان به تحقیقات قطیا و همکاران، [۱۲] لکشیمیناپانان و همکاران [۱۳] در استفاده از ANN برای پیش بینی استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده [ اشاره نمود.

انتخاب بهینه پارامترهای فرایند FSW نقش مهمی در کیفیت و خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده با این فرایند دارد. بررسی مطالعات انجام شده توسط جابارمن و همکارانش [۱۴] و بالاسابرامانین [۱۵] نشان می دهد که خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر برای اتصال نقش مهمی در انتخاب پارامترهای فرایند مذکور ایفا می کند بطوری که می توان گفت پارامترهای انتخاب شده برای یک آلیاژ را نمی توان با اطمینان برای آلیاژ دیگر مورد استفاده قرار داد. مروری بر پیشینه تحقیقاتی انجام شده در زمینه فرایند FSW نشان می دهد که تا کنون تحقیق جامعی در زمینه بکارگیری شبکه عصبی در پیش بینی استحکام اتصال ایجاد شده با فرایند FSW بر حسب پارامترهای سرعت پیشروی و چرخش ابزار در آلیاژ Al5083-H321 انجام نشده است که تحقیق مورد بررسی واقع خواهد شد.

### مواد و روش پژوهش

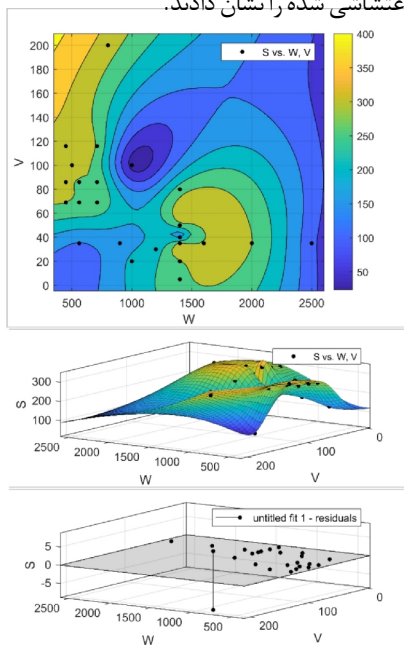
در این تحقیق از صفحات آلومینیم آلیاژی ۵۰۸۳ با ابعاد  $80 \times 60 \times 5$  mm و با ترکیب شیمیایی Al-4.8Mg-0.5Mn (wt%) بعنوان فلز پایه استفاده شد. اتصال دهی صفحات در حالت سر به سر با استفاده از فرایند FSW در گستره سرعت پیشروی و چرخشی به ترتیب  $80-200$  mm/min و  $1400-500$  RPM انجام شد. لازم به ذکر است که فرایند FSW با دستگاه فرز سنگین با استفاده از ابزار چرخنده از جنس فولاد ابزار گرم کار H13 و با هندسه پین مخروطی رزوه دار انجام شد. قطر شانه و قطر پین به ترتیب  $15$  mm و  $5$  mm انتخاب گردید. ارتفاع ابزار با توجه به ضخامت ورق،  $4.8$  mm، در نظر گرفته شد.

برای بررسی ساختاری ناحیه اتصال، نمونه های مورد نظر عمود بر جهت جوشکاری بریده شدند سپس با دقت سنباده زنی و با خمیر الماس پولیش و برای بررسی درشت ساختاری با استفاده از محلول تاکر ( $5\text{ml HNO}_3 + 5\text{ml HF} + 15\text{ml HCL} + 8\text{ml H}_2\text{O}$ ) به مدت  $30$  sec و برای بررسی ریزساختاری با استفاده از محلول کلر ( $3\text{ml HNO}_3 + 6\text{ml HF} + 6\text{ml HCL} + 145\text{ml H}_2\text{O}$ ) به مدت  $60$  sec اچ شدند. نمونه های مورد نظر برای ارزیابی خواص کششی اتصال از مقطع عرضی اتصال برش و مطابق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه کشش Instron 5586 و با سرعت حرکت فک  $3$  mm/min تحت آزمون کشش قرار گرفتند. قابلیت شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در پیش بینی و طبقه بندی داده های غیر خطی موجب شد در این پژوهش از این شبکه برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای اصلی فرایند FSW یعنی سرعت چرخش (W) و سرعت پیشروی (V) با استحکام کششی اتصال ایجاد شده (S)، استفاده گردید (شکل ۱).



شکل ۱- ساختار شبکه عصبی پرسپترون چند لایه مورد استفاده در این پژوهش.

ناحیه بصورت هم محور می باشد که بدلیل تبلور مجدد دینامیک ناشی از حرکت چرخشی بین می باشد. متوسط اندازه دانه‌ی این ناحیه با کاهش سرعت پیشروی ابزار کمتر می شد. دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی (TMAZ) دچار تغییر شکل پلاستیک شدید شده و دارای مورفولوژی کشیده و خم شده می باشد. افزایش سرعت چرخش ابزار منجر به تغییر شکل پلاستیک شدیدتر و سیلان بیشتر ماده در TMAZ گردید و در نتیجه تبلور مجدد دینامیک جزئی در این ناحیه گردید، در حالی که در سرعت چرخش پایین ابزار دانه‌ها در این ناحیه دارای خمیدگی کمتر بوده و به ساختار نوردی آلیاژ پایه نزدیک تر می باشد. ریزساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ) با افزایش سرعت چرخش ابزار و در نتیجه افزایش حرارت تولیدی، این ناحیه دچار فرایند تبلور مجدد دینامیک جزئی گردیده و ساختار آن از حالت نوردی فلز پایه فاصله گرفته است. بطور مشابه چاودری و همکاران [۱۷] اتفاتی افتادن تبلور مجدد کامل در TMAZ و تبلور مجدد جزئی در HAZ آلیاژ منیزیم جوش اصطکاکی اغتشاشی شده را نشان دادند.



شکل ۲- سطح پاسخ، مدل درون یابی و مقدار بازماند متغیر استحکام کششی بر حسب متغیرهای سرعت چرخش و سرعت عبور

### اجرای و بهینه سازی شبکه عصبی پیش بینی استحکام کششی

به طور کلی در مورد تشخیص الگوهای ایستا، شبکه پرسپترون چندلایه با ساختار لایه ورودی - لایه (های) پنهان - لایه خروجی بیشترین کاربرد را دارد، به عبارت دیگر در این شبکه ها می توان از توابع جداسازی به هر صورت استفاد نمود. همچنین زمانی که وزن ها نرمال می شوند و خروجی در یک محدوده ی معین قرار می گیرد، پرسپترون چندلایه بیشترین کارایی خود را پیدا می کند. دو ویژگی مهم پرسپترون چندلایه عبارت از عناصر پردازنده ی غیر خطی آن

MLP از سه لایه نورون تشکیل شده است [۱۶]. لایه اول نورون لایه ورودی، لایه سوم نورون لایه خروجی و لایه میانی نورون لایه پنهان است. به طور کلی، لایه میانی در MLP با نورون های ورودی  $r$ ، نورون های پنهان  $s$  و نورون های خروجی  $t$  بر اساس روابط زیر مرتبط می شوند.

$$u_i = w_{oj} \sum W_{ij} \times x_i ; i = 1 \text{ to } n \quad (1)$$

$$y_i = f(u_i) \quad (2)$$

که  $i$  و  $j$  به ترتیب تعداد نورون ها در لایه ورودی و لایه پنهان هستند،  $x_i$  ورودی  $i$ ،  $w_{ij}$  وزن مربوط به ورودی  $i$  و نورون  $j$  است،  $w_{oj}$  وزن بایاس نورون پنهان  $j$  و  $f(u_i)$  تابع فعال سازی نورون  $j$  ام است که هر ورودی نورون پنهان  $u_i$  را به خروجی نورون پنهان  $y_i$  تبدیل می کند. میانگین مربع خطاها (Mean Squared Error: MSE) در تمام الگوی آموزشی شبکه های عصبی مورد استفاده میشود (معادله ۳).

$$MSE = \sum (t_i - z_i) / 2N ; i = 1 \text{ to } N \quad (3)$$

که  $N$  تعداد دفعات آموزشی است،  $t_i$  مقدار هدف و  $z_i$  مقدار پیش بینی شده است.

### تحلیل مجموعه داده ها

تعداد ۲۶ نمونه شامل ویژگی های استحکام کششی، سرعت چرخش و سرعت پیشروی گردآوری شد که استحکام کششی تابعی از سرعت چرخش و پیشروی ابزار در نظر گرفته شده است. پس از آماده سازی داده ها، اولین قدم در مدل سازی، بررسی آماری داده های خام است. شناخت ویژگی های آماری جامعه داده های خام از جمله شاخص های آماری تابع توزیع و غیره کمک زیادی به نحو صحیح به کار بردن آن ها و تجزیه و تحلیل مناسب تر داده می کند. در جدول (۱)، شاخص های آماری مختلف از جمله میانگین، انحراف معیار و غیره برای متغیرهای استحکام کششی، سرعت چرخش و سرعت پیشروی ارائه شده است.

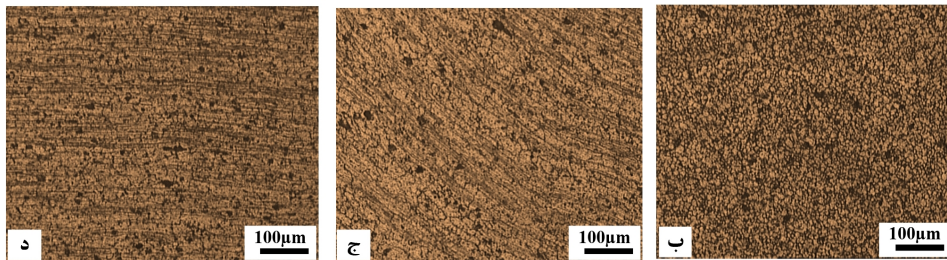
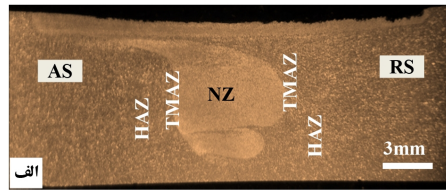
جدول ۱- پارامترهای آماری متغیرهای استحکام کششی، سرعت چرخش و سرعت پیشروی

متغیر	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	Q <sub>1</sub>	میان	Q <sub>3</sub>	بیشینه
سرعت چرخش	۱۰۴۸	۵۲۱	۴۵۰	۵۶۰	۹۵۰	۱۴۰۰	۲۵۰۰
سرعت پیشروی	۶۸۱۷۳	۴۹۱۵۴	۵	۳۵	۵۹۱۵	۸۹۱۵	۲۰۰
استحکام کششی	۲۶۲۱۷	۷۵۱۶	۳۳	۲۲۱۱۳	۲۹۲	۳۰۹	۲۳۴

در گام بعد، مدل درون یابی سه بعدی سطح پاسخ استحکام کششی به صورت تابعی از ویژگی های ورودی سرعت چرخش و سرعت عبور تعریف شد که در مناطقی با سرعت چرخش و سرعت پیشروی نزدیک به هم، تغییرات (گرادیان) شدیدی در مقادیر استحکام کششی دیده می شود که مدل سازی را با پیچیدگی همراه می کند (شکل ۲).

### نتایج و بحث

شکل (۳) تصویر ساختار موضع اتصال را نشان می دهد. بررسی های ریزساختاری منطقه اغتشاشی (NZ) نشان داد که دانه بندی این

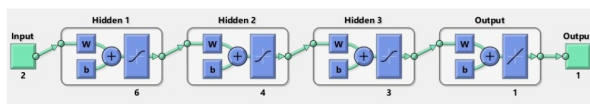


شکل ۳- ساختار موضع اتصال. الف- درشت ساختار موضع اتصال، ب- ریزساختار منطقه اغتشاشی (NZ)، ج- ریزساختار منطقه متأثر از حرارت و کارمکانیکی (TMAZ)، د- ریزساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ).

(مانند انواع غیر خطی تابع لگاریتمی و تانژانت های پیربولیک) ارتباطات داخلی فراوان آن‌ها است [۱۸].

در شبکه های عصبی قابلیت نرمال سازی (استانداردسازی) اطلاعات میان بالاترین و پایین ترین ویژگی وجود دارد. اصولاً استفاده از داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می شود. عمل نرمال سازی برای جلوگیری از این مشکلات و یکسان سازی ارزش داده‌ها صورت می گیرد. عمل فوق، مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها و سبب جلوگیری از اشباع نورون‌ها می شود. برای نرمال سازی از روش های گوناگونی استفاده می شود که ساده ترین آن تبدیل داده‌های خام براساس یک تابع خطی به بازه [۰،۱] یا [-۱،۱] است [۱۹]. در این مقاله، براساس تفاوت در دامنه تغییرات ویژگی‌های ورودی و خروجی، داده‌ها در بازه [-۹۵/۹۵، ۰/۰] استاندارد شدند. به منظور اجرای صحیح، ارزیابی و بررسی قابلیت تعمیم شبکه، داده‌ها به صورت تصادفی در سه بخش آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شدند. به منظور انتخاب بهترین ساختار شبکه عصبی پرسپترون چند لایه جهت مدل سازی استحکام کششی، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف شبکه اجرا شد. با بررسی حالت‌های مختلف مشخص شد با توجه به ثابت بودن تعداد ورودی‌ها، با افزایش تعداد نورون لایه میانی دقت و تخمین شبکه به پاسخ‌های مناسب تری همگرا می شود تا زمانی که بیش برآزشی رخ دهد. این تحلیل حساسیت، براساس پاسخ شبکه در داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون با تعداد لایه‌های مختلف از یک تا سه لایه میانی با تعداد حداکثر ۱۵ نورون به همراه توابع انتقال مختلف از جمله تانژانت سیگموئید و لاگ سیگموئید اجرا شد. به منظور آموزش این شبکه، از رویکرد پس انتشار خطا با روش لونیگ-مارکوارت استفاده شده است. براساس سعی و خطای انجام شده در تعیین توپولوژی بهینه شبکه، لایه ورودی با دو متغیر سرعت چرخش و پیشروی، سه لایه میانی با تعداد نورون (۳-۴-۶) و توابع انتقال تانژانت سیگموئید و در نهایت لایه خروجی با متغیر هدف استحکام کششی و تابع انتقال خطی تعیین شد که در شکل (۴) نمایش داده

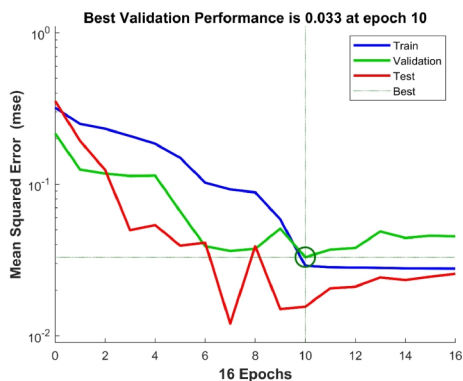
شده است. تعداد تکرارها در شبکه، پیش از اجرا مشخص نمی باشد لذا به محض شروع افزایش خطا در داده‌های آزمون یا اعتبارسنجی، الگوریتم آموزش متوقف می شود. بعد از پایان هر مرحله، پاسخ شبکه با مجموعه داده‌های آزمایشی کنترل می شود تا در صورت افزایش خطا در مجموعه اعتبارسنجی و آزمون، الگوریتم آموزش متوقف شود تا شبکه، داده‌های آموزشی را حفظ نکند. معیارهایی که معمولاً به منظور توقف آموزش به کار گرفته می شود، شامل تعداد تکرارها، میانگین مربع خطای داده‌ها یا موارد دیگر براساس نظر کاربر است. تا زمانی که خطای داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی روند رو به پایین نشان می دهند آموزش شبکه ادامه دارد و به محض اینکه خطا برای داده‌های اعتبارسنجی افزایشی نشان داد، آموزش شبکه متوقف می شود و کم ترین خطای ثبت شده به عنوان شاخص عملکرد شبکه ثبت می شود. در این مقاله، معیار  $MSE$  به عنوان شاخصی به منظور ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت که بهترین شرایط شبکه در دور (تکرار) دهم با مقدار ۰/۳۳ مشاهده شد. بدیهی است که نقش داده‌های آموزشی در کارکرد شبکه عصبی بسیار مهم است.



شکل ۴- ساختار شبکه عصبی چند لایه پیشنهادی به منظور برآورد استحکام کششی.

شباهت آماری بین مجموعه داده‌های آموزشی و کل داده‌ها سبب بهبود کارکرد گسترش شبکه عصبی می شود و نشان دهنده این مطلب است که داده‌های آموزشی با فراوانی و اهمیت مناسب در هر بخش توانسته است تمامی داده‌های موجود را نشان دهد. بنابراین سعی می شود داده‌های آموزشی کل گسترده داده‌های اصلی را در برگیرد و همچنین در محدوده‌هایی که تجمع داده‌ها بیشتر است و

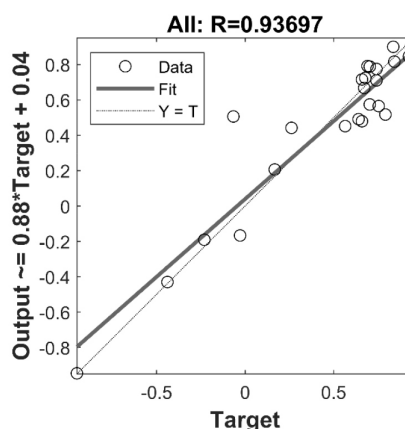
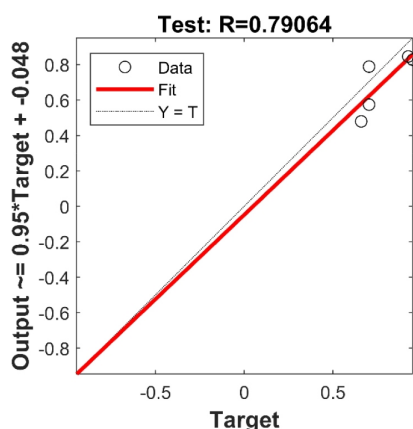
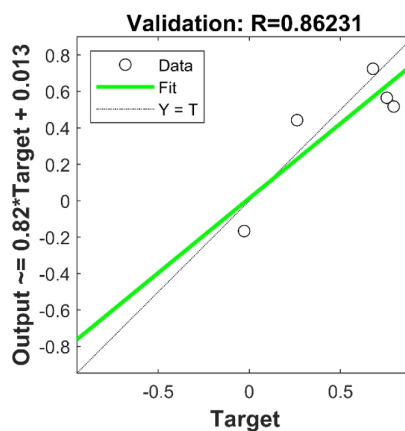
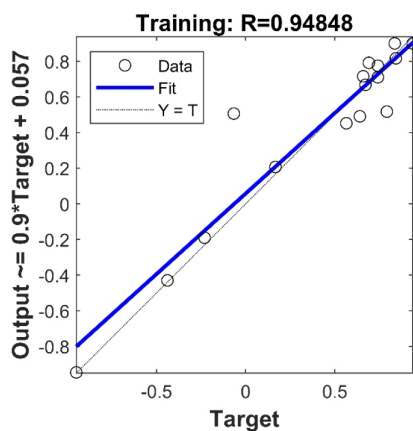
واقعی و تخمینی با شیب خط رگرسیون حدود ۰/۹ و عرض از مبدا حدودی کمتر از ۰/۰۵ (نزدیک به خط ۴۵ درجه) است. لازم به ذکر است این مقادیر در حالت نرمال سازی شده نمایش داده شده است.



شکل ۵- نمودار کارایی شاخص میانگین مربعات خطا در برابر تعداد دور اجرای شبکه عصبی متغیر استحکام کششی.

به منظور بررسی دقیق تر عملکرد شبکه عصبی، مقادیر تخمینی

مهم تر هستند تعداد داده های آموزشی نیز به همان نسبت بیشتر باشد. یکی از چالش های مهم در این مطالعه، تعداد کم داده ها، توزیع نامتقارن آن ها در فضای ویژگی و گاه داده های خارج از رده است. در شکل (۵)، نمودار تابع کارایی نسبت به دوره های تکرار برای سه مجموعه داده آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نمایش داده شده است. در نمودار کارایی، روند کلی کاهش خطا با افزایش دوره های آموزش نمایان است که بهترین عملکرد در دور (تکرار) دهم قابل مشاهده است و پس از آن روند بهبود آموزش متوقف و مجموعه های اعتبارسنجی و آزمون روند صعودی خطا را نشان می دهد. در نتیجه شبکه برای جلوگیری با مشکل بیش برآزشی متوقف شده است. به منظور پیش بینی متغیر استحکام کششی مشخص شد که یک شبکه عصبی با سه لایه میانی با ساختار تعداد نورون های لایه میانی ۳-۴-۶ و با مقدار خطای میانگین مربعات ۰/۰۳۳ با تعداد تکرار ۱۰ و ضریب همبستگی کل ۹۴/۹۴ بهترین شبکه پیشنهادی می باشد. در شکل (۶)، نمودار مقاطع به همراه رگرسیون خطی مقادیر واقعی و تخمینی در حالت های آموزشی، اعتبارسنجی، آزمون و حالت کلی نمایش داده شده است که بیانگر عملکرد مطلوب شبکه عصبی براساس ضریب همبستگی بالای ۰/۹ و رابطه خطی بین مقادیر



شکل ۶- نمودار مقاطع شبکه عصبی بهینه متغیر استحکام کششی در مجموعه داده های آموزش، اعتبارسنجی و آموزش

42:9888-9893.

2-Caizhi Zhou, Xinqi Yang, Guohong Luan, " Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy ", Scripta Materialia 53 (2005) 1187-1191.

3-J.J. Shen, H.J. Liu, F. Cui, " Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper ", Materials and Design 31 (2010) 3937-3942.

4-Caizhi Zhou, Xinqi Yang, " Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy ", J MATER SCI 41 (2006) 2771-2777.

5-Caizhi Zhou, Xinqi Yang, Guohong Luan, " Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy ", Materials Chemistry and Physics 98 (2006) 285-290.

6-A. Steuwer, M.J. Peel, P.J. Withers, " Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: The effect of process parameters on residual stress ", Materials Science and Engineering A 441 (2006) 187-196.

7-H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, " Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds ", Materials Science and Engineering A 501 (2009) 119-124.

8-R.S. Mishra, Z.Y. Ma, " Friction stir welding and processing ", Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1-78.

9-Zurada, J.M., "Introduction to artificial neural systems", West Publishing Company, St. Paul, (1992).

10-Krse, B., B. Krose, P. van der Smagt, and P. Smagt, " An introduction to neural networks ", (1993).

11-M.A. Alam, et al, "Artificial Neural Network Modeling to Predict the Effect of Milling Time and TiC Content on the Crystallite Size and Lattice Strain of Al7075-TiC Composites Fabricated by Powder Metallurgy. Crystals", (2022), Crystals, 12(3), 1-20.

12-ND Ghetiya and K.M. Patel, " Prediction of tensile strength in friction stir welded aluminum alloy using artificial neural network ", Procedia Technology, 14 (2014) 274-281.

13-Lakshminarayanan, A.K. and V. Balasubramanian, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19 (2009) 9-18

14-M. Jayaraman, R. Sivasubramanian, V. Balasubramanian, " Establishing relationship between the base metal properties and friction stir welding process parameters of cast aluminum alloys ", Materials and Design 31 (2010) 4567-4576.

15-V. Balasubramanian, " Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters ", Materials Science and Engineering A, 480 (2008) 397-403.

16-Basheer, I. and M. Hajmeer, " Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application ", Journal of microbiological methods, 43 (2000) 3-31.

17-S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole and X. Cao, "Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch", Materials Science and Engineering A, 527, (2010), 6064-6075.

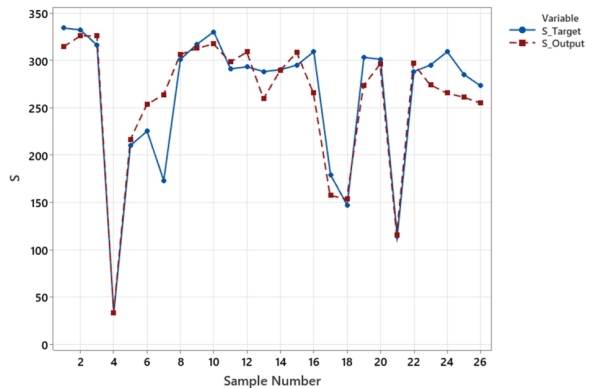
18-C. C. Aggarwal, :Neural networks and deep learning", Springer, (2018).

19- M.H. Beale, M.T. Hagan, H.B. Demuth, " Neural network toolbox", User's Guide, MathWorks, (2010) 2, 77-81.

#### پی نوشت

- 1- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران
- 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندس معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران
- 3- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

شبکه عصبی به مقیاس اصلی بازگردانده شده و با مقدار واقعی مقایسه شدند، همانطور که در شکل ۷ نمایش داده شده است خروجی های شبکه عصبی توانسته به خوبی روند کلی داده، کران های بالا و پائین متغیر را تخمین بزند. لازم به ذکر است که رفتار شبکه تخمینی برای نمونه های شماره ۷ و ۲۴ با خطا همراه بوده است که نیاز به واکاوی و تامل بیشتر دارد.



شکل ۷- نمودار مقایسه ای مقادیر واقعی (Target) و تخمینی متغیر استحکام کششی براساس نمونه ها (Output).

#### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، استحکام اتصال ایجاد شده با شبکه عصبی مورد بررسی واقع شد که از مهمترین دستاوردهای حاصل از این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره نمود:

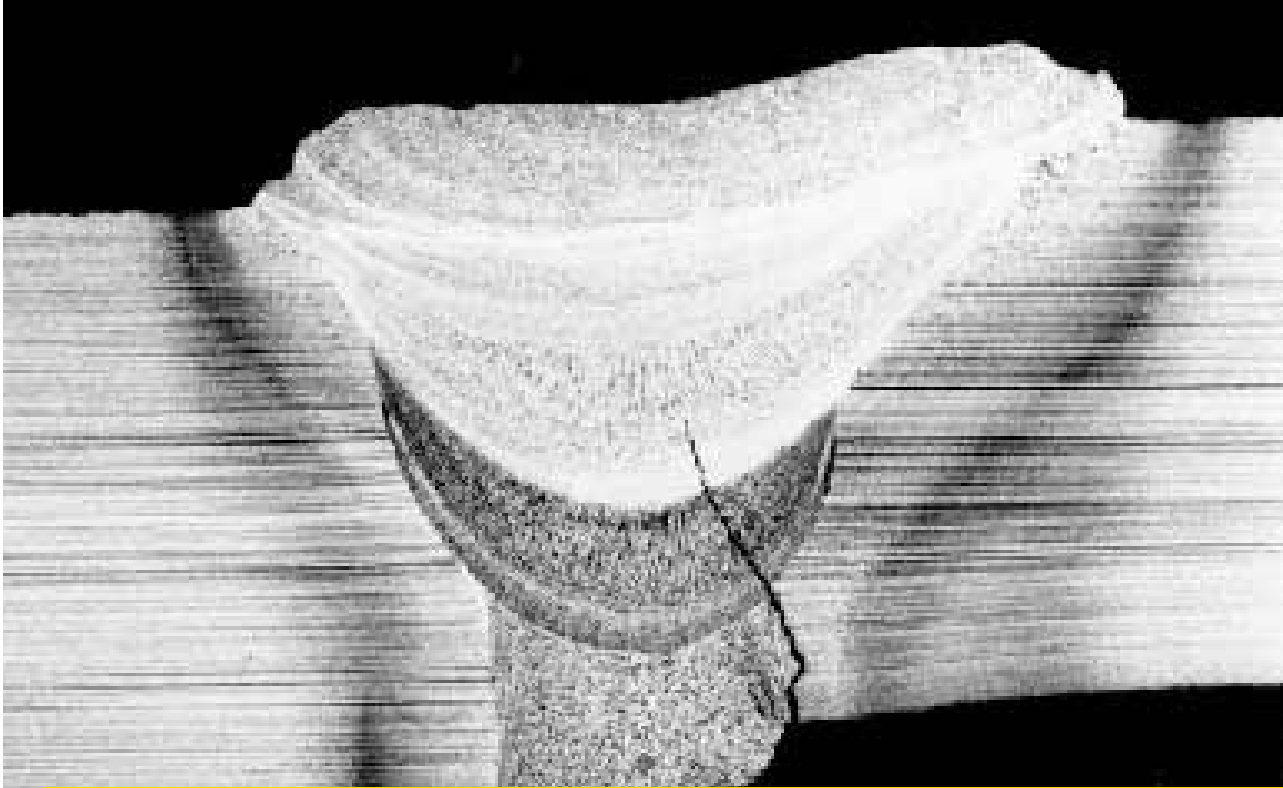
- خواص کششی اتصالات با افزایش سرعت پیشروی ابزار ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است که خواص کششی پایین حاصله در سرعت پیشروی پایین ابزار مربوط به مرز مشخص حاصله بین ناحیه هم زده و ناحیه متأثر ترمومکانیکی و در سرعت پیشروی بالا مربوط به درشت دانگی حاصله می باشد.

- افزایش سرعت چرخش ابزار تا حد بهینه ای بدلیل ایجاد سیلان مناسب و ایجاد ساختار ریزدانه منجر به افزایش خواص کششی و خمشی اتصالات ایجاد شده با فرایند FSW می شود. سرعت های چرخش ابزار پایین تر بدلیل عدم سیلان مناسب ماده منجر به افت خواص کششی اتصال و سرعت چرخش ابزار خیلی بالا نیز بدلیل فرایند ذوب جزئی و هدایت ماده به بیرون از ناحیه اتصال منجر به متخلخل شدن ناحیه اتصال می شود.

- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به منظور پیش بینی استحکام کششی، براساس دو ویژگی ورودی سرعت های پیشروی و چرخش با سه لایه میانی (۳-۴-۶) ارائه شد. این شبکه با مقدار خطای میانگین مربعات ۰/۳۳ و ضریب همبستگی کل ۰/۹۴ از قابلیت مطلوب تعمیم یافتگی و دقت بالای برآورد استحکام کششی برخوردار است.

#### منابع

1-Seongjin Hong, Sangshik Kim, Chang Gil Lee, " Sung-Joon Kim, Fatigue crack propagation behavior of friction stir welded 5083-H32 Al alloy", J Mater Sci (2007)



## ساخت دستگاه آزمون LB-TRC جهت بررسی ترک سرد

مهرداد حسین پور<sup>۱</sup>، علیرضا ابراهیمی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش به توضیح مراحل طراحی، ساخت و سپس ارزیابی دستگاه آزمون جوش پذیری ترکیب مقطع طولی مهره جوش مهار شده تحت بار کششی (LB-TRC) پرداخته شده است. که این طرح اولین بار توسط پروفسور ماتسودا، پروفسور ناکاگاوا و پروفسور شینوزاکی در دانشگاه اوساکا ژاپن با سیستم انتقال نیروی پیچی طراحی و ساخته شد. در این تحقیق با در نظر گرفتن امکانات در دسترس و جدید این دستگاه با استفاده از بکارگیری سیستم هیدرولیک و قابلیت ثبت لحظه‌ای نیروی اعمالی به مقطع فلز جوش طراحی و ساخته شد. اساس کار مبتنی بر ایجاد گرده جوش در داخل شیار دوتکه و کاملاً هم‌راستا و سپس اعمال نیروی ثابت متناسب با سطح مقطع گرده جوش ایجاد شده است. با درج تنش اعمالی در مقادیر مختلف و زمان لازم برای ایجاد شکست در مقطع ایجاد شده منحنی مربوطه رسم و وابستگی تنش لازم برای بروز شکست ناشی از ترک سرد برحسب زمان ترسیم می‌شود. این مقاومت وابسته به میزان هیدروژن فرار موجود در فلز جوش بوده و برای ارزیابی مقاومت به ترک سرد فلز جوش حاصل از الکتروود 11018 مورد استفاده قرار گرفت. مقاومت این الکتروود در حدود 120 تعیین شد و مشخص شد که نصب نیروسنج در دستگاه به خوبی زمان شروع و پیشرفت خسارت ناشی از بروز ترک سرد را ثبت و نشان دهد.

**کلمات کلیدی:** ترک سرد، آزمون جوش پذیری، فلز جوش، فولاد استحکام بالا، جوشکاری الکتروودستی.

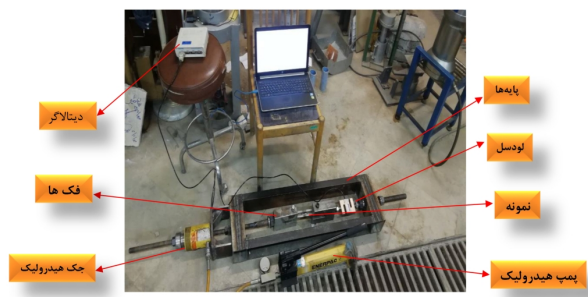
### مقدمه

ترک سرد (هیدروژنی) یکی از رایج‌ترین عیوب در سازه‌های فولادی است، که تحقیقات زیادی در زمینه‌ی مکانیزم‌های به‌روز آن انجام شده است [4-1]. با وجود مطالعات و تحقیقات زیادی که تاکنون صورت گرفته، هنوز مکانیزم جامعی جهت توجیه پدیده تردی هیدروژنی در کلیه فلزات ارائه نشده است. اغلب این تئوری‌ها بر اساس نحوه ایجاد آثار ناشی از ورود هیدروژن بنانهاده شده و در واقع توجیه‌کننده گوشه‌هایی از آثار پدیده مذکور در گروه یا تعداد خاصی از فلزات و آلیاژها هستند [5, 6]. تردی هیدروژنی زمانی رخ می‌دهد که سه عامل تنش، ساختار ترد و مقدار کافی هیدروژن به‌طور

همزمان حضور داشته باشند [7]. اصطلاح تردی که در ارتباط با پدیده تأخیر هیدروژن در فلزات به کار می‌رود، معرف افزایش تمایل به شکست کلیواژی یا شبه کلیواژی است [8, 7]. ضریب نفوذ هیدروژن در فاز فریت بسیار بیشتر از فاز آستنیت است، بنابراین ضریب نفوذ زیاد هیدروژن در فریت، فرایند نفوذ را سرعت می‌بخشد. برعکس، ضریب نفوذ کمتر هیدروژن در آستنیت، مانع از ادامه نفوذ هیدروژن از به سمت فلز پایه، قبل از استحاله آستنیت موجود در، به مارتنزیت می‌گردد. مجموعه‌ای از هیدروژن و مارتنزیت باعث تشدید ترک خوردن هیدروژنی می‌گردد [8, 9]. اولین آزمون انجام‌شده برای ترک سرد در سال 1940 زمانی انجام

### معرفی دستگاه

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود این دستگاه شامل اجزای مختلفی است که در ادامه به بررسی قسمت‌های مختلف آن پرداخته شده است.



شکل 1- شماتیک کلی از دستگاه LB-TRC

### پایه‌ها (قاب دستگاه)

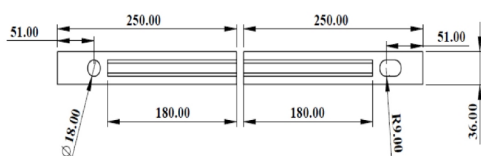
برای جلوگیری از خمش در پایه‌ها (قاب دستگاه) از دو ناودانی 5 استفاده شد. با توجه به این که باری که در این آزمایش مورد نیاز بوده حدود 10 تن است، ناودانی 5 چنین فشاری را بدون متحمل شدن خمش و شکست پاسخگو است.

### فک‌ها

جنس فک مورد نظر از فولاد ST 37 استفاده شده است، و داخل هر فک با استفاده از دستگاه تراش شکاری به عمق 7 سانتی‌متر و همچنین دهانه‌ی 9,1 سانتی‌متر ایجاد می‌شود تا نمونه در آن درگیر شود. همچنین هر دو فک (ثابت و متحرک) سوراخ شد که پین‌های مورد نظر نمونه‌ها در جای خود نگه دارد. برای اتصال دادن فک‌ها به قاب از پیچ تمام رزوه با گام 15,3 استفاده شده و هر کدام از فک‌ها را به عمق 3 سانتی‌متر رزوه و مهره‌ها پشت فک بسته شد.

### نمونه

برای ساخت نمونه به کمک نرم‌افزار SOLIDWORK نقشه نمونه ترسیم شد که تصویر نقشه نمونه مورد نظر در شکل 2 نشان داده شده است. جنس نمونه مورد نظر از فولاد ST 37، ابعاد نمونه 50 سانتی‌متر طول در 6,3 سانتی‌متر عرض و ارتفاع 1,8 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در نمونه شکاری با عمق 6 میلی‌متر با زاویه 60 درجه و گرده 6 و دو سوراخ برای پین‌ها به شعاع 1,8 سانتی‌متر ایجاد شد.



شکل 2- نقشه نمونه طراحی شده جهت انجام آزمایش (اندازه به میلی‌متر)

### پمپ هیدرولیک دستی

جهت اعمال نیرو برای کشیدن نمونه از یک پمپ هیدرولیک دستی

شد که تشکیل مارتنزیت در HAZ عامل اصلی ایجاد ترک بود. بعد از جنگ جهانی دوم، آزمون‌های ترک سرد ادامه پیدا کرد. این آزمون‌ها به تدریج تخصصی‌تر شد و بعضی از آن‌ها به‌خصوص برای تحقیق در ترک سرد هیدروژنی، انتخاب مناسب مواد جوشکاری و وضعیت جوشکاری مناسب به منظور حذف ترک هیدروژنی انجام شد.

هدف اصلی آزمون‌های جوش پذیری ارزیابی تأثیر فاکتورهای مختلف بر روی حساسیت به ترک خوردن، ترکیب فلز اولیه، نوع مواد مصرفی جوشکاری، دمای پیش گرم و دیگر وضعیت‌ها در شرایط جوشکاری است [9].

آزمونی که در این پژوهش مورد بحث قرار گرفته آزمون ترک سرد - است. زمان مورد نیاز برای شروع و رشد ترک به تنش کششی اعمالی وابسته است. با تغییر بار کششی، زمان تا شکست تغییر خواهد کرد و نمودار تنش کششی بر حسب زمان شکست را می‌توان ایجاد کرد. این آزمون تغییر شرایط جوشکاری را ممکن می‌سازد و اثر پیش گرم را تعیین می‌کند. آزمون (TRC) یک تنش بحرانی را مشخص می‌کند که در تنش‌های کمتر از آن (HIC) رخ نمی‌دهد. آزمون (TRC) توسط ماتسودا و همکاران برای اعمال تنش کششی بر فلز جوش آزمایشی که با تنش عرضی اعمال شده مخالفت می‌کند اصلاح شد لذا این روش اصلاح شده آزمون ترک با مهار کشی و گرده طولی (LB-TRC) نامیده شد. آزمون (G-BOP) جوش روی فاصله رسوب داده می‌شود که تمرکز تنش در ریشه جوش را افزایش می‌دهد، نشان داده است که آزمون (LB-TRC) آزمون معتبر برای ارزیابی (HIC) فلز جوش است.

در آزمون (TRC) و اصلاحیه‌های آن، حالت تنش کششی، هندسه و ابعاد نمونه‌های آزمایش را می‌توان برای شبیه‌سازی شرایط جوشکاری واقعی تنظیم کرد و به‌صورت بالقوه نتایج آزمایشگاهی می‌توان تولید کرد که به سازه‌های جوشکاری شده واقعی منتقل می‌شوند.

با این حال، چون هندسه‌ی نمونه تمرکز تنش بالایی در فلز جوش ایجاد می‌کند، بنابراین آزمون‌های (LB-TRC و TRC) برای ارزیابی (HIC) منطقه‌ی فلز جوش مناسب است، اما برای ارزیابی (HIC) منطقه‌ی متأثر از حرارت مناسب نیست. این امر نشان می‌دهد که با توسعه فولادهای استحکام بالاتر، حساسیت ترک سرد جوش‌ها با استفاده از فلزات جوش تعیین خواهد شد. بنابراین در این گزارش تلاش شده است تا روشی برای ارزیابی حساسیت ترک سرد فلزات جوش به‌صورت کمی اما با استفاده از نمونه‌های کوچک و به‌سادگی ولی با تکرارپذیری بالا ارائه شود.

بررسی روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین مقاومت به ترک سرد نشان می‌دهد که روش LB-TRC حساسیت خوبی به بروز این عیب دارد و به نظر می‌رسد با اصلاح و بومی‌سازی آن بتوان اطلاعات خوبی در خصوص بروز این نوع ترک در الکترودهای مختلف استخراج کرد [10,11].

### مواد و روش پژوهش

شکل (1) شماتیک کلی از آزمون LB-TRC است که تمامی تجهیزات مورد استفاده در آن مشخص است [13].

برند انریک که دارای گیج فشار بود استفاده شد، که این پمپ هیدرولیک از طریق یک شیلنگ به جک هیدرولیک متصل شده و اعمال نیرو به صورت دستی انجام شد.

### لودسل

لودسل یک نوع حسگر (سنسور) الکترونیکی برای اندازه گیری وزن و نیرو است که با اعمال نیرو بر روی آن یک سیگنال الکتریکی ضعیف در حد میلی ولت روی سیم های خروجی آن ظاهر می شود. در واقع لودسل یک مبدل یا ترانسدویسر هست که نیرو و فشار را به سیگنال های الکتریکی استاندارد تبدیل می کند و در انواع کششی، خمشی، فشاری و بیجشی ساخته شده است. که در این پروژه از لودسل سری با ظرفیت 5 تن استفاده شد.

### دیتالاگر

ثبت کننده داده یا دیتالاگر و یا داده بردار وسیله ای است که داده های اندازه گیری شده بوسیله خود و یا بوسیله یک حسگر یا دستگاه خارجی را در طول زمان ذخیره می کند. اکثر دیتالاگرها معمولاً کوچک و قابل حمل بوده و کاربرد آزمایشگاهی و تست و اندازه گیری دارند. دیتالاگرها دارای یک حسگر بوده که داده پارامتر مورد نظر را اندازه گیری کرده و سپس در حافظه داخلی خود ذخیره می کنند. برخی از ثبت کننده ها دارای نمایشگر بوده و می توان داده های ذخیره شده را در آن مشاهده کرد. دیتالاگرها معمولاً از طریق رابط USB به کامپیوتر وصل شده و با نرم افزار مخصوص دیتالاگرها می توان داده های اندازه گیری شده را بر روی کامپیوتر مشاهده و پردازش کرد. در این پروژه از یک دیتالاگر چهار کانال ورودی 16 بیتی با قابلیت داده برداری هم زمان (8 کانال مالتی پلکس) و همچنین نرخ نمونه برداری و ذخیره سازی حداکثر 500 نمونه در ثانیه استفاده شد. جهت انجام این آزمایش و بررسی آن در تنش های مختلف باید یک پیش بینی در رابطه با سطح مقطع اولیه صورت گیرد تا با توجه به این مقدار پیش بینی شده نیروی متناسب با آن را اعمال نمود. همچنین این پیش بینی (حدس) به دلیل جلوگیری از اتلاف وقت، از لحاظ این که در هر آزمایش نمونه جوشکاری شده باید بریده شود و آماده سازی جهت آزمایش های بعدی انجام گیرد، از طرفی نمی توان از روش صحیح و خطا به دلیل هزینه های زیاد استفاده نمود. بنابراین برای پیش بینی سطح مقطع از روش تاگوچی استفاده شد. که در این طراحی آزمایش پارامترهای مؤثر بر سطح مقطع جوشکاری به کمک نرم افزار مینی تب در نظر گرفته شد. که طراحی آزمایش صورت گرفته و جهت اطمینان بیشتر این آزمایش ها دو بار تکرار شده است و نتایج به صورت میانگین گزارش شده است. که این پیش بینی سطح مقطع در مطالعات قبلی صورت گرفته است [12]. بخش اصلی این آزمون آن است که نمونه مورد نظر جوش و کشیده شود ولی نکاتی در رابطه با این آزمایش باید متذکر شد تا به نتایج مطلوب منتهی شود. از جمله نکاتی که باید رعایت شود این است که - برای بررسی هیدروژن نفوذی این آزمایش صورت می گیرد پس باید نمونه جوش شده بلافاصله بر روی دستگاه بسته شود تا هیدروژن نفوذ کرده خارج نشود.

- دوم آن که سرعت انجام عمل جوشکاری باید یکنواخت باشد تا ناپیوستگی در سطح محل جوش ایجاد نشود.

- سوم آن که در هنگام جوش دو نمونه باید کاملاً با اهرم فیکس شده و نباید هیچ گونه فاصله ای بین آن ها به وجود آید زیرا که این نقطه شروع ترک است و ما را از هدف دور می کند و نکات دیگری که ما را به نتیجه مطلوب برساند.

بعد از هر آزمایش آثار جوش آزمایش قبلی باید بریده شده، سپس سمباده زنی با سمباده 220 انجام شده، سطح کار با استون تمیز کاری و سپس آزمایش بعدی انجام شود.

در این پژوهش از الکتروود روکش دار قلیایی با قطر 3/2 میلی متر استفاده شده است که در استاندارد انجمن بین المللی جوش به E 11018 معروف است. بیشترین کاربرد آن را می توان در جوشکاری فولادهای ساختمانی منگنز دار بدنه کشتی ها پل ها و مخازن تحت فشار و... مشاهده کرد. نوع الکتروود به علت ساخت فلز جوش با هیدروژن کم برای جوشکاری فولادهای کم آلیاژ که در مقابل ترک برداشتن منطقه مجاور جوش حساس هستند بسیار مناسب است. شایان به ذکر است که به دلیل کاربرد زیاد این الکتروود در صنایع دریایی کشور، شناخت دقیق رفتار آن نسبت به متغیرهای جوشکاری مؤثر بر ترک هیدروژنی می تواند از احتمال وقوع خطرات ناشی از ترک هیدروژنی در فلز جوش بکاهد. ترکیب شیمیایی الکتروود طبق ادعای شرکت سازنده آن در جدول 1 ذکر شده است که E 11018 (1) مربوط به شرکت سازنده و E 11018 (2) ترکیب شیمیایی بدست آمده از آزمون کوانتومتری است.

همانطور که اشاره کردیم جنس نمونه ها St37 بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 ذکر شده است. با توجه به اندازه گیری درجه رقت در آزمون های مختلف الزامی جهت استفاده از فولادهای استحکام بالا دیده نشد [13].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی الکتروود و فلز پایه

	N	C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
E 11018 (1)	-	0.1	-	-	0.6	1.3-1.8	0.4	1.25-2.5	0.25-0.5
E 11018 (2)	-	0.056	0.025	0.015	0.6	1.43	0.015	1.33	0.26
St37	0.14	0.19	0.045	0.045	0.35	1.5	0.15		

جدول ۲- خواص مکانیکی الکتروود E11018

استحکام تسلیم (Ksi N/mm2)	استحکام کششی (Ksi N/mm2)	از زیاد طول (%)	مقاومت ضربه (F.T-I.Lbs)
۷۲۰ (۱۰۴)	۸۲۰ (۱۱۹)	۲۳	-۵۱.۸ (-۶۰.۵۹)

### نتایج و بحث

در این روش رابطه بین تنش و زمان شکست به صورت نمودار مشخص می شود. همچنین در این آزمون جوش پذیری می توان از روش های متداول جوشکاری به عنوان مثال **GMAW**، **GTAW**، **SAW** استفاده کرد. در این پژوهش فرایند مورد استفاده فرایند **SMAW** است.

در تمامی تست های صورت گرفته مقدار آمپر ورودی 150 آمپر، سرعت 150 میلی متر بر دقیقه و ولتاژ تقریبی حدود 30-32 ولت بوده است. تمامی تست های گرفته شده تحت بارهای ثابت قرار گرفته شد و نمودارهای مربوط به تنش و زمان شکست نمونه مورد بررسی

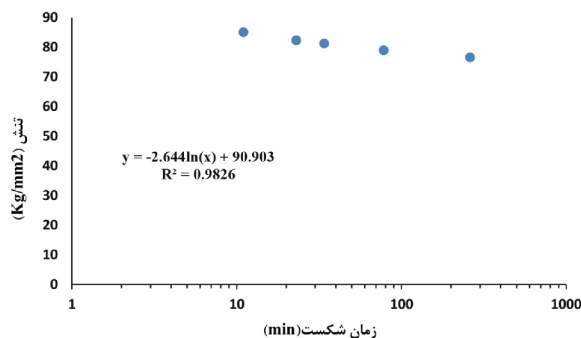
قرار گرفت، که در ادامه نمودارهای مربوط به هر یک از تست‌ها انجام شده ذکر شده است. جدول زیر اطلاعات مربوط به تست‌های انجام شده است [۱۳].

جدول ۳- اطلاعات مربوط به تست‌های انجام شده

ردیف	آمپر	سرعت	ولتاژ	تنش واقعی (kg/mm <sup>2</sup> )	زمان شکست (min)
۱	۱۵۰	۱۵۰	۳۰٫۸	۸۵٫۰۸۸	۱۲
۲	۱۵۰	۱۵۰	۳۰٫۲	۸۱٫۲۵	۳۴
۳	۱۵۰	۱۵۰	۳۱٫۴	۷۶٫۵۹	۲۶۱
۴	۱۵۰	۱۵۰	۳۰٫۴	۸۲٫۳۹	۲۳
۵	۱۵۰	۱۵۰	۳۲٫۸	۷۹٫۰۱	۷۸

ذکر شده می‌توان مقدار زمان شکست برای تنش‌های مختلف را به دست آورد، علاوه بر این نیز می‌توان به این موضوع پی برد که شکست در تنشی کمتر از تنش بحرانی رخ نمی‌دهد، این به نوع ماده و مقدار هیدروژن موجود بستگی دارد.

این نتایج نشان‌دهنده رفتار تعویق ترک هیدروژنی القایی در آزمون LB-TRC است. همچنین با توجه به مطالعات قبلی تنش بحرانی کمتر و زمان شکست در آزمون LB-TRC و TRC مشابه است. که همه این نتایج نشان از معتبر بودن آزمون LB-TRC جهت بررسی ترک هیدروژنی هست [۱۸].



شکل ۴- رابطه بین تنش اعمالی و زمان شکست برای الکتروود ۱۱۰۱۸ بدون پیش گرم

#### جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به مشاهدات به دست آمده از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که:

- آزمون LB-TRC برای ارزیابی حساسیت به ترک سرد فلز جوش برای فولادهای استحکام بالا مناسب است.

- دلیل ظرفیت کم دستگاه و صرفه جویی در فلز پایه (فلزهای استحکام بالا) که معمولاً هزینه‌های این فلزات بسیار سرسام آور هستند بسیار مناسب است.

- با استفاده از رابطه‌ی به دست آمده از تنش‌های ثابت و مدت زمان شکست می‌توان پیش‌بینی‌هایی در رابطه با زمان شکست با توجه به تنشی که اعمال می‌شود به دست آورد.

#### منابع

1-J. Du Plessis, "Control of diffusible weld metal hydrogen through arc chemistry modifications,"  
2-S. Gedeon and T. Eagar, "Thermochemical analysis of hydrogen absorption in welding,"  
Welding Journal, vol. 69, no. 7, pp264-271.

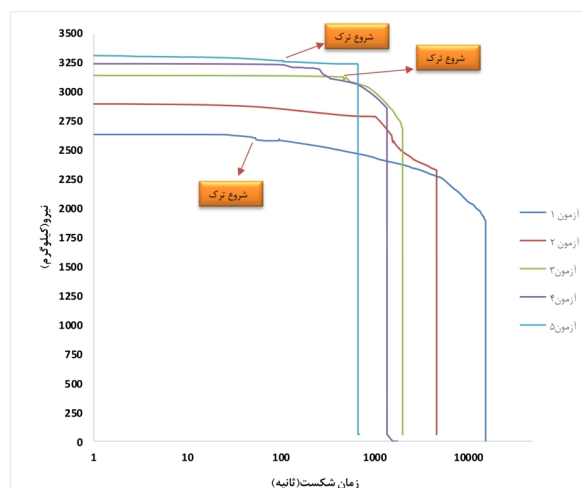
3-م. معینیان، "کلید جوشکاری چاپ اول"، ۱۳۸۴.

4-J. L. Davidson, "The Hydrogen-Induced Cracking Resistance of Consumables for Use in the Fabrication of the COLLINS Class Submarines,"  
AERONAUTICAL AND MARITIME RESEARCH LAB MELBOURNE (AUSTRALIA), 1996.

5-C. Stockford et al., "H2FC SUPERGEN: An overview of the Hydrogen and Fuel Cell research across the UK," international journal of hydrogen energy, vol. 40, no. 15, pp. 5534-5543, 2015.

شکل مربوط به تست‌های صورت گرفته بر حسب نیرو-زمان شکست است. که این نمودارها با نمودارهای تنش نسبت به سطح انرژی حاصله از تست غیر مخرب **Acoustic Emission (AE)** مقایسه شد. نتایج مقایسه‌های صورت گرفته نشان از این دارد که ارتباط بین نیروی اعمال شده در مقابل زمان و انتشار امواج آکوستیک آمیشن متناظر با آن دیده می‌شود [۱۴]. در هر بار افزایش بار، سیگنال‌های آکوستیک آمیشن تولید می‌شوند. در مدتی که بار ثابت نگه داشته شده است سیگنالی وجود ندارد. انتشارهایی که در حین ثابت نگه داشتن بار اتفاق می‌افتد اکثراً نشان‌دهنده عیوب بارز سازه هستند. انتشارهای سازه‌ای که قبلاً بارگذاری شده است به راحتی قابل تفسیر نیستند، این امواج ممکن است بر اثر ناپیوستگی‌ها رخ دهد [۱۷-۱۵].

با توجه به نمودارهای حاصل در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که در تنش‌های ثابت مربوط به هر آزمون پس از گذشت زمان با افت نیرو مواجه است که این نشان از وقوع عیب و یکسری ناپیوستگی‌ها است، که با گذشت زمان این ناپیوستگی‌ها منجر به شکست نمونه می‌گردد.



شکل (۳) نمودار تنش بر حسب زمان شکست نمونه [۱۴]

با توجه به شکل ۴ زمان شکست با کاهش تنش اعمالی افزایش یافت. با توجه به رابطه به دست آمده از تنش بر حسب زمان که در شکل ۴

14-Martelo, D., Sampath, D., Monici, A., Morana, R. and Akid, R., 2019. Correlative analysis of digital imaging, acoustic emission, and fracture surface topography on hydrogen assisted cracking in Ni-alloy 625+. *Engineering Fracture Mechanics*, 221, p.106678.

15-Merson, E.D., Myagkikh, P.N., Klevtsov, G.V., Merson, D.L. and Vinogradov, A., 2019. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 210, pp.342-357.

16-Lacidogna, G., Accornero, F. and Carpinteri, A., 2019. Influence of snap-back instabilities on Acoustic Emission damage monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, 210, pp.3-12.

17-Verma, R.K., Nguyen, G.D., Karakus, M. and Taheri, A., 2021. Capturing snapback in indirect tensile testing using AUSBIT-Adelaide University Snap-Back Indirect Tensile test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, p.104897.

18-Matsuda, F., Nakagawa, H. and Shinozaki, K., 1979. The LB-TRC test for cold crack susceptibility of weld metal for high strength steels )materials, metallurgy, weldability(. *Transactions of JWRI*, 8)1(, pp.113-119.

پی نوشت

1- کارشناسی ارشد مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

2- دانشیار دانشکده مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (گروه فرآیند ساخت)

6-E. Viyanit, "Numerical simulation of hydrogen assisted cracking in supermartensitic stainless steel welds," *Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung* (BAM), 2005.

7-N. Bailey, F. R. Coe, T. Gooch, P. Hart, N. Jenkins, and R. Pargeter, *Welding steels without hydrogen cracking*. Woodhead Publishing, 1993.

8-A. Handbook, "Welding, brazing and soldering," *ASM international*, vol. 6, p. 1187, 1993.

9-J. C. Lippold, *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons, 2014.

10-Matsuda, F., Nakagawa, H., Shinozaki, K., Takaba, S. and Kihara, H., 1981. Effect of Residual Hydrogen Content on Cold Crack Susceptibility in Weld Metal of High Strength Steels. *Transactions of JWRI*, 10)2(, pp.183-191.

11-Matsuda, F., Nakagawa, H. and Shinozaki, K., 1979. The LB-TRC test for cold crack susceptibility of weld metal for high strength steels )materials, metallurgy, weldability(. *Transactions of JWRI*, 8)1(, pp.113-119.

12-مهرداد حسین پور-علیرضا ابراهیمی، بکارگیری نرم افزار مینی تب برای تعیین سطح مقطع گرده جوش شیاری مورد استفاده در آزمون جوش پذیری LB-TRC، یازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی (iMat2022)

13- مهرداد حسین پور-علیرضا ابراهیمی، بررسی مقاومت به ترک سرد الکتروود ۱۱۰۱۸ به روش LB-TRC، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سال ۱۴۰۱



## بررسی ریز ساختار و رفتار خوردگی داغ اتصال TLP سوپر آلیاژ Hastelloy X

حمید بختیاری<sup>۱</sup>، محمد رضا رحیمی پور<sup>۱</sup>، محمد فرویزی<sup>۱</sup>، احمد ملکان<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش اتصال فاز مایع گذرای سوپر آلیاژ هستالوی X با استفاده از لایه واسط BNi-2 انجام شد. بررسی ریز ساختار خوردگی داغ اتصال های انجام شده در مخلوط نمک  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{V}_2\text{O}_5$  و در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. ریز ساختار اتصال با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز تفکیک انرژی (EDS) بررسی شد. تأثیر زمان اتصال ۵ دقیقه در دمای ۱۱۷۰ درجه سانتی گراد بر روی ریز ساختار خوردگی داغ این اتصال انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که ناحیه اتصال TLP شامل سه ناحیه مجزای ناحیه انجماد همدم (ISZ)، ناحیه انجماد غیر همدم (ASZ) و ناحیه متأثر از نفوذ (DAZ) می باشد. همچنین تصاویر الکترون برگشتی از ناحیه اتصال نشان داد که اتصال به دلیل انجماد غیر همدم حاوی بوراید های غنی از کروم و نیکل، سیلیسیدهای غنی از نیکل و فاز یوتکتیک Ni-Si می باشد. پس از انجام آزمون خوردگی داغ تصاویر ریز ساختاری وجود حفره ها و تشکیل پوسته روی مواد در سطوح اتصال را نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که اکسیژن عنصر اصلی در سطح در معرض توزیع است و تشکیل اکسید کروم نسبتاً سریع نسبت به اکسید های نیکل و آهن در دماهای بالا است.

**کلمات کلیدی:** اتصال فاز مایع گذرا، سوپر آلیاژ Hastelloy X، خوردگی داغ، ریز ساختار.

### ۱- مقدمه

هواپیماهای بوئینگ استفاده می شود. جوشکاری Hastelloy X به دلیل ایجاد ترک های داغ در حین جوشکاری چالش بالایی ایجاد می کند [۲]. این ترک ها به دلیل تامین حرارت زیاد روی سطح فلز ایجاد می شوند. همچنین در توربین های گاز، استفاده از سوخت های بی کیفیت حاوی ناخالصی هایی مانند  $\text{Na}$  و  $\text{V}$  می تواند منجر به تخریب زود هنگام اتصال با دمای بالا در اثر خوردگی داغ در طول عملیات سرویس شود. سوپر آلیاژ های مبتنی بر نیکل به طور گسترده در اجزای مقاطع داغ استفاده می شوند که به طور مکرر در معرض عملیات دمای بالا در دوره های زمانی طولانی قرار می گیرند. به منظور دستیابی به استحکام مطلوب، مقاومت در برابر خزش و

تقاضای زیاد برای استفاده مواد در دمای بالا، انواع مختلفی از مواد جدید را وارد صنایع هوافضا کرده است. Hastelloy X متعلق به دسته سوپر آلیاژ Ni-Cr-Fe-Mo است. وجود عناصری مانند Mo و Ni خواص دمایی بالاتری را ارائه می کنند. افزودن بیشتر کروم به مواد باعث بهبود مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون می شود. این سوپر آلیاژ عمدتاً در کاربردهای دمای بالا که به مقاومت در برابر استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی بهتر و مقاومت در برابر اکسیداسیون نیاز می باشد، استفاده می شود [۱]. این سوپر آلیاژ بیشتر در قطعات هوافضا مانند قوطی احتراق، پس سوز و لوله آگزوز

پایداری ریزساختاری در دمای بالا، محتوای **Al** و **Cr** در این سوپرآلیاژها به مقدار کمتری ترکیب می شود. این ترکیب منجر به کاهش شدید مقاومت در برابر خوردگی داغ مواد می شود. خوردگی داغ به دو نوع تقسیم می شود: نوع ۱ که خوردگی داغ با دمای بالا (**LTHC**) و نوع دوم که خوردگی داغ با دمای پایین (**LTHC**) است. **LTHC** معمولاً در محدوده دمایی حدود ۸۲۵-۹۵۰ درجه سانتیگراد مشاهده می شود که فاز متراکم به وضوح مایع است [۳].

ساتیشکومار و مانیکاندان [۳] تاثیر جوشکاری جریان پالسی را بر رفتار خوردگی داغ جوش **Hastelloy X** در دو شرایط مختلف نمک مذاب (مخلوطی از  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ،  $\text{V}_2\text{O}_5$  و  $\text{NaCl}$ ) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که توسعه دستاوردهای ریزتر و تعداد زیادی مرز دانه به همراه فازهای محافظ مقاومت در برابر خوردگی را بهبود می بخشد [۴]. چلاگانش و همکاران [۵] اثر نمک های مذاب را بر روی سوپرآلیاژهای مختلف در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵۰ سیکل (۵۰ ساعت) بررسی کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که وجود اکسیدهای اسپینل روی سطح به مقاومت در برابر خوردگی بهتر نسبت داده می شود. ساتیشکومار و همکاران [۶] تاثیر جوشکاری پلاسما سوراخ کلید (**K-PAW**) را بر روی **Hastelloy X** بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که **K-PAW** نتایج پایین تری نسبت به فلز پایه ارائه می دهد. اما با توجه به قابلیت های روش اتصال فاز مایع گذرا (**TLP**) می توان در خصوص اتصال سوپر آلیاژ **HX** به گونه ای عمل نمود که چالش های ناشی از فرایندهای جوشکاری ذوبی آن ها بر طرف گردد. بنابر این در این تحقیق برای اتصال سوپر آلیاژ **HX** از این روش مورد استفاده شد و سپس خوردگی داغ آن مورد بررسی ریز ساختاری قرار گرفت.

اتصال **TLP** یک فرایند اتصالی نسبتاً جدید است که با استفاده از یک لایه واسط انجام می شود. در هنگام حرارت دادن، لایه واسط ذوب می شود و عنصر بین لایه ای (یا جزء) تشکیل دهنده لایه واسط آلیاژی در مواد زیر لایه پخش می شود و باعث انجماد همدمای می شود. نتیجه این فرایند اتصالی است که نقطه ذوب بالاتری نسبت به دمای اتصال دارد. این فرایند کاربردهای زیادی پیدا کرده است که مهمترین آن ها اتصال و تعمیر اجزای سوپرآلیاژ مبتنی بر نیکل است. مزیت اصلی پیوند **TLP** این است که اتصال های حاصل نقطه ذوب بالاتری نسبت به دمای اتصال دارند. این فرایند اتصال مشخصاً بین باند انتشار و لحیم کاری قرار دارد. به همین دلیل، معمولاً به آن لحیم کاری نفوذی می گویند. در تحقیق حاضر تأثیر زمان نگهداری بر رفتار خوردگی داغ اتصال **TLP** سوپر آلیاژ پایه نیکلی **Hastelloy X** در مخلوط نمک خورنده **Na2SO4-20%V2O5** در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد مورد ارزیابی قرار گرفت. خصوصیات متالورژیکی فصل مشترک اتصال و فلز پایه با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم **EDS** بررسی شده است.

## 2- مواد و روش ها

در این تحقیق، نمونه های آلیاژ **HX** با ابعاد  $5 \times 10 \times 10$  میلی متر با فرایند اتصال **TLP** با استفاده از فویل **BNI-2** با ضخامت  $70 \mu\text{m}$  به

هم متصل شدند. ترکیب های شیمیایی فلز پایه و لایه میانی در جدول (۱) ارائه شده است. برای انجام فرایند اتصال، سطح تماس نمونه ها با کاغذ سنباده کاربید سیلیسیم تا شماره ۸۰۰ سمباده زنی و سپس پولیش شد. پاکسازی با آلتراسونیک در حمام استون به مدت ۱۵ دقیقه بر روی نمونه ها صورت گرفت. لایه واسط **BNI2** بین دو نمونه به صورت ساندویچی قرار داده شد. فرایند اتصال **TLP** در کوره الکتریکی تیوبی در دمای  $1070^\circ\text{C}$  به مدت **5 min** تحت خلاء **4-10-5 torr** انجام شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ **HX** و لایه واسط **BNI2**

عنصر	B	Ti	Al	P	S	Si	C	W	Co	Mo	Fe	Cr	Ni
HX	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۴۶	۰/۰۸	۱/۱۳	۸/۸۴	۱۸/۱۶	۲۱/۲۱	باقی مانده
BNI2	۳/۱	-	-	-	-	۴/۵	-	-	-	-	۳/۱	۷/۱	باقی مانده

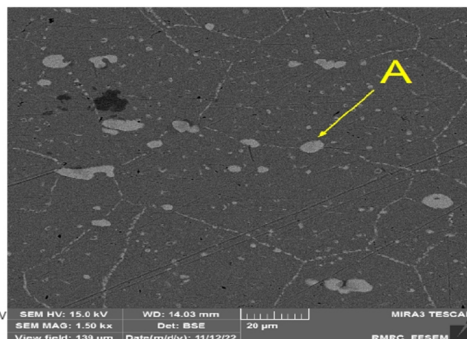
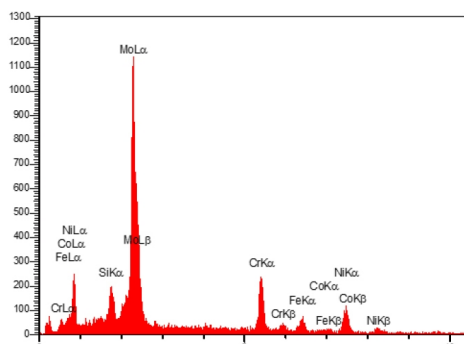
جدول ۲- ترکیب نمک مورد استفاده برای آزمایش خوردگی داغ

اجزای مخلوط نمک	درصد وزنی	نقطه ذوب ( $^\circ\text{C}$ )
سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	۴۰	۸۸۴
پنتا اکسید وانادیوم ( $\text{V}_2\text{O}_5$ )	۶۰	۶۷۰

برای انجام آزمایش خوردگی داغ از روش کوره ای و مخلوط نمک با ترکیب ارائه شده در جدول (۲) استفاده شد. آزمایش کوره ای به روش همدمای در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد و در زمان های ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت انجام شد. ترکیبات خورنده اصلی در فرایند خوردگی داغ  $\text{V}_2\text{O}_5$  و  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  هستند، لذا مواد مذکور از نوع خلوص بالا و به صورت پودری با نسبت وزنی ۵۵ درصد وزنی **V2O5** و ۴۵ درصد وزنی **Na2SO4** مخلوط شده و به مقدار  $2\text{mg}/\text{cm}^3$  بر روی سطح نمونه ها پخش گردید تا فیلم یکنواختی از ماده خورنده بر سطح تشکیل شود. بعد از تثبیت دمای کوره در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد بوتله ها برای زمان های ذکر شده داخل کوره قرار داده شدند. پس از انجام آزمایش خوردگی داغ نمونه ها تحت فرایند آماده سازی جهت بررسی ریز ساختاری قرار گرفتند. مشخصه های ساختاری فصل مشترک اتصال و فلز پایه بعد از آزمون خوردگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (**SEM**) و طیف سنجی پراکنشی انرژی با پرتو ایکس (**EDS**) مدل **TESCAN** مورد ارزیابی قرار گرفت.

## 3- نتایج و بحث

در شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی سوپر آلیاژ پایه نیکلی **HX** نشان داده شده است. **HX** با مکانیزم ایجاد محلول جامد مستحکم شده است. عملیات حرارتی نهایی این آلیاژ برای رسیدن به ساختار مناسب باز پخت در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی گراد و سپس خنک سازی سریع در هوا است. زمینه ی پیوسته ای از فاز آستنیت با ساختار شبکه ای **FCC** در ساختار سوپر آلیاژهای پایه نیکل وجود دارد که گاما ( $\gamma$ ) نامگذاری شده است. در **HX** این فاز حاوی مقادیر زیادی از عناصر **Cr**، **Fe** و **Mo** و نیز درصد کمتری از عناصر **W** و **Co** است. با توجه به وجود اندک عناصری مانند **Ta**، **Hf**، **Al** و **Ti** در ترکیب شیمیایی **HX**، تشکیل فاز  $\gamma$  در ساختار این آلیاژ بعید به نظر می رسد. ریزساختار آلیاژ شامل یک زمینه آستنیت همراه با



شکل ۱- تصویر SEM سوپر آلیاژ HX و آنالیز EDS مربوط به نقطه A در آن.

در آنالیز قابل مشاهده است (جدول ۳). نتایج EDS توزیع عناصر آلیاژی اصلی **Cr**، **Ni** و **Fe** را پس از خوردگی داغ نشان می دهد. همچنین نشان می دهد که اکسیژن عنصر اصلی در سطح در معرض توزیع است. تشکیل اکسید کروم نسبتاً سریع نسبت به اکسیدهای نیکل و آهن در دماهای بالا است. در مواجهه طولانی مدت،  $Cr_2O_3$  محافظ (کرومیا) با سایر اکسیدهای فلزی (فلز 'M' ممکن است **Ni**، **Fe** یا **Co** باشد) واکنش نشان می دهد و اسپینل را تشکیل می دهد (به عنوان مثال **Nichromite-NiCr\_2O\_4**) و انحلال جزئی با نمک مذاب در دمای بالا رخ می دهد.

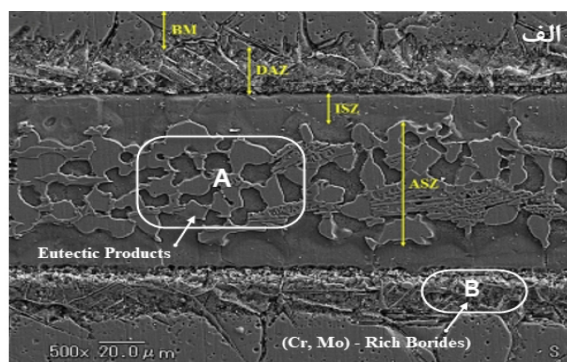
تصاویر EDS هر سه نمونه اتصال سوپر آلیاژ نشان می دهد که در نقاطی که ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال تجمع داشته اند اثر خوردگی داغ بیشتر نمود پیدا کرده است، این نکته در شکل (۳-ب) قابل مشاهده است. از طیف انرژی EDS، سدیم حاصل از نمک مذاب به شدت بر روی سطح تشکیل می شود که در **Hastelloy X** دیده می شود. در پایان ۱۰ ساعت خوردگی داغ؛ سطح نمونه با تولید اکسید و حفره مشاهده می شود که می تواند احتمال خوردگی حفره ای را بالا ببرد. این به دلیل فعال شدن سطحی فلزات و میل ترکیبی آهن به نمک مذاب است. برای بررسی و نشان دادن جزئیات در مورد نمونه ها بیشتر در معرض تجزیه و تحلیل SEM و EDS قرار گرفتند. برجستگی های کوچک با بزرگنمایی بیشتر از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه و تحلیل طیف اجرا شده با استفاده از EDS مشاهده شدند. تصویر SEM با بزرگنمایی بالاتر رشد اکسید را نشان می دهد. تجزیه و تحلیل طیف EDS نشان می دهد که عنصر غالب نیکل و کروم به شکل اکسید هستند.

#### 4- نتیجه گیری

اتصال TLP سوپر آلیاژ **Hastelloy X** رفتار خوردگی داغ در معرض مخلوط ترکیبی نمک های  $V_2O_5$  و  $Na_2SO_4$  در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت بررسی شد. از نتایج، نکات زیر به عنوان نتیجه گیری استخراج می شوند: بر اساس مشاهدات ریزساختاری ناحیه اتصال TLP از سه ناحیه مجزا تشکیل شده است: ناحیه انجماد همدم (ISZ)، ناحیه انجماد غیرهمدم (ASZ) و ناحیه متأثر از نفوذ (DAZ). نتایج تصاویر الکترون برگشتی از ناحیه اتصال نشان داد که اتصال به

کاربید  $M_6C$  غنی شده در عنصر **Mo** است که در شکل (۱) مشخص شده است [۲۰-۱۸]. این ذرات ریز و کروی در مرز دانه ها باعث ممانعت از خزش دانه ها و در نتیجه افزایش استحکام خزشی می گردد.

شکل (۲) ریز ساختار SEM نمونه اتصال داده شده با روش TLP در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است ناحیه اتصال از سه منطقه متأثر از نفوذ (DAZ) (متشکل از انواع بوراید ها به دلیل نفوذ بور به داخل فلز پایه بیش از حد انحلال)، منطقه منجمد شده به صورت همدم (ISZ) (شامل محلول جامد پرویوتکتیک) و منطقه منجمد شده به صورت غیر همدم (ASZ) که شامل فازهای شبه یوتکتیک بوده که به دلیل زمان کم نگهداری فرایند جهت تکمیل انجماد همدم شکل گرفته است، تشکیل شده است. همان طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، نتایج تصویر الکترون برگشتی از ناحیه اتصال نشان می دهد که به دلیل انجماد غیر همدم بوراید های غنی از کروم و نیکل، سیلیسیدهای غنی از نیکل و فاز یوتکتیک **Ni-Si** تشکیل شده اند.

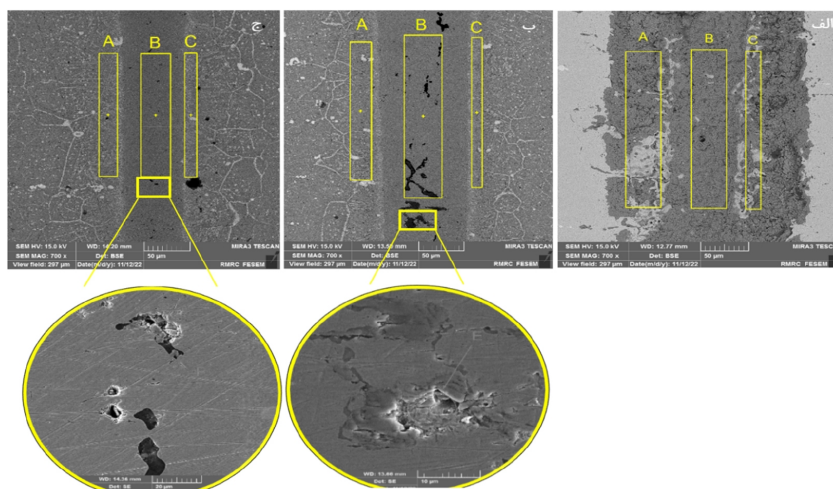


شکل ۲- تصویر SEM اتصال TLP سوپر آلیاژ HX

از مشاهده تصاویر EDS (شکل ۳)، تخریب اتصال به دلیل حمله خوردگی مداوم به وضوح قابل مشاهده است. حفره ها و تشکیل پوسته روی مواد در سطوح اتصال موجود است. در نمونه ای که ۵ ساعت در کوره قرار داده شده است وجود اکسیدهای کروم و نیکل

جدول ۳ - نتایج EDS اتصال TLP قبل و بعد از خوردگی (%Wt).

	اتصال TLP قبل از خوردگی		نمونه TLP پس از ۵ ساعت خوردگی			نمونه TLP پس از ۱۰ ساعت خوردگی			نمونه TLP پس از ۲۰ ساعت خوردگی		
	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C
O	-	-	26.84	36.88	33.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	-	-	0.08	0.27	0.32	0.49	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00
Si	0.19	0.01	0.07	1.39	0.75	1.07	6.13	1.92	1.20	5.33	2.19
K	-	-	0.05	0.09	0.06	0.17	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
V	-	-	0.86	3.25	1.18	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
Cr	3.62	26.03	62.78	33.18	53.84	21.19	6.68	20.54	21.53	9.18	17.80
Fe	1.98	2.70	3.43	3.67	3.17	16.36	3.41	12.04	15.30	5.33	11.37
Co	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.53	0.85	0.00	0.46
Ni	69.74	2.61	4.79	18.49	4.32	43.05	83.77	46.21	42.59	80.16	50.15
Mo	0.01	19.6	1.10	2.78	2.56	16.83	0.00	18.11	18.53	0.00	18.03



شکل ۳- تصویر SEM اتصال TLP سوپر آلیاژ HX در زمان های مختلف خوردگی داغ: الف: بعد از ۵ ساعت، ب: بعد از ۱۰ ساعت، ج: بعد از ۲۰ ساعت.

732: 228-239.

3-Sathishkumar, M., and Manikandan, M., "Hot Corrosion Behaviour of Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welded Hastelloy X in Different Molten Salts Environment," Mater. Res. Express 126553, 2016, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab562a>.

4-Manikandan, M., Arivarasu, M., Arivazhagan, N., Puneeth, T. et al., "High Temperature Corrosion Studies on Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welded Alloy C-276 in Molten Salt Environment," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 149, 2016.

5-Chellaganesh, D., Khan, M.A., and Jappes, J.T.W., "Hot Corrosion Behaviour of Nickel-Iron-Based Superalloy in Gas Turbine Application," Int. J. Ambient Energy 0750:1-5, 2018.

6-Sathishkumar, M., Naiju, C.D., And Manikandan, M., "Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties of Hastelloy X by Key-Hole Plasma Arc Welding Process," SAE Technical Paper 2019-28-0152, 2019.

دلیل انجماد غیر همدما حاوی بوراید های غنی از کروم و نیکل، سیلیسیدهای غنی از نیکل و فاز یوتکتیک Ni-Si می باشد. تصاویر SEM حفره ها و تشکیل پوسته روی مواد در سطوح اتصال را نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که اکسیژن عنصر اصلی در سطح در معرض توزیع است و تشکیل اکسید کروم نسبتاً سریع نسبت به اکسیدهای نیکل و آهن در دماهای بالا است. در مواجهه طولانی مدت خوردگی، تشکیل اسپینل های مانند Nichromite-NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و انحلال جزئی با نمک مذاب در دمای بالا مشاهده شد.

#### منابع

1-Ghasemi, A., Mohammad Kolagar, A., Pouranvari, M., "Microstructure-performance relationships in gas tungsten arc welded Hastelloy X nickel-based superalloy", Materials Science & Engineering A, 2020, 1-33.

2-Han Q, Mertens R, Montero-Sistiaga ML, et al. Laser powder bed fusion of hastelloy X: effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism. Mater Sci Eng A 2018

#### پی نوشت

- 1- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.
- 2- استاد، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.
- 3- دانشیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.
- 4- دکتری مهندسی مواد و متالورژی، شرکت توربین ماشین خاورمیانه، تهران، ایران.

## تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیسی همزمان با جوشکاری بر رفتار فرسایشی روکش فولاد زنگ نزن دوفازی روی فولاد ساده کربنی

محمد رخس ماه<sup>۱</sup>، رضا دهملابی<sup>۲</sup>، مهدی یگانه<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش رفتار فرسایش روکش‌های جوشی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ایجاد شده روی زیرلایه فولاد ساده کربنی A283 مورد مطالعه قرار گرفت روکش جوشی با استفاده از فرایند GTAW و سیم جوش ER2209 ایجاد گردید. همزمان با جوشکاری لرزش‌های الکترومغناطیس با فرکانس‌های مختلف از 0-350 Hz بر روی نمونه اعمال گردید. مطالعات میکروسکوپی نشان داد که اعمال لرزش‌های الکترومغناطیسی و افزایش فرکانس اعمالی، باعث افزایش ریزدانه‌گی و بیشتر شدن سهم آستنیت در ریزساختار روکش گردیده است. مشخص گردید که اعمال لرزش باعث بهبود رفتار فرسایش روکش جوشی و کمتر شدن کاهش وزن (بهبود مقاومت فرسایش) گردیده است. نتایج نشان داد که با اعمال لرزش و افزایش فرکانس لرزش به ویژه در فرکانس‌های بالا، نرخ فرسایشی به طور محسوسی کاهش یافته است. نتایج بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داد که فرسایش با مکانیزم شخم زنی (مکانیزم غالب) و ریزبرش رخ داده است.

**کلمات کلیدی:** روکش جوشی، رفتار فرسایش، فرایند GTAW، لرزش الکترومغناطیسی، نرخ فرسایش، شخم زنی.

### مقدمه

فولادها بزرگترین گروه از آلیاژهای مهندسی هستند که به تنهایی بیش از دیگر آلیاژها در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. در این بین فولادهای ساده کربنی بیشترین استفاده را جهت ساخت تجهیزات و قطعات صنعتی به خود اختصاص داده‌اند. با وجود داشتن مزایای خوب نظیر قیمت ارزان، سهولت تولید، شکل‌پذیری مناسب، جوش‌پذیری خوب (بسته به درصد کربن)، استحکام مناسب و... استفاده از این فولادها در محیط‌های خاص نظیر محیط‌های خورنده، محیط‌های تحت سایش و فرسایش، محیط‌های تحت تنش‌های پیچیده و... دارای محدودیت‌هایی است. استفاده از مواد مناسب در محیط‌های خورنده، تحت سایش و فرسایش و... مستلزم صرف هزینه‌های بسیار بالا می‌باشد. روش‌های متعددی جهت کاهش هزینه‌ها در این نوع موارد بکار گرفته می‌شود. یکی از روش‌های مناسب استفاده از یک روکش با خواص مناسب بر روی یک زیرلایه ارزان قیمت می‌باشد. به کارگیری این روش یک روش اقتصادی و مهندسی است [۴-۶]. اعمال روکش بر روی زیرلایه به روش‌های مختلفی نظیر آبکاری الکتریکی، پاشش حرارتی، پاشش

پلاسمایی، جوشکاری و... می‌باشد. جوشکاری یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین فرایندهای ایجاد روکش بر روی مواد مختلف می‌باشد. روش‌هایی نظیر جوشکاری لیزر، جوشکاری نوردی، جوشکاری انفجاری و فرایندهای GTAW، SAW و... برای ایجاد روکش جوشی استفاده می‌شود [۷، ۸]. به کمک روش‌های جوشی به دلیل اتصال مناسب با زیرلایه و ایجاد ضخامت کافی و کنترل ترکیب شیمیایی و رقت (با کنترل تعداد پاس جوش)، می‌توان مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، رفتار فرسایشی و خواص مکانیکی را بهبود بخشیده و طول عمر قطعه را افزایش داد [۱۰]. فولادهای زنگ نزن به دلیل مقاومت عالی به خوردگی و خواص مکانیکی و جوش‌پذیری مناسب، گزینه‌های بسیار مناسبی جهت ایجاد روکش بر روی فولادهای ساده کربنی هستند [۹]. در بین فولادهای زنگ نزن، فولادهای زنگ نزن دوفازی به دلیل مقاومت به خوردگی عالی و استحکام بسیار خوب (برتر از فولادهای زنگ نزن آستنیتی) بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱-۳]. این فولادها نام خود را از ریزساختار فریتی - آستنیتی با نسبت یکسان (۵۰ درصد فریت + ۵۰ درصد آستنیت) گرفته‌اند. برقراری تعادل فاز بین آستنیت و فریت قبل و بعد از جوشکاری از اهمیت خاصی برخوردار است [۷]. فولادهای زنگ نزن دوفازی دارای ضریب انبساط حرارتی نزدیک به فولادهای کربنی و کم آلیاژ می‌باشند، لذا به راحتی می‌توان آن‌ها را به هم متصل نموده و یا به عنوان روکش جوشی بر روی آن‌ها استفاده شود [۱]. ریزساختار و اندازه دانه‌های روکش جوشی نقش موثری در تعیین خواص مهندسی روکش نظیر مقاومت به خوردگی سایش، فرسایش، سختی، استحکام و چقرمگی دارند [۱۲]. روش‌های مختلفی نظیر تحریک خارجی، افزایش جوانه‌زا و... برای ریزدانه کردن دانه‌ها استفاده می‌شود [۱۱]. تحریک خارجی با اعمال لرزش الکترومغناطیسی همزمان با جوشکاری یکی از روش‌هایی است که امروزه مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. اعمال لرزش الکترومغناطیسی همزمان با جوشکاری با ایجاد تلاطم در مذاب و به هم زدن آن باعث شکست نوک دندریت‌های در حال انجماد گردیده که با ورود آنها به حوضچه مذاب و پایداری آنها (به دلیل کاهش دمای حوضچه ناشی از تلاطم مذاب) مراکز جوانه زنی غیرهمگن افزایش یافته و پس از انجماد فلز جوش ریزدانه‌تر خواهد شد [۱۵، ۱۶]. به اضافه اعمال لرزش با کمک به آزاد شدن گاز محبوس در مذاب، هم‌زدن و یکنواخت کردن و توزیع مناسب عناصر حل شده در حوضچه جوش، کاهش دمای حوضچه و افزایش سرعت سرد شدن مذاب نقش موثری در بهبود خواص مهندسی جوش ایفا

SEM مطالعه گردید.

## نتایج و بحث

شکل (۳) ریزساختار روکش ER2209 را قبل و بعد از اعمال لرزش با فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهد که ریزساختار روکش به صورت دوفازی فریتی و آستنیتی است که سهم فریت در آن بیش از آستنیت است. علت بیشتر بودن مقدار فریت این است که به دلیل سرعت بالا سرد شدن روکش در طی جوشکاری فرصت کافی برای انجام استحاله تبدیل فریت به آستنیت ایجاد نشده است. از مقایسه تصاویر مشاهده می‌شود که اعمال لرزش الکترومغناطیس اضافه بر کاهش اندازه دانه‌ها و ایجاد ریزدانه‌گی بیشتر، باعث تغییرات زیادی در مورفولوژی و مقادیر فازی فریت و آستنیت (تعادل فازی فریت و آستنیت) گردیده است. در واقع اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث شکست نوک دندریت‌ها و شناور شدن آن‌ها در فلز جوش گردیده است. از طرفی اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث کاهش دمای حوضچه جوش و لذا کمک به پایداری بیشتر نوک دندریت‌ها که به عنوان مراکز جوانه‌زنی غیر همگن عمل می‌کنند، شده است. افزایش مراکز جوانه‌زنی غیر همگن باعث کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش مرز دانه‌ها شده است. بنابراین اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث افزایش مقادیر آستنیت در ریزساختار فلز روکش و نزدیک شدن ساختار به نسبت مساوی فریت و آستنیت گردیده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس لرزش، ریزدانه‌گی افزایش یافته است (شکل ۳).

شکل (۴) نتایج آزمون فرسایش روکش جوشی قبل و بعد از اعمال لرزش الکترومغناطیسی با فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که با افزایش زمان آزمایش برای همه نمونه‌ها کاهش وزن بیشتری صورت گرفته و میزان فرسایش افزایش یافته است. از شکل به وضوح مشاهده می‌شود که با اعمال لرزش الکترومغناطیس و افزایش فرکانس لرزش نرخ فرسایش (شیب کاهش وزن) کاهش می‌یابد. که این نرخ کاهش وزن در فرکانس‌های بالاتر و زمان‌های طولانی‌تر مشهودتر است. اعمال لرزش و افزایش فرکانس اعمالی باعث ایجاد ریزدانه‌گی بیشتر، افزایش سختی و بهبود مقاومت در برابر فرسایش گردیده است. به اضافه افزایش فرکانس لرزش با بالا بردن سهم آستنیت در ریزساختار روکش اعمالی سبب بهبود مقاومت در برابر فرسایش گردیده است. مطالعات نشان داده که رفتار فرسایشی فولادهای زنگ نزن دوفازی به جهت گیری فاز آستنیت و فریت، خواص مکانیکی و عملکرد تغییر شکل این فازها بستگی دارد. در آزمون فرسایش هنگام برخورد ذرات ساینده (ذرات جامد معلق در دوغاب) به سطح نمونه هر دو فاز فریت و آستنیت شروع به تغییر شکل نموده تا اینکه فاز فریت به دلیل کارسختی پذیری کمتر، سریعتر به بیشترین میزان کارسختی خود می‌رسد، در حالیکه در این شرایط هنوز فاز آستنیت از خود انعطاف پذیری نشان می‌دهد که این امر باعث جذب مقادیر بیشتری انرژی بوسیله سطح نمونه می‌گردد. با ادامه برخورد ذرات ساینده با سطح نمونه، به دلیل

می‌کند [۱۴]. فرسایش به معنای از دست رفتن مواد در اثر برخورد با سیال حاوی ذرات جامد در بسیاری از صنایع و کاربردهای مهندسی نظیر کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، دریچه‌های کشویی سدها، خطوط لوله انتقال سیال و ... از مشکلات جدی و اساسی به حساب می‌آید. بررسی‌ها نشان داده‌است که اضافه بر آلیاژ استفاده شده، ماده ساینده، سرعت سیال، دمای سیال، شکل و اندازه ذرات ساینده و زاویه برخورد سیال ساینده نقش مهمی در رفتار فرسایشی تجهیزات دارند [۲۴]. در این پژوهش تاثیر اعمال همزدن لرزش الکترو مغناطیس با فرکانس‌های مختلف (0-350 Hz) بر روی ریزساختار و رفتار فرسایشی روکش جوشی ایجاد شده با فرایند GTAW مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

## روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولاد ساده کربنی A283 گرید C با ضخامت ۱۵ میلی‌متر به عنوان زیرلایه و سیم جوش ER2209 برای ایجاد روکش استفاده گردید. ترکیب شیمیایی زیرلایه و سیم جوش در جدول (۱) نشان داده شده است. روکش جوشی با استفاده از فرایند GTAW با شدت جریان ۱۰۵ آمپر، ولتاژ ۱۴ ولت و سرعت جوشکاری ۱/۲ میلی‌متر بر ثانیه بر روی زیرلایه ایجاد گردید. به منظور کاهش رقت و دسترسی به ترکیب شیمیایی سیم جوش، جوشکاری طی سه پاس انجام شد. اعمال لرزش الکترومغناطیسی همزمان با جوشکاری در فرکانس‌های 0-350 Hz با سیم‌پیچ مسی که در زیر کار تعبیه شده بود اعمال گردید (شکل ۱). به منظور مطالعه ریزساختار، ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر مکعب از قطعات جوشکاری شده جدا گردید. سطح همه نمونه‌ها با سنباده‌های ۳۰۰-۶۰۰ کاملاً پرداخت شدند و سپس با نمد مخصوص و پودر آلومینای ۰/۵ میکرون به خوبی پولیش گردیدند. حکاکی نمونه‌ها با محلول ماربل و به مدت ۵ ثانیه انجام گردید. سپس ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) مطالعه گردید.

به منظور انجام آزمون فرسایش نمونه‌های با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر مکعب از قطعات جوشکاری شده با فرکانس‌های مختلف جدا گردید و سطح روکش کاری شده نمونه‌ها تا سنباده ۱۵۰۰ پرداخت گردیده و سپس به کمک پودر آلومینای میکرونی پولیش شدند. نمونه‌های پولیش شده در دستگاه فرسایش قرار داده شدند (شکل ۲). آزمایش فرسایش با دوغابی شامل آب به همراه ۵ درصد وزنی ماسه سیلیسی با دانه بندی ۰-۱ میلی‌متر انجام گردید. آزمایش فرسایش با سرعت برخورد ۱۰ m/s و با زاویه برخورد ۳۰° طی مدت زمان ۴ ساعت انجام گردید. در طی آزمایش هر نیم ساعت یک بار نمونه از دستگاه خارج و وزن آن با ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 تعیین گردید. کاهش وزن نمونه‌ها به عنوان معیار فرسایش محاسبه و گزارش گردید. شکل (۲) شماتیک دستگاه فرسایش استفاده شده را نشان می‌دهد. برای تعیین مکانیزم فرسایش سطوح نمونه‌ها پس از آزمایش فرسایش، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی گاز محافظ با موفقیت بر روی زیرلایه فولاد کربنی A283 ایجاد گردید.

- ریزساختار فلز جوش با و بدون اعمال لرزش الکترومغناطیس تماما شامل فازهای فریت و آستنیت مشاهده گردید.

- مشخص گردید که اعمال لرزش الکترومغناطیس و افزایش فرکانس باعث ایجاد ریزدانه‌گی بیشتر و افزایش سهم آستنیت (کاهش سهم فریت) در روکش جوشی گردیده است.

- با افزایش زمان آزمایش فرسایش، مقدار کاهش وزن (فرسایش) همه نمونه‌ها افزایش نشان داده در حالیکه نرخ فرسایش به ویژه در فرکانس‌های لرزشی بالاتر زمان‌های طولانی‌تر به طور محسوسی کاهش یافت.

- اعمال لرزش الکترومغناطیسی و افزایش فرکانس لرزش باعث ریزدانه‌گی بیشتر روکش و کاهش میزان و نرخ فرسایش گردید.

- مشخص گردید که فرسایش با مکانیزم شخم زنی (مکانیزم غالب) و ریز برش گردیده است.

## منابع

1-Jiang ZhL, Chen XY, Huang H, Liu XY. Grain refinement of Cr25Ni5Mo1.5 duplex stainless steel by heat treatment. Mater Sci Eng A 2003; A363:263-7.

2-Chen TH, Weng KL, Yang JR. The effect of high temperature exposure on the microstructural stability and toughness property in a 2205 duplex stainless steel. Mater Sci Eng A 2002; A338:259-70.

3-Park YH, Lee ZH. The effect of nitrogen and heat treatment on the microstructure and tensile properties of 25 Cr-7Ni-1.5Mo-3W-xN duplex stainless steel castings. Mater Sci Eng A 2001; A297:78-84.

4-Acarer. M, Gulenc. B, Findik F. , Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength, Materials and design 2003; 24 : 659-664.

5-Khadadad A., Koçak M., Ventzke V., Mechanical and fracture characterization of a biomaterial steel plate, International Journal of pressure vessels and Piping 2002; 79: 181-191.

6-Venkateswara N., Madhusudhan. G., Nagarjuna S., 'Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel - Structure and properties', Materials and design 2011; 32: 2496-2506.

7-Argade GR, Shukla S, Liu K, Mishra RS (2018) Friction stir lapwelding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties. J Mater Process Technol 259:259-269.

8-Ganesh P, Moitra A, Tiwari P, Sathyanarayanan S, Kumar H, Rai SK et al (2010) Fracture behavior of laser-clad joint of Stellite 21 on AISI 316L stainless steel. Mater Sci Eng A 527(16-17):3748-3756.

9- Li C'a, Qin G, Tang Y, Zhang B, Lin S, Geng P (2020) Microstructures and mechanical properties of stainless-steel clad plate joint with diverse filler metals. J Mater Res Technol.

تفاوت در کارسختی پذیری دوفاز فریت و آستنیت، ترک در مرز آنها ایجاد می‌شود. بنابراین با استمرار فرایند فرسایش ترک ابتدا از فاز فریت شروع گردیده و به طرف دانه‌های آستنیت انتشار پیدا خواهد کرد [۱۷]. - با اعمال لرزش الکترومغناطیس ریزدانه‌گی و افزایش ریزساختار محوری صورت گرفته و لذا دانسیته مرز دانه‌ها (کاهش طول فصل مشترک فریت/آستنیت) افزایش یافته است که این عامل باعث تاخیر در حرکت نابجایی‌ها و انتشار ترک‌ها گردیده است [۱۸، ۱۹]. در پژوهش محققان نیز نتایج مشابهی بدست آمده است [۱۹]. شکل (۵) تصاویر SEM از سطح فرسایش یافته در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. در آزمایشات فرسایش با زاویه کم (نظیر  $30^\circ$ ) سطح وسیعی از سطح تحت آزمایش با دوغاب و ذرات ساینده در تماس بوده که این عامل باعث ایجاد نقطه اثر بیضی شکل حاوی شیار در سطح نمونه می‌گردد. به اضافه در زاویه برخورد کم ذرات ساینده و انحراف آن‌ها بدون تاثیرگذاری بر جریان ذراتی است که در حال وارد شدن و برخورد با سطح نمونه می‌باشند (در زاویه کم اثر کوشینینگ رخ نمی‌دهد). تصاویر در شکل (۵) نشان می‌دهد که مکانیزم غالب فرسایش شخم‌زنی و برش می‌باشد. در واقع برای انجام فرسایش یک میزان انرژی برای نفوذ ذرات به درون سطح نمونه (سته به سختی و داکتیلیته) مورد نیاز می‌باشد. در زوایای برخورد کم (در اینجا  $30^\circ$  درجه) مولفه عمودی انرژی سینتیکی KE یعنی  $KE \sin \alpha$  که در آن  $\alpha$  زاویه برخورد است ( $30^\circ$ )، نسبت به مولفه افقی  $KE \cos \alpha$  کمتر بوده که تحت این شرایط مولفه عمودی از انرژی ذرات ساینده صرف نفوذ به درون زمینه شده، در صورتی که انرژی مولفه افقی برای شخم زنی (برش دادن) سطح نمونه، با غلط خوردن ذرات بر روی سطح نمونه مصرف خواهد شد. چنانچه ذرات بر روی سطح نمونه حرکت کنند، باعث کنده شدن و فشردن فلز در سطح نمونه در جلوی مسیر حرکت ذرات می‌شوند. این عامل باعث ایجاد توده فلزی فشرده (تپه مانند) در ناحیه فرورفته خواهد شد (شکل ۵-ج). از این رو در اثر برخورد ذرات پر انرژی با زمینه این توده‌های فلزی فشرده شده که تا حدود زیادی نیز کارسخت شده اند، ترک خورده و دچار شکست ترد خواهند شد. در فرکانس‌های لرزش بالا به دلیل افزایش سهم آستنیت و لذا کارسختی پذیری بیشتر، تجمع این توده‌ها افزایش یافته و حجم توده تجمع یافته بیشتر خواهد شد. تحقیقات سایر پژوهشگران نتایج مشابهی را نشان داده است [۲۰]. اضافه بر مکانیزم شخم زنی، مکانیزم ریز برش (برش با زاویه کم) نیز به ویژه در فرکانس‌های بالا مشاهده می‌شود. در این حالت ذرات به جای نفوذ در زمینه، تنها به یک انرژی بحرانی برای برش فلز به صورت ورقه کوچک نیاز دارند. چنین مکانیزمی در فرسایش با زوایای کم توسط سایر محققان نیز گزارش گردیده است [۲۱-۲۳].

## نتیجه‌گیری

در زیر نتایج حاصل از این پژوهش به اختصار گزارش گردیده است:  
- روکش جوشی فولاد زنگ نزن دوفازی ER2209 با استفاده از

18-I. Finnie, G.R. Stevick, J.R. Ridgely, The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles, *Wear*, 152 (1992) 91-98.

19-A. Karimi, " Cavitation erosion of a duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering*, Vol. 86, 1987, pp. 191-203.

20-Md. AminulIslam, Z. N.Farhat, "Effect of impact angle and velocity on erosion of APIX42 pipeline steel under high abrasive feed rate" *Wear*, Vol. 311, 2014, pp.180-190.

21-Islam, Md Aminul, T. Alam, Z. N. Farhat, A. Mohamed, A. Alfantazi. Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel, *Wear* 332 (2015) 1080-1089.

22-Islam, M. Aminul, Z. N. Farhat, Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate, *Wear* 311 (2014) 180-190.

23- I. M. Hutchings, Mechanism of the erosion of metals by solid particles, *Erosion : Prevention and Useful Applications*, ASTMSTP,664, ASTM, (1979)59-76.

24- حسینی ناصری، رضا دهملایی، خلیل رنجبهر، تاثیر لرزش الکترومغناطیسی بر تغییرات ریزساختاری و رفتار فرسایش فلز جوش فولاد HSLA-100، فصلنامه علوم مهندسی سطح ایران، دوره ۱۴، شماره ۳۶

## پی نوشت

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد جوشکاری، دانشگاه شهید چمران اهواز
- 2- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز
- 3- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

10-Saha, M.K.; Das, S. Gas Metal Arc Weld Cladding and its Anti-Corrosive Performance-A Brief Review. *Athens J. Technol. Eng.* 5 (2018) 155-174.

11- Kou, Sindo, *Welding metallurgy*, New Jersey, USA (2003): 431-446.

12- S.S.ghasemi, transformation characteristics and structure-property relationship for a copper bearing HSLA steel, university of Wollongong, (1996).

13-Cui, Yan, C.L.Xu, Q. Han. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation, *Scripta Materialia* 55 (2006): 975-978.

14-T. Watanabe, M.shiroki, A.Yanagisava, T.Sasaki, 'improvement of Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steel Weld Metal By Ultrasonic Vibration', *Journal of materials processing Technology*, 210 (2010) 1646-1651.

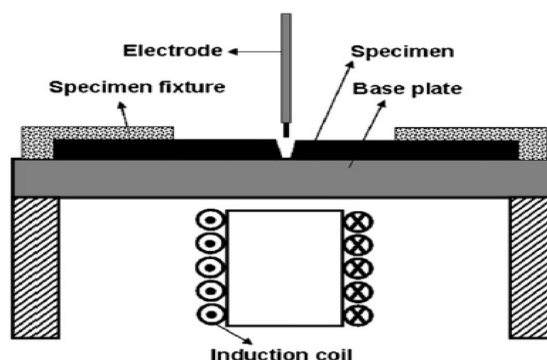
15-C.C. Hsieh, C.g. Lai, W.Wu, "Effect of Vibration on Microstructures and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel GTA Welds", *Metals and Materials International*, 19 (2013) 835-844.

16-J.WANG , Y.CHEN," A Pathway to Grain Structure Control of Gas Tungsten Arc Welded Duplex Stainless Steel Through Ultrasonic Vibration", *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, 52A(2021) 2021-2667.

17- J.D. Escobar , E.Velasquez , T.F.A.Santos , A.J.Ramirez , D.Lopez," Improvement of cavitation erosion resistance of a duplex stainless steel through friction stir processing (FSP)", *Wear* 297(2013)998-1005.

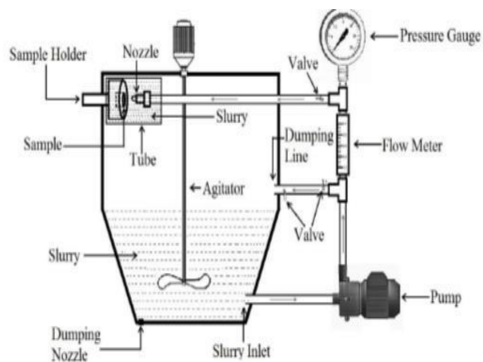
جدول ۱- ترکیب شیمیایی روکش و زیرلایه

روکش	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
	0.03	1.51	0.03	0.03	0.9	22.95	8.59	3.02	0.15	0.75
زیرلایه	0.167	0.479	0.019	0.022	0.172	-	-	-	-	-

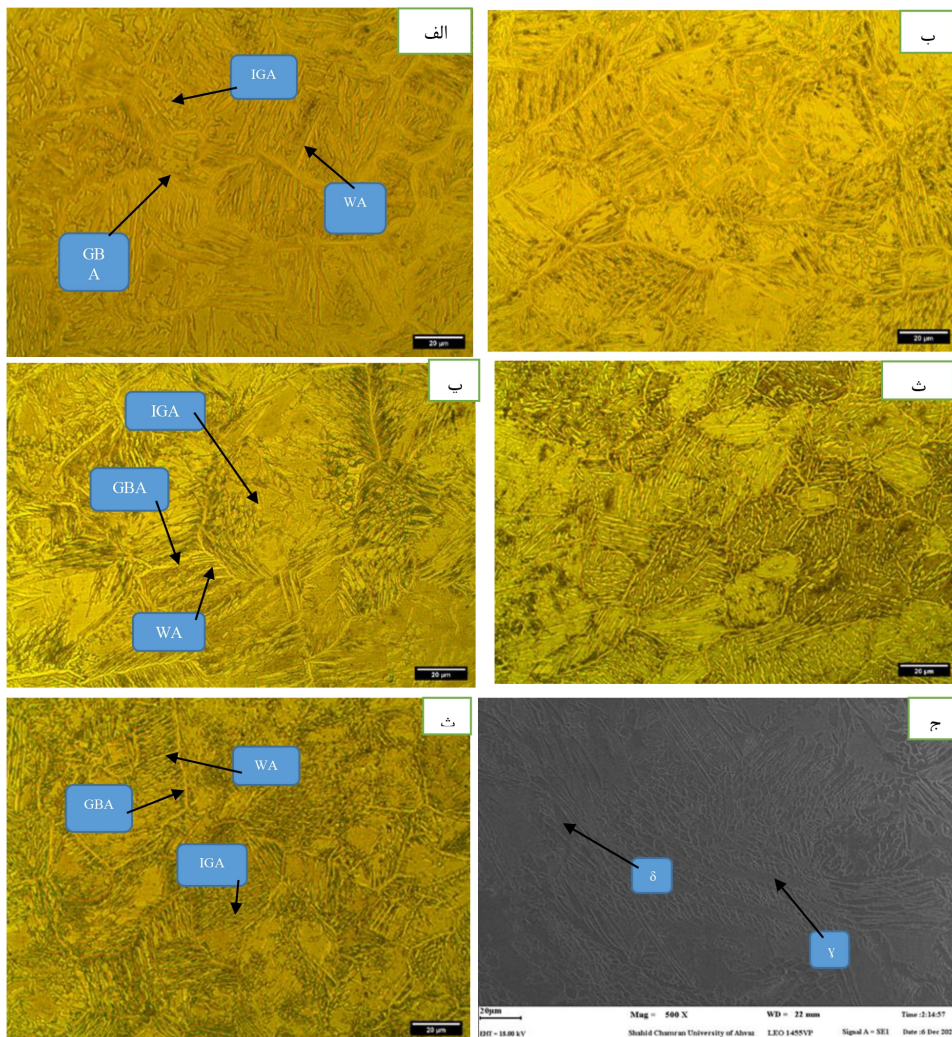


شکل ۱- شماتیک دستگاه لرزش الکترومغناطیسی

# Welding Research



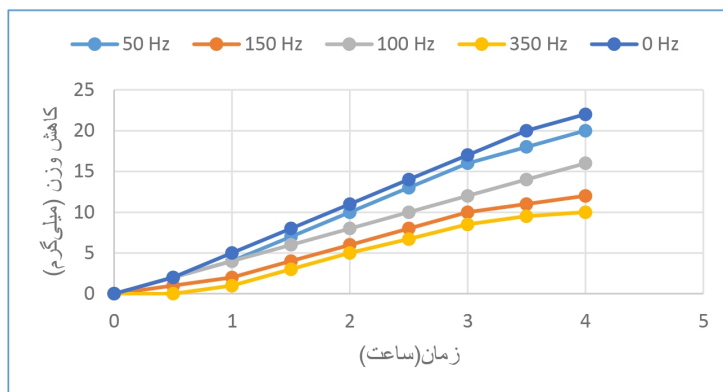
شکل ۲- تصویر شما نیک از دستگاه فرسایش



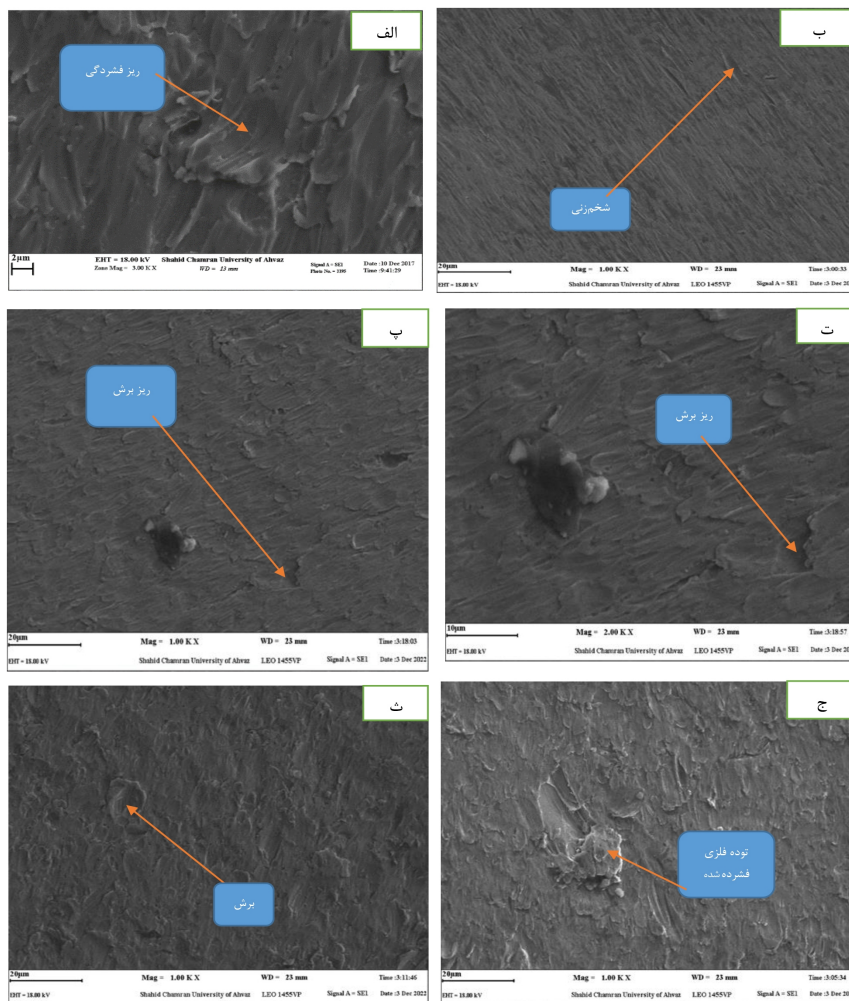
شکل ۳- ریز ساختار پوشش ۲۲۰۹ تحت لورزشهای مختلف.

الف- تصویر بدون لورزش، ب- فرکانس ۵۰ هرتز، پ- فرکانس ۱۰۰ هرتز، ت- فرکانس ۱۵۰ هرتز، ث- فرکانس ۳۵۰ هرتز، ج- تصویر SEM فرکانس ۳۵۰ هرتز

# Welding Research



شکل ۴- نمودار کاهش وزن - زمان برای نمونه‌های تحت لرزش الکترومغناطیس



شکل ۵- تصاویر SEM از سطوح تحت فرسایش نمونه‌ها. الف- نمونه بدون لرزش، ب- فرکانس ۵۰ هرتز، پ و ت- فرکانس ۱۰۰ هرتز، ث- فرکانس ۱۵۰ هرتز، ج- فرکانس ۳۵۰ هرتز

## عملکرد تخلخل‌ها در نمونه‌های خستگی تولید شده با ذوب لیزر بستر پودر (L-PBF)

آرزو ابیسی<sup>۱</sup>، فائزه فاختری<sup>۲</sup>، بهمن ولیزاده<sup>۳</sup>

### چکیده

فناوری L-PBF در ساخت و تولید قطعات هوافضا، خودروسازی، پزشکی و غیره بدلیل ویژگی منحصر به فرد خود در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه دستیابی به قطعات عاری از تخلخل در این فناوری اجتناب ناپذیر است، عملکرد این قطعات، مخصوصاً تحت بارگذاری خستگی با چالش‌هایی روبرو می‌شود. از اینرو بررسی عملکرد این حفرات در طی آزمون خستگی ضروری است. طی این پژوهش با انجام آزمایش خستگی خمشی - پیچشی و بررسی‌های میکروسکوپی و بازرسی غیرمخرب آنها، رفتار رشد تخلخل‌ها و نحوه ایجاد ترک‌های در قطعات ساخته شده با فناوری L-PBF بررسی شد.

**کلمات کلیدی:** خستگی، تخلخل، ترک، رادیوگرافی، ذوب لیزر بستر پودر  $Ti_6Al_4V$ ، L-PBF.

### مقدمه

ساخت افزایشی از روش‌های جدید ساخت قطعات بوده که امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده را در کمترین زمان ممکن به صورت لایه به لایه فراهم می‌کند [۱]. این فرایند کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون به ویژه در صنایع هوافضا و پزشکی دارد [۲]. ذوب لیزر بستر پودر (L-PBF) از جمله فناوری‌های ساخت افزایشی است که امروزه بدلیل تنوع گسترده مواد فلزی (مانند مس، آلومینیم، تیتانیوم و...)، دقت ابعادی بالا، زمان کم تولید تا مصرف، و... بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲، ۳]. در فناوری‌های مبتنی بر پودر جلوگیری از حضور تخلخل اجتناب ناپذیر بوده و تاثیر بسزایی روی مقاومت خستگی، استحکام نهایی و ازدیاد طول تا گسیختگی دارد [۴].

تخلخل قطعات تولید شده با روش پرینت سه بعدی با پارامترهای فرایند نظیر توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله بین درچه، ضخامت لایه، و استراتژی اسکن کنترل می‌شود [۵-۷]. در حالت کلی روش L-PBF یک فرایند پیچیده است. پایداری شرایط ذوب در نقاط ابتدا، انتها و نقاط تغییر جهت مربوط به استراتژی اسکن، به دلیل رفتارهای گرمایی متفاوت در آن نقاط بسیار دشوار است [۸، ۹]. در شرایط سرعت بالای اسکن لیزر اثر سایه اندازی به دلیل نوسانات زیاد عمق سوراخ کلید منجر به ایجاد تخلخل بیشتر می‌شود. حتی در عصر حاضر اندازه گیری سایه اندازی و اثرات

مربوطه ناشی از پاشش لیزر، منطقه تبخیر و ناپایداری‌های قوس پلاسمایی دارای خطا و مشکل است [۱۰-۱۳]. بعلاوه، مشخصه رسوب لایه به لایه در L-PBF، منجر به عملیات حرارتی چرخه ای ریزساختار می‌شود [۱۴، ۱۵]. ارزیابی اثرات تجمعی چرخه‌های گرمایشی/خنک کاری بسیار دشوار است. بطور خلاصه، ناپایداری‌ها و شکل گیری عیوب در روش ساخت افزودنی از نوع L-PBF، به صورت ذاتی وجود داشته و به احتمال قریب به یقین در آینده نزدیک به طور کامل برطرف نخواهد شد.

تخلخل، نبود گداز (LOF)، آخال‌های نامطلوب (نظیر ذرات پودری ذوب نشده) و ترک‌ها عیوب رایج در قطعات ساخته شده به روش ساخت افزودنی از نوع L-PBF است [۱۶-۲۱]. از اینرو مطالعه در مورد عیوب و همچنین تاثیر آن بر رفتار خستگی قطعات تولید شده با L-PBF بسیار مهم است. اگرچه با صرف تمهیداتی نظیر تنظیم دقیق پارامترهای ساخت افزودنی می‌توان از تشکیل عیوب مخربی نظیر ترک‌های بلند و نبود گداز (LOF) جلوگیری نمود، لیکن تخلخل‌ها به عنوان عیوب ذاتی و دائمی با ضرر کمتر در مقایسه با عیوب مخرب، به صورت اجتناب ناپذیر در تمام قطعات تولید شده به روش L-PBF حضور دارند [۲۲-۲۴]. پژوهش حاضر بر این عیوب فراگیر و تقریباً غیرقابل حذف و البته تاثیر آنها بر رفتار رشد ترک در نمونه‌های خستگی خمشی - پیچشی متمرکز است. در ابتدا یک تصور جامع از چرایی وجود تخلخل در قطعات ساخته شده با روش ساخت افزایشی ارائه شده و در ادامه تاثیر آنها بر نحوه رشد ترک خستگی در نمونه‌های خستگی نشان داده شده است.

### روش تحقیق

ترکیب شیمیایی پودر  $Ti_6Al_4V$  استفاده شده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

نمونه‌هایی به شکل مکعبی با ابعاد  $12 \times 12 \times 55$  میلی‌متر از جنس  $Ti_6Al_4V$  با فناوری L-PBF ساخته شد. پودر مورد استفاده در این فرایند دارای مورفولوژی کروی و دارای اندازه‌ای بین ۱ تا ۵۰ میکرومتر بود که قطر متوسط آن ۲۳ میکرومتر بدست آمد. برای ساخت نمونه از دستگاه NOURAM100P با اتمسفر گاز آرگون استفاده شد. پارامترهای فرایند برای ساخت نمونه با کمترین تخلخل تهیه و ضخامت لایه ۳۰ میکرومتر، فاصله درچه ۷۵ میکرومتر، دانسیته انرژی ۸۰ ژول بر میلیمتر مکعب و توان لیزر تا ۳۰۰ وات در نظر گرفته شد. در نهایت نمونه‌ها در مدت ۵ ساعت با استفاده از حدود ۳۹ گرم پودر تولید شد.

مورفولوژی پودرها مورد بررسی قرار گرفت و نمونه ای از آنها در شکل (۴) مشاهده می شود. مطابق شکل، پودرها کاملاً کروی شکل هستند که این موضوع موجب بهبود جریان پذیری و چگالی ظاهری می شود. از طرفی واضح است که پودرها دارای اندازه متنوعی هستند که حضور ذرات ریز با پر کردن فضای بین ذرات درشت چگالی ظاهری را افزایش می دهد اما اندکی جریان پذیری را کاهش می دهد که قابل چشم پوشی است [۳۲]. نتایج بررسی سطح مقطع پودرها برای تجزیه تحلیل تخلخل داخلی صورت گرفته با استفاده از میکروسکوپ FE-SEM در شکل (۵) آورده شده است. مطابق شکل، در ذرات پودری اولیه، تخلخل های کوچکی مشاهده شد. این ذرات پودری که به روش تمیزه گازی تهیه می شوند، از مقداری تخلخل ذاتی برخوردارند. در صورت عدم ذوب کامل مواد اولیه پودری، تخلخل محبوس شده در آنها در داخل پودر باقی مانده و به عنوان تخلخل قطعه پرنیت شده به شمار می رود. همچنین در صورت ذوب کامل پودر نیز گاز محبوس شده آزاد شده و جباب های حوضچه مذاب را افزایش داده و منجر به تشکیل تخلخل می شود. Sames و همکارانش نیز ارتباط تنگاتنگی بین تخلخل در مواد اولیه پودری و نمونه های پرنیت شده را گزارش نموده اند [۳۲].

## تخلخل قطعات ساخت افزایشی

نمونه هایی از تخلخل بررسی شده در قطعات ساخته شده با ساخت افزایشی در شکل (۶) آورده شده است. بررسی های میکروسکوپ نوری نمونه های متالوگرافی شده، حاکی از وجود تنوعی از تخلخل به صورت بی نظم در ریزساختار بود. بگونه ای که در تعداد زیادی از نمونه های متالوگرافی نظیر نمونه های ریخته گری شده، هیچ تخلخلی وجود نداشته عاری از تخلخل بود. لیکن در تعدادی از نمونه های اتفاقی نیز تخلخل با مقادیر متفاوت مشاهده شد. در برخی از نمونه های متالوگرافی نیز تخلخل های بزرگ به صورت متجمع مطابق شکل (۶) مشاهده شد.

## تخلخل در نمونه های خستگی

پس از اتمام آزمایشات خستگی، نمونه های خستگی مطابق شکل (۷) به موازات محور نمونه ها برش داده شده و بررسی های متالوگرافی بر روی آنها انجام شد. تصاویر پی در پی با استفاده از میکروسکوپ نوری از طریق پیمایش کل سطح برش یافته نمونه خستگی تهیه و به صورت شکل جمع آوری شده است. نکته جالبی که از این شکل برداشت می شود، وجود تعداد فراوانی تخلخل در کل ریزساختار نمونه خستگی می باشد. این تخلخل های بیشمار قبل از انجام آزمایش خستگی با میکروسکوپ نوری مشاهده نمی شد.

نکته جالب دیگری که از بررسی نمونه های خستگی بدست آمد، اندازه بزرگتر تخلخل های قرار گرفته در نواحی نزدیک سطح نمونه های خستگی در مقایسه با تخلخل های موجود در داخل آن است. نمونه هایی از این مشاهده در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به تنش های بزرگتر متمرکز در نواحی نزدیک سطح

در شکل (۳) ابعاد و شماتیک نمونه های مورد نیاز برای انجام آزمایش خستگی خمشی-پیچشی آورده شده است. آزمایش خستگی پر چرخه با نسبت تنش ۱- انجام شد. بررسی تخلخل ها از طریق میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشتر میدانی (FE-SEM) صورت گرفت. نمونه ها در ابعاد مناسب برش داده شده سپس مانت شدند. نمونه های مانت شده با استفاده از سنباده شماره ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ نمونه ها سنباده زنی سپس با پودر آلومینای یک میکرون پولیش شدند. بازرسی غیرمخرب رادیوگرافی برای بررسی عیوب درونی نمونه ها به صورت همکاری بین المللی انجام گرفت.

## نتایج و بحث

**مکانیزم تشکیل تخلخل در فلزات تهیه شده با روش L-PBF**  
دو نوع تخلخل گازی و LOF در فلزات ساخته شده با روش L-PBF شناخته شده است که تخلخل گازی عموماً کروی شکل و تخلخل LOF غالباً به صورت بی شکل و حاوی مقدار اندکی از ذرات پودری ذوب نشده می باشد [۲۶، ۲۵]. نمونه هایی از تخلخل های موجود در قطعات در شکل (۱) آورده شده است. تخلخل گازی همانطوریکه از نامش پیداست، با گرفتادن گاز در حوضچه مذاب تشکیل می شود. پارامترهای مذاب متأثر از لیزر نظیر تشکیل سوراخ کلید یا گودشدگی سطح مذاب و همچنین تخلخل موجود در مواد پودری اولیه، موارد احتمالی ورود گاز محبوس شده به حوضچه مذاب حین فرایند ساخت افزایشی است [۲۷]. نشان داده شده است صورت نیروهای وارد بر حوضچه مذاب نظیر توربولانس و سوراخ کلید مسئول تشکیل تخلخل ها هستند. سوراخ کلید در اصل یک توصیف برای فرورفتگی عمیق و باریک در حوضچه مذاب است. مکانیزم تشکیل تخلخل از طریق سوراخ کلید در شکل ۲ نشان داده شده است. چگالی زیاد انرژی، فشار پس زدگی را افزایش داده و در نتیجه منجر به عمیق شدن فرورفتگی می شود. این امر به نوبه خود باعث به دام افتادن گاز در سوراخ های عمیق می شود.

گاز محبوس شده در حوضچه مذاب تجمع نموده و به دلیل کشش سطحی، جباب های کروی شکل ایجاد می کند. متأسفانه هر دو تخلخل حین ساخت با فرایند L-PBF با گاز محافظ پر می شوند. گاز محبوس شده، حتی با اعمال روش ایزواستاتیک داغ نیز از بسته شدن کامل تخلخل جلوگیری می نماید [۲۸، ۲۹]. وضعیت بدتر آنکه انجام عملیات حرارتی فلز ساخته شده با L-PBF ممکن است منجر به انبساط حرارتی گاز محبوس و در نتیجه رشد تخلخل شود [۳۰، ۳۱]. تخلخل LOF هم در اثر ذوب ناکافی مواد پودری و یا همچوشی ناقص مسیرهای ذوب ایجاد می شود. با توجه به اینکه ثابت نگه داشتن میزان گرمای ورودی در کل مسیر اسکن غیرممکن است، چالش وجود LOF نیز در حال حاضر به قوت خود باقی است.

## تخلخل پودر اولیه

مواد پودری مورد استفاده در فرایند L-PBF برای ساخت قطعات، به منظور وجود تخلخل ذاتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا

ترک‌های بزرگی تشکیل دادند که از طریق رادیوگرافی شناسایی شدند.

## منابع

- 1-Nicola Cersullo, Jon Mardaras, Philippe Emile, Katja Nickel, Vitus Holzinger and Christian Huhne, "Effect of Internal Defects on the Fatigue Behavior of Additive Manufactured Metal Components: A Comparison between Ti6Al4V and Inconel 718", *Materials*, 15, 2022, 6882.
- 2-Martin Frkan, Radomila Konecna, Gianni Nicoletto, Ludvik Kunz, "Microstructure and fatigue performance of SLM-fabricated Ti6Al4V alloy after different stress-relief heat treatments", *Transportation Research Procedia*, 40, 2019, 40, 24-29.
- 3-Jinliang Zhang, Bo Song, Lei Yang, Ruijie Liu, Lei Zhang, Yusheng Shi, "Microstructure evolution and mechanical properties of TiB/Ti6Al4V gradient-material lattice structure fabricated by laser powder bed fusion", *Composites Part B: Engineering*, 202, 2020, 108417.
- 4-A.B. Spierings, M. Schneider and R. Eggenberger, "Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts", *Rapid Prototyping Journal*, 5, 2011, 380-386.
- 5-T. DebRoy, T. Mukherjee, J. O. Milewski, J. W. Elmer, B. Ribic, J.J. Blecher and W. Zhang, "Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions", *Nature materials*, 10, 2019, 1026-1032.
- 6-Dongdong Gu, Yves-Christian Hagedorn, Wilhelm Meiners, Guangbin Meng, Rui Joao Santos Batista, Konrad Wissenbach, Reinhart Popraawe, "Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium" *Acta Materialia*, 9, 2012, 3849-3860.
- 7-C.Y. Yap, C.K. Chua, Z.L. Dong, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, L.E. Loh and S.L. Sing, "Review of selective laser melting: Materials and applications", *Applied physics reviews*, 2, 2015, 041101.
- 8-Saad A.Khairallah, Aiden A. Martin, Jonathan R.I. Lee, Gabe Guss...and Wayne E. King, "Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing", *Science*, 368, 2020, 660-665.
- 9-R.J. Vikram, S.A. Gokulnath, K. Prashanth, G. Satyam, Suwas, "Effect of scanning strategy on microstructure and texture evolution in a selective laser melted Al-33Cu eutectic alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 2023, 168098.
- 10-P Bidare, I Bitharas, RM Ward, MM Attallah, AJ Moore, "Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion", *Acta Materialia*, 142, 2018, 107-120.
- 11-X. Xie, C. Zhou, X. Wei, W. Hu, Q. Ren, "Laser machining of transparent brittle materials: from machining strategies to applications", *Opto-Electronic Advances*, 1, 2019, 180017-1-180017-13.

نمونه‌های خستگی خمشی-پیچشی، تخلخل‌های قرار گرفته در این مناطق تحت تنش‌های بالاتری قرار گرفته و رشد می‌کنند [۳۳]. تنش برشی ایجاد شده با آزمایش خستگی به عنوان نیروی پیشران عمل کرده و موجب تغییر شکل و تجمع حرکتی تخلخل‌ها می‌شود. مکانیزم این تنش برشی که در نهایت باعث شکست ماکروسکوپی می‌شود در شکل (۹) آورده شده است. مطابق شکل تحت تنش‌های کششی، تغییر شکل لغزش بین بلورهای فلزی اتفاق می‌افتد که این لغزش تدریجی در زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت تنش کششی شروع می‌شود. به همین دلیل حفرات در زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته و تحت تنش برشی کشیده می‌شوند. در ادامه با ایجاد لغزش تخلخل‌ها تبدیل به ترک شده و منجر به شکستگی‌های ماکروسکوپی می‌شود [۳۴].

## مشاهدات آزمون رادیوگرافی

نمونه‌ای از قطعات خستگی از نوع خمشی-پیچشی شکسته شده به همراه نتایج حاصل از بررسی‌های غیرمخرب در شکل (۱۰) آورده شده است. مطابق سطح شکست ارائه شده، سه ناحیه مشخص جوانه زنی ترک خستگی، رشد ترک و همچنین منطقه شکست نهایی قابل رویت است. با توجه به شکل (۱۰-ب)، تعدادی از تخلخل‌ها در نتایج رادیوگرافی نمونه خستگی مشاهده می‌شود. جالب تر آنکه ترک‌های خستگی رشد کرده نیز در شکل (۱۰-ج) قابل رویت است. مطابق شکل این ترک‌ها از نواحی سطح نمونه‌های خستگی جوانه زده و به داخل نمونه‌ها اشاعه پیدا نمودند. مطابق توضیحات فوق‌الذکر، این ترک‌ها با اتصال حفره‌ها به یکدیگر تشکیل می‌شود. بدین صورت که حفرات به موازات بیشترین تنش اصلی به تدریج رشد می‌کند تا زمانی که طول یک حفره با فاصله بین دو حفره برابر شود در این لحظه دو حفره به یکدیگر متصل شده و ترک ایجاد می‌شود [۳۵]. مطابق شکل (۱۰-ج)، وجود حفرات در نقاط خاصی از ترک قابل مشاهده است (نشان داده شده با علامت قرمز رنگ) که اثبات کننده رشد ترک از طریق اتصال حفرات به یکدیگر است.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با انجام آزمون خستگی روی قطعات ساخت افزایشی از نوع L-PBF نتایج زیر از طریق بررسی‌های صورت گرفته حاصل شد:  
- بررسی‌های میکروسکوپی سطح مقطع پودر  $Ti_6Al_4V$  حاکی از حضور تخلخل در ذرات پودری بود که منجر به ورود آن‌ها به داخل قطعه و افت خواص مکانیکی می‌شود.  
- قطعات ساخته شده از جنس  $Ti_6Al_4V$  با فناوری L-PBF در برخی موارد همانند قطعات ریختگی عاری از تخلخل بوده و در برخی موارد تخلخل‌ها اندک و یا به صورت تجمع یافته و به وفور حضور داشتند.  
- در نمونه‌های خستگی خمشی-پیچشی نشان داده شد که نواحی تحت تاثیر تنش زیاد (نواحی نزدیک سطح) تخلخل‌ها به مقدار قابل توجه رشد کرده و در اکثر موارد این تخلخل‌ها به هم پیوسته و

- 24-CLA. Leung. S. Marussi. RC. Atwood. M. Towrie, "In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing", *Nature communications*, 9, 2018, 1355.
- 25-H. Taheri. MRBM. Shoaib. LW. Koester, "Powder-based additive manufacturing-a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology", *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 1, 2017, 172-209.
- 26-GKL. Ng. AEW. Jarfors. G. Bi. HY. Zheng, "Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition", *Applied Physics A*, 97, 2009, 641-649.
- 27-S. Barua. F. Liou. J. Newkirk. T. Sparks, "Vision-based defect detection in laser metal deposition process", *Rapid Prototyping Journal*, 20, 2014, 77-85.
- 28-S. Leuders. M. Thne. A. Riemer. T. Niendorf, "On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance", *International journal of fatigue*, 48, 2013, 300-307.
- 29-B. Zhao. AK. Gain. W. Ding. L. Zhang. X. Li, "A review on metallic porous materials: pore formation, mechanical properties, and their applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 2018, 2641-2659.
- 30-S. Tammas-Williams. PJ. Withers. I. Todd. PB. Prangnell, "Porosity regrowth during heat treatment of hot isostatically pressed additively manufactured titanium components", *Scripta Materialia*, 122, 2016, 72-76.
- 31-L. Girelli. M. Tocci. M. Gelfi. A. Pola, "Study of heat treatment parameters for additively manufactured AISi10Mg in comparison with corresponding cast alloy", *Materials Science and Engineering*, 739, 2019, 317-328.
- 32-WJ. Sames. FA. List. S. Pannala. RR. Dehoff, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing", *International materials reviews*, 61, 2016, 315-360.
- 33-D. Arola. CL. Williams, "Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces", *International Journal of fatigue*, 24, 2002, 923-930.
- 34-Qiang Li. Michael R Lovell. William Slaughter. Kaveh Tagavi, "Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling", *Journal of Materials Processing Technology*
- 35-ویلیام ف. هاسفورد. رابرت م. کدل / شکل دادن فلزات متالوژی و مکانیک ۱۳۷۷. تهران، دانشگاه صنعتی شریف موسسه انتشارات علمی.
- 12-C. Tenbrock. T. Kelliger. N. Praetzs. M. Ronge, "Effect of laser-plume interaction on part quality in multi-scanner Laser Powder Bed Fusion", *Additive Manufacturing*, 38, 2021, 101810.
- 13-J. Ye. SA. Khairallah. AM. Rubenchik, "Energy coupling mechanisms and scaling behavior associated with laser powder bed fusion additive manufacturing". *Advanced Engineering Materials*, 7, 2019, 19001.
- 14-CL. Li. JW. Won. SW. Choi. JH. Choe. S. Lee, "Simultaneous achievement of equiaxed grain structure and weak texture in pure titanium via selective laser melting and subsequent heat treatment", *Journal of Alloys and Compounds*, 803, 2019, 407-412.
- 15-DW. Wang. YH. Zhou. J. Shen. Y. Liu. DF. Li, "Selective laser melting under the reactive atmosphere: a convenient and efficient approach to fabricate ultrahigh strength commercially pure titanium without sacrificing ductility", *Materials Science and Engineering*, 762, 2019, 138078.
- 16-P. Kousoulas. YB. Guo, "On the probabilistic prediction for extreme geometrical defects induced by laser-based powder bed fusion", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 2023, 124-134.
- 17-S. Sommacal. A. Matschinski. J. Holmes. K. Drechsler, "Detailed void characterisation by X-ray computed tomography of material extrusion 3D printed carbon fibre/PEEK", *Composite Structures*, 2022, 116635.
- 18-M. Parsazadeh. D. Wu. S. Sharma. SS. Joshi, "A new data-driven framework for prediction of molten pool evolution and lack of fusion defects in multi-track multi-layer laser powder bed fusion processes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 1-21.
- 19-Z. Snow. L. Scime. A. Ziabari. B. Fisher. V. Paquit, "Observation of spatter-induced stochastic lack-of-fusion in laser powder bed fusion using in situ process monitoring", *Additive Manufacturing*, 61, 2023, 103298.
- 20-N. Vidakis. M. Petousis. VM. Papadakis, "Multifunctional Medical Grade Resin with Enhanced Mechanical and Antibacterial Properties: The Effect of Copper Nano-Inclusions in Vat Polymerization (VPP) Additive Manufacturing", *Journal of Functional Biomaterials*, 13, 2022, 258.
- 21-H. Ruan. S. Rezaei. Y. Yang. D. Gross. BX. Xu, "A thermo-mechanical phase-field fracture model: Application to hot cracking simulations in additive manufacturing", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17, 2023, 105169.
- 22-JP. Kruth. G. Levy. F. Klocke. THC. Childs, "Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing", *CIRP annals*, 56, 2007, 730-759.
- 23-N. Sanaei. A. Fatemi, "Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review". *Progress in Materials Science*, 117, 2021, 100724.

## پی نوشت

1-استادیار دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

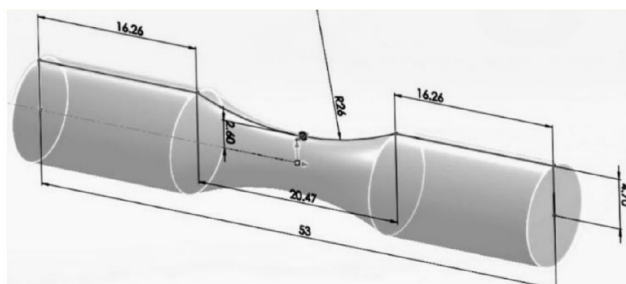
2- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

3- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

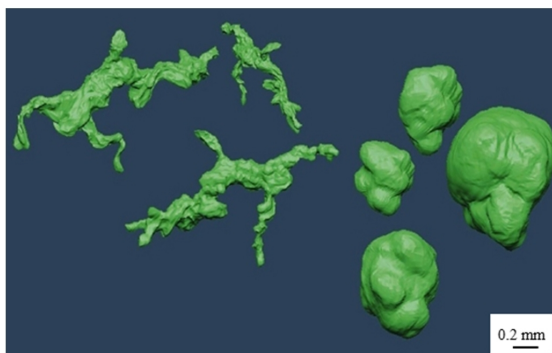
# Welding Research

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر (Ti6Al4V ( grade 23

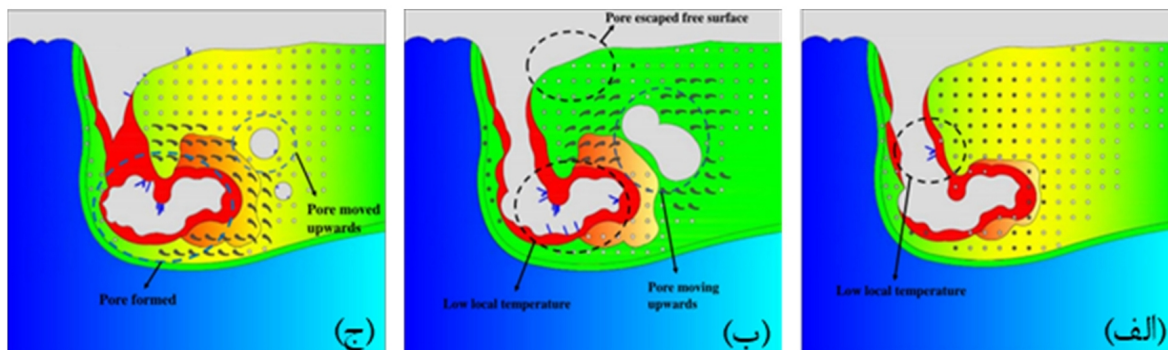
ترکیب شیمیایی								
H	N	C	O	Fe	V	Al	Ti	عنصر آلیاژی
۰,۰۱۲	۰,۰۰۵	۰,۰۰۸	۰,۱۳	۰,۲۵	۴,۵	۶,۵	تبادل	درصد وزنی



شکل ۱- شماتیک نمونه خستگی (ابعاد به میلیمتر)

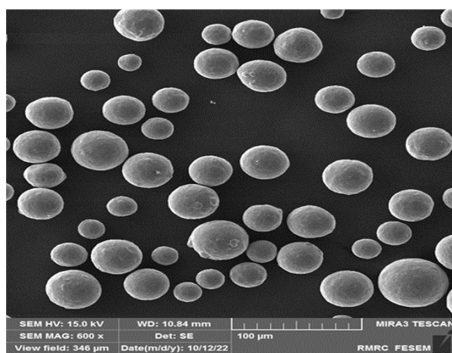


شکل ۲- نمونه هایی از حفرات گازی و LOF

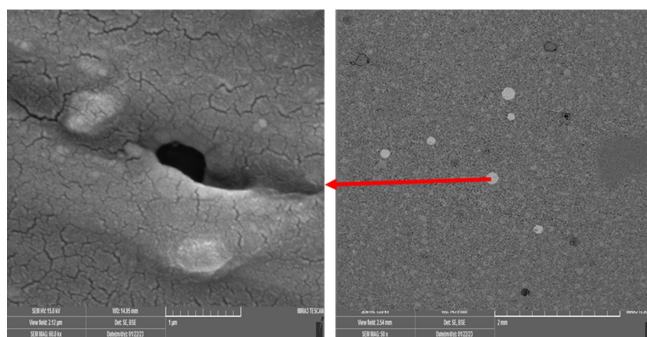


شکل ۳- مکانیزم تشکیل سوراخ کلید در فرایند L-PBF

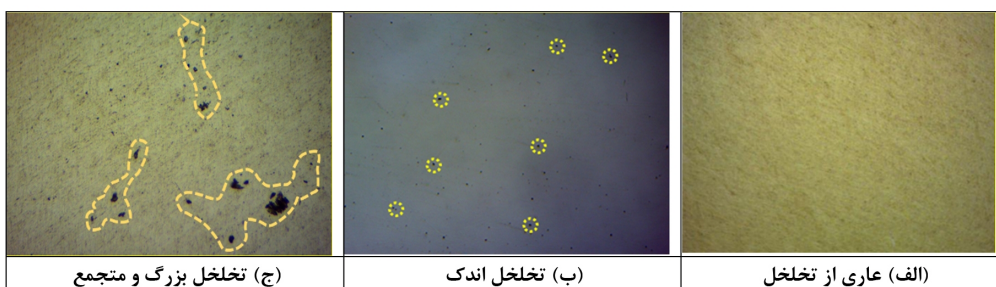
# Welding Research



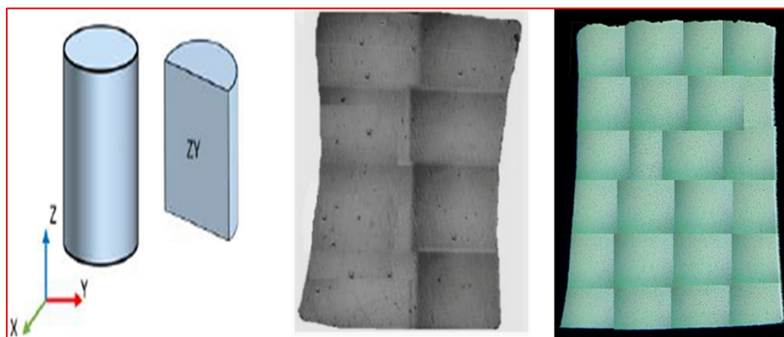
شکل ۴- مورفولوژی ذرات پودر  $Ti_6Al_4V$



شکل ۵- تخلخل در پودر  $Ti_6Al_4V$  اولیه



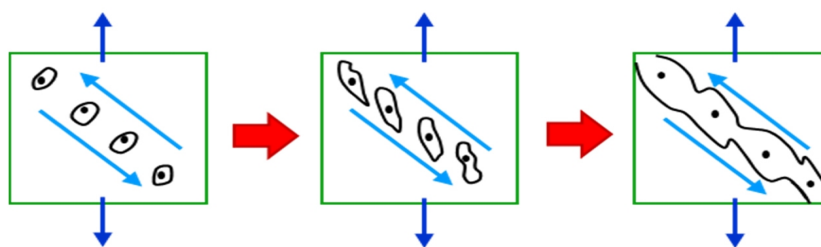
شکل ۶- انواع تخلخل‌های مشاهده شده در قطعات ساخت افزایشی



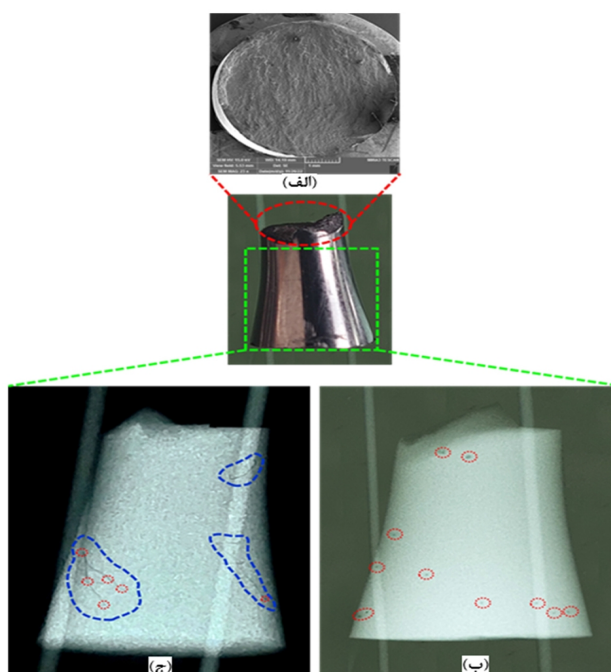
شکل ۷- تخلخل‌ها بعد از آزمون خستگی



شکل ۸- تخلخل‌های نزدیک سطح نمونه خستگی



شکل ۹- شماتیک تشکیل ترک برش



شکل ۱۰- تصویر سطح شکست و سطوح جانبی نمونه خستگی

