



## تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سختی مقطع عرضی اتصال لب به لب آلیاژ Al7075 حاصل از فرآیندهای FSW و SFSW با استفاده از روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت

مه‌دی وحدتی\*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

### چکیده

در این پژوهش، در ابتدا با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، اتصالات لب به لب از آلیاژ Al7075-T6 تولید شدند. بدین‌منظور، روش رویه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش، انتخاب گردید و متغیرهای سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و زاویه انحراف ابزار به عنوان متغیرهای ورودی، تعیین شدند. در ادامه، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سختی مقاطع عرضی اتصالات به انجام رسید. با توجه به مقدار بالای تابع مطلوبیت (۰/۹۷۶)، می‌توان دریافت که روند بهینه‌سازی به طور موفقیت‌آمیزی، هدف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است. علاوه بر این، شرایط بهینه با اجرای آزمون صحت-گذاری، به تأیید رسید. سپس با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب (SFSW) و بر اساس مقادیر بهینه نرخ پیشروی ابزار و زاویه انحراف ابزار، اتصالات لب به لب تولید شدند. نتایج تحلیل داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، صحت و دقت معادله رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که مدل نهایی می‌تواند پارامتر MHD را با خطای کمتر از ۵٪ پیش‌بینی کند؛ همچنین، عبارات خطی از متغیرهای قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار بر سختی مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در زیر آب، موثر هستند.

**کلمات کلیدی:** تحلیل آماری؛ بهینه‌سازی؛ سختی؛ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ روش رویه پاسخ.

## Statistical analysis and optimization of parameters affecting the hardness of butt joint cross-section of Al7075 produced by FSW and SFSW using RSM and desirability approach

M. Vahdati\*

Asst. Prof., Fac. Mech. Mechatron. Eng., Shahrood Univ. Tech., Shahrood, Iran.

### Abstract

In this study, firstly, the butt joints were produced from Al7075-T6 alloy using friction stir welding (FSW). To this end, the RSM was selected as the experiment design technique. So, the factors such as: tool rotational speed, tool feed rate, tool shoulder diameter, and tool tilt angle were identified as the input variables. Then, statistical analysis and optimization of variables affecting the hardness of cross-sections was performed. In attention to the high value of desirability function (0.976), it could be found that the procedure of optimization has well fulfilled the pre-determined target. In addition, the optimal condition has been confirmed by implementing the verification test. Afterward, the butt joints were produced using submerged friction stir welding (SFSW) based on the optimal values of tool feed rate and tool tilt angle. The obtained results from analysis of experimental data, confirmed the accuracy of regression equation. Furthermore, it is shown that the final model can predict the MHD parameter with an error less than 5%. Also, the linear terms of the tool shoulder diameter and tool rotational speed are effective on the hardness of cross-sections of the underwater welded joints.

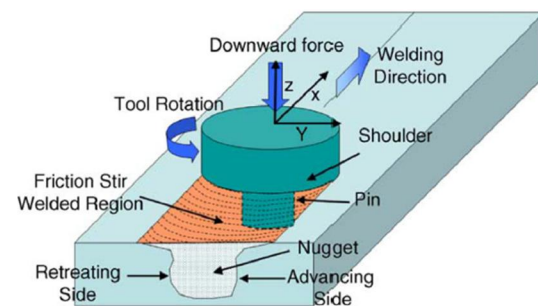
**Keywords:** Statistical Analysis; Optimization; Hardness; Friction Stir Welding; Response Surface Methodology.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۳۳۳۳۹۲۲۰۴؛ فکس: ۰۲۳۳۳۳۹۲۲۰۴

آدرس پست الکترونیک: vahdati@shahroodut.ac.ir

## ۱- مقدمه

اتصال آلایژهای آلومینیوم با استفاده از فرآیندهای جوشکاری ذوبی همواره با مسائل و مشکلات متنوعی مواجه بوده است [۱ و ۲]. بروز معیبهی همچون ترک، حفره و تخلخل در طی جوشکاری ذوبی، بر کیفیت و خواص مکانیکی جوش تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، در دهه ۱۹۹۰ میلادی، یک فرآیند جوشکاری حالت جامد با نام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)<sup>۱</sup> توسط موسسه جوشکاری انگلستان (TWI)<sup>۲</sup> [۳] توسعه یافت. فرآیند FSW در ابتدا برای جوشکاری آلایژهای آلومینیوم توسعه داده شد و در ادامه، برای بسیاری از مواد و آلایژهای متفاوت به کار گرفته شد. این فرآیند در صنایع متعددی همچون، هوا فضا، خودرو سازی، راه آهن، کشتی سازی و سازه‌های دریایی کاربرد دارد [۴-۶]. اصول اجرای فرآیند FSW به صورت شماتیک، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- اصول اجرای فرآیند FSW [۷]

اجرای فرآیند FSW منجر به تولید میکروساختار ریز دانه در منطقه اغتشاشی می‌شود. از این‌رو، خواص مکانیکی مطلوبی در قطعه‌کار مشاهده می‌شود [۸ و ۹]. گروهی از محققان، به منظور مدل‌سازی آماری استحکام تسلیم، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری اتصال لب به لب آلایژ AA2014-T6، متغیرهای ورودی فرآیند FSW را با استفاده از روش رویه پاسخ، تحلیل نمودند [۱۰]. نتایج نشان داد که استفاده از پین ابزار با هندسه شش وجهی در مقایسه با پین ابزار با هندسه مخروطی، منتج به ارتقاء خواص کششی و

انعطاف‌پذیری اتصال می‌شود. در مطالعه دیگری، جهت دستیابی به شرایط بهینه از بیشینه استحکام برشی اتصال و با استفاده از فرآیند FSW، اتصالاتی از آلایژ AA6061-T6 در وضعیت روی هم<sup>۳</sup> تولید شدند [۱۱]. در این پژوهش، با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل واریانس داده‌ها نشان داده شد که سرعت دورانی ابزار و نیروی محوری ابزار به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی استحکام برشی اتصال دارند.

اگر چه حرارت ورودی در فرآیند FSW در مقایسه با فرآیند جوشکاری ذوبی کمتر است، با این وجود، پدیده نرم-شدگی عموماً در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلایژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم رخ می‌دهد [۱۲-۱۴]. به منظور رفع این مشکل، می‌توان نرخ خنک‌کاری را افزایش داد و با کاهش دمای بیشینه، خواص مکانیکی اتصال را بهبود بخشید. بدین منظور، خنک‌کاری خارجی در تعدادی از فرآیندهای اتصال‌دهی حالت جامد به کار گرفته شده است [۱۵-۱۷].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب (SFSW)<sup>۴</sup> به عنوان مدل بهبود یافته‌ای از فرآیند FSW معرفی شده است که در آن، آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است و نقش مهمی را در تنظیم پروفایل دمایی اتصال جوش ایفا می‌کند [۱۸-۲۰]. این فرآیند برای آلایژهای حساس به حرارت در طی فرآیند جوشکاری، مناسب است. از این‌رو به طور گسترده‌ای برای آلایژهای آلومینیوم استفاده می‌شود [۲۱ و ۲۲].

پروفایل سختی در فرآیندهای FSW/SFSW آلایژهای آلومینیوم غیر قابل عملیات حرارتی، عموماً به اندازه دانه وابسته است [۲۳-۲۶]. یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که استفاده از آب به عنوان سیال خنک‌کار منتج به بهبود کمینه سختی اتصال در جوشکاری آلایژهای آلومینیوم غیر قابل عملیات حرارتی می‌شود [۲۵ و ۲۶]. از سوی دیگر، در آلایژهای آلومینیوم عملیات حرارتی‌پذیر، اجرای فرآیند FSW/SFSW عموماً ناحیه نرمی را در منطقه جوش ایجاد می‌کند [۲۷-۳۰]. توزیع میکروسختی اتصالات آلایژ

<sup>3</sup> Lap Joint

<sup>4</sup> Submerged Friction Stir Welding

<sup>1</sup> Friction Stir Welding

<sup>2</sup> The Welding Institute

می‌یابد؛ همچنین با افزایش سرعت جوشکاری، عرض منطقه نرم‌شدگی به تدریج کاهش می‌یابد و موقعیت کمینه سختی اتصال در راستای مرکز جوش حرکت می‌کند [۳۵ و ۳۶].

هندسه متفاوت پین نیز منجر به تغییر مقدار میکروسختی می‌شود. بیشترین مقدار سختی با به کارگیری پین با هندسه رزوه‌دار حاصل می‌شود [۳۷]. این موضوع ناشی از افزایش اصطکاک و تشدید تغییر شکل پلاستیک است که منتج به بهسازی ساختار دانه و بهبود سختی می‌شود. سطوح صاف و بدون طرح پین، منجر به تشدید تغییر شکل پلاستیک نمی‌شود و از این‌رو، اغتشاش و اختلاط مناسبی در منطقه جوش ایجاد نخواهد شد.

مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه FSW و SFSW نشان می‌دهد که متغیرهای متنوع و متفاوتی بر سختی مقطع عرضی اتصال تأثیر می‌گذارند که در اغلب موارد، تأثیر هر یک از آن‌ها به صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو با توجه به قابلیت و مزایای فرآیندهای FSW و SFSW در اتصال‌دهی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم، در این پژوهش، تحلیل آماری، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سختی مقطع عرضی اتصال لب به لب آلیاژ AA6061-T6 حاصل از این دو فرآیند، انجام شد. بدین منظور، روش رویه پاسخ<sup>۳</sup> به عنوان روش طراحی آزمایش<sup>۴</sup>، انتخاب شد. در ادامه، تحلیل آماری پارامترهای موثر بر سختی مقاطع عرضی اتصالات تولید شده، به انجام رسید. صحت و دقت معادلات رگرسیون با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز واریانس<sup>۵</sup> و تحلیل رگرسیون داده‌های تجربی، مورد بررسی قرار گرفت؛ همچنین، چگونگی تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند همچون سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و زاویه انحراف ابزار، بر سختی مقاطع عرضی اتصالات تولید شده مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به تحقیقات مرور شده در حوزه FSW و SFSW، مهمترین جوانب نوآوری مقاله پیش‌رو در مقایسه با تحقیقات منتشر شده عبارتند از: تمایز و تفاوت در نوع متغیرهای ورودی

AA2219 نشان داد که نرم‌شدگی در هر دو فرآیند FSW و SFSW رخ می‌دهد [۲۷]. ونگ و همکاران [۲۸]، جوشکاری آلیاژ AA2017 فوق ریز دانه را با استفاده از فرآیند SFSW به انجام رساندند. نتایج نشان داد که اتصال ایجاد شده نسبت به فلز پایه دچار نرم‌شدگی شده است. رفتار مشابهی از نرم‌شدگی نیز در جوشکاری FSW/SFSW آلیاژ Al-Zn-Mg-Cu مشاهده شده است [۳۱].

همچنین، توزیع سختی می‌تواند متأثر از پارامترهای جوشکاری همچون، سرعت دورانی، سرعت جوشکاری و هندسه پین باشد. گروهی از محققان، به منظور دستیابی به شرایط بهینه از بیشینه سختی اتصال در منطقه اغتشاشی و با استفاده از روش تاگوچی، اتصالات لب به لب از آلیاژ AA6063 را در فرآیند SFSW تولید نمودند [۳۲]. تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که هندسه پین ابزار، سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری به ترتیب موثرترین متغیرهای ورودی بر سختی منطقه اغتشاشی هستند. در پژوهش دیگری، جهت دستیابی به بیشینه استحکام کششی اتصال، آزمون‌های تجربی SFSW بر اساس طرح باکس-بنکن و روش رویه پاسخ بر روی آلیاژ AA6061-T6 انجام شدند [۳۳]. نتایج نشان داد که افزایش سرعت دورانی ابزار، کاهش نرخ پیشروی ابزار و کاهش ارتفاع سیال واقع روی نمونه، منتج به افزایش استحکام کششی اتصال می‌شود.

در فرآیند SFSW آلیاژ AA2219، مشاهده شد که افزایش سرعت دورانی ابزار تا مقدار معینی موجب بهبود سختی اتصال می‌شود که ناشی از تأثیر کرنش‌سختی است [۳۴]. هنگامی که سرعت دورانی در مقادیر بسیار پایین یا بسیار بالا تنظیم شود، کمینه سختی نسبتاً پایین است که این امر ناشی از اغتشاش ناکافی ابزار و یا افزایش حرارت ورودی است. علاوه بر این، با افزایش سرعت دورانی، عرض منطقه نرم‌شدگی افزایش می‌یابد و موقعیت کمینه سختی اتصال (MHL)<sup>۱</sup> به خارج از مرکز جوش حرکت می‌کند. عموماً سختی منطقه اغتشاشی (SZ)<sup>۲</sup> با افزایش سرعت دورانی، افزایش می‌یابد [۳۴]. از سوی دیگر، با افزایش سرعت جوشکاری، مقدار سختی در موقعیت کمینه سختی بهبود

<sup>3</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>4</sup> Design of Experiment (DOE)

<sup>5</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

<sup>1</sup> Minimum Hardness Location

<sup>2</sup> Stir Zone

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه FSW، چهار متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و زاویه انحراف ابزار نسبت به راستای قائم به عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شدند و هر یک از آنها در پنج سطح مورد بررسی قرار گرفتند. دامنه تغییر هر یک از این عوامل بر اساس آزمایشات اولیه تعیین گردید که منتج به تولید سالم اتصال شد (جدول ۱).

لازم به ذکر است که متغیرهای ورودی فرآیند SFSW و سطوح تغییرات آنها پس از تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سختی مقاطع عرضی اتصالات تولید شده به روش FSW، استخراج و تعیین خواهند شد.

### ۲-۳- انتخاب طرح آزمایش

در پژوهش پیش رو، روش رویه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۹-۴۱]. در اکثر مسائل مربوط به روش رویه پاسخ، نحوه ارتباط میان پاسخ و متغیرهای ورودی، نامعلوم است؛ بنابراین اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب از رابطه واقعی موجود میان متغیر پاسخ (Y) و مجموعه متغیرهای مستقل (X) است. در این پژوهش، از تابع تقریب‌کننده به صورت مدل مرتبه دوم استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

جدول ۱- عوامل آزمایش و دامنه تغییرات آنها در فرآیند

FSW						متغیر	نماد	واحد	-۲	-۱	۰	+۱	+۲
سرعت دورانی	N	rpm	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰						
نرخ پیشروی	S	mm/min	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰						
قطر شانه	D	mm	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۱						
زاویه انحراف	A	درجه	۰	۱/۵	۳	۴/۵	۶						

فرآیند، تعیین "میزان انحراف میکروسختی مناطق سه‌گانه موجود در مقطع عرضی اتصال نسبت به میکروسختی فلز پایه" به عنوان پارامتر پاسخ، تحلیل آماری و مدل‌سازی ریاضی پارامتر MHD در فرآیندهای FSW و SFSW با استفاده از روش رویه پاسخ و بهینه‌سازی متغیرهای موثر بر سختی مناطق سه‌گانه مقطع عرضی اتصالات به منظور کمینه‌سازی پارامتر MHD با استفاده از روش مطلوبیت.

## ۲- تحلیل آماری و بهینه‌سازی فرآیند FSW

### ۲-۱- انتخاب متغیر پاسخ

با توجه به اینکه در مقطع عرضی اتصال تولیدی حاصل از فرآیندهای FSW و SFSW، سه منطقه به نام‌های: منطقه متأثر از حرارت (HAZ)<sup>۱</sup>، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی (TMAZ)<sup>۲</sup> و منطقه اغتشاشی (SZ) وجود دارد، به منظور بررسی و ارزیابی تغییرات میکروسختی مناطق فوق الذکر نسبت به فلز پایه (BM)<sup>۳</sup>، از پارامتر MHD<sup>۴</sup> استفاده می‌شود.

این پارامتر بر میزان انحراف میکروسختی مناطق سه‌گانه موجود در مقطع عرضی اتصال نسبت به میکروسختی فلز پایه دلالت دارد. مقدار انحراف میکروسختی نسبت به فلز پایه، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۳۸]:

$$MHD = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_{bm})^2}{n} \quad (1)$$

در این رابطه،  $x_i$ : میکروسختی نقاط مختلف در مقطع عرضی اتصال و  $x_{bm}$ : میکروسختی فلز پایه است؛ همچنین، تعداد نقاطی که میکروسختی آنها اندازه‌گیری شده است، با نماد  $n$  مشخص شده است. با توجه به این که سختی فلز جوش نسبت به سختی فلز پایه کمتر است، بنابراین با افزایش میکروسختی مناطق سه‌گانه، مقدار این پارامتر کاهش می‌یابد که دلالت بر بهبود و ارتقاء خواص مکانیکی مقطع عرضی اتصال دارد.

### ۲-۲- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات

<sup>1</sup> Heat Affected Zone

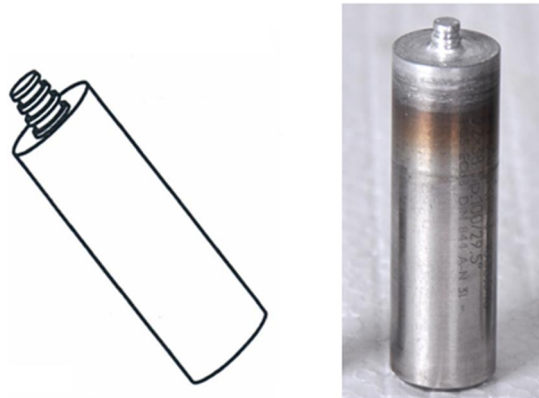
<sup>2</sup> Thermo-Mechanically Affected Zone

<sup>3</sup> Base Metal

<sup>4</sup> Micro Hardness Deviation

جدول ۲- طراحی آزمون‌های FSW و نتایج اندازه‌گیری

شماره آزمون	متغیرهای ورودی			متغیرهای خروجی		
	سرعت دورانی (N)	نرخ پیشروی (S)	قطر شانه (D)	زاویه انحراف (A)	پارامتر MHD	استحکام تسلیم (MPa)
۱	۰	۰	۰	۲	۹۵۴/۶۶۷	۲۹۸
۲	۲	۰	۰	۰	۶۰۴/۸۲۳	۳۹۲
۳	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۴	۱	-۱	۱	-۱	۶۵۲/۸۲۳	۳۷۰
۵	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۶	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۷	۰	۲	۰	۰	۶۲۲/۵۰۰	۳۹۰
۸	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۹	۱	-۱	-۱	۱	۱۵۰۰	۳۰۲
۱۰	۱	-۱	۱	۱	۶۹۳	۳۷۰
۱۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱۲۶۵/۸۲۳	۲۸۵
۱۲	-۱	-۱	-۱	۱	۱۱۱۱/۸۲۳	۲۷۰
۱۳	۱	۱	-۱	-۱	۱۰۵۲/۱۶۷	۲۹۸
۱۴	-۱	-۱	۱	۱	۹۴۲/۶۶۷	۲۵۲
۱۵	۰	۰	-۲	۰	۷۶۰/۶۶۷	۳۱۰
۱۶	-۱	۱	۱	-۱	۱۰۳۰/۵۰۰	۲۷۵
۱۷	-۱	۱	۱	۱	۱۴۳۳/۸۲۳	۲۶۷
۱۸	۱	-۱	-۱	-۱	۸۲۷/۶۶۷	۲۸۸
۱۹	-۱	-۱	۱	-۱	۶۷۰/۶۶۷	۲۹۰
۲۰	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۲۱	۱	۱	۱	-۱	۴۶۵/۱۶۷	۳۷۲
۲۲	-۲	۰	۰	۰	۱۰۵۲/۳۳۳	۲۵۵
۲۳	۰	۰	۲	۰	۳۱۹/۱۶۷	۳۹۱
۲۴	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۲۵	-۱	۱	-۱	۱	۱۱۲۳/۶۶۷	۲۷۰
۲۶	۰	۰	۰	-۲	۴۱۶/۵	۳۶۴
۲۷	۰	۰	۰	۰	۸۳۵/۸۲۳	۳۸۵
۲۸	۱	۱	۱	۱	۵۵۲/۵	۳۰۸
۲۹	-۱	-۱	-۱	-۱	۹۶۶/۶۶۷	۲۶۱
۳۰	۱	۱	-۱	۱	۸۶۸	۲۶۵
۳۱	۰	-۲	۰	۰	۸۱۶	۳۱۴



شکل ۲- طراحی و ساخت نمونه‌ای از ابزار FSW

جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ Al7075-T6 [۴۳]

درصد وزنی (%)	نام عنصر
۸۷/۱ - ۹۱/۴	آلومینیم
۵/۱ - ۶/۱	روی
۲/۱ - ۲/۹	منیزیم
۱/۲ - ۲	مس
۰/۵	آهن
۰/۴	سیلیسیم
۰/۳	منگنز
۰/۱۸ - ۰/۲۸	کروم
۰/۲	تیتانیم

عرضی، اتصالات تولیدی تحت عملیات برش و سنباده زنی قرار گرفتند. سپس، هر یک از ۳۱ مقطع عرضی مطابق شکل ۵ در چهار منطقه (A) BM، (B) HAZ، (C) TMAZ و (D) SZ تحت آزمون سختی‌سنجی قرار گرفتند. آزمون‌ها مطابق بر استاندارد ASTM E384 و با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنج BUEHLER انجام شدند. میزان بار اعمالی و مدت زمان بارگذاری به ترتیب برابر با ۳۰۰ گرم و ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که سختی فلز پایه (BM) برابر با ۱۶۳ ویکرز اندازه‌گیری شد.

در تابع فوق،  $\beta_0$  مقدار ثابت،  $\beta_i$  ضرایب خطی،  $\beta_{ij}$  ضرایب مرتبه دو،  $\beta_{ij}$  ضرایب تعامل اثر،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل و  $\epsilon$  مقدار خطای مشاهده شده در پاسخ است.

نرم افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، نرم‌افزار Design Expert [۴۲] است. جدول ۲، طراحی اجرای آزمون‌های FSW را به صورت کدگذاری شده و با تعداد ۳۱ اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد هفت آزمون در سطوح مرکزی پارامترها، تکرار خواهد شد.

#### ۲-۴- اجرای فرآیند

جنس ماده تحت آزمایش، آلیاژ Al7075-T6 است. جدول ۳، ترکیب شیمیایی این آلیاژ را نشان می‌دهد.

به منظور آماده سازی آلیاژ Al7075 در وضعیت T6، صفحات آلیاژی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر مطابق استاندارد AMSH6088 [۴۴] تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار گرفتند. بدین منظور در ابتدا عملیات انحلال به مدت یک ساعت و در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد روی قطعات انجام شد. سپس، صفحات آلیاژی برای دستیابی به محلول جامد فوق اشباع تحت عملیات آبدهی<sup>۱</sup> قرار گرفتند. در ادامه، عملیات پیرسازی مصنوعی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد روی قطعات انجام شد. در پایان، صفحات آلیاژی در معرض هوا خنک شدند.

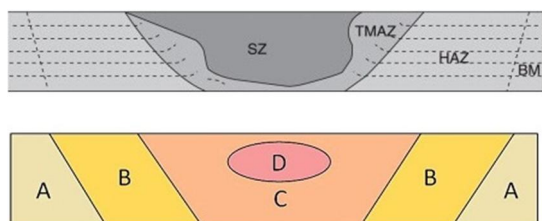
ابزارهای FSW از جنس فولاد ابزار گرم‌کار H13 در پنج قطر شانه ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ میلی‌متر و با هندسه مخروطی شیاردار در قسمت پین، طراحی و ساخته شدند (شکل ۲).

آزمون‌های FSW منطبق بر اصول تشریح شده در بخش مقدمه و مطابق ۳۱ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۲ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال FP4MK انجام شدند (شکل ۳). شکل ۴، نمونه‌ای از اتصال لب به لب تولید شده را نشان می‌دهد.

#### ۲-۵- اندازه‌گیری متغیر پاسخ

برای اندازه‌گیری سختی مقاطع عرضی اتصالات تولیدی از آزمون ویکرز<sup>۲</sup> استفاده شد. از این‌رو، برای آماده‌سازی مقاطع

<sup>۱</sup> Quenching  
<sup>۲</sup> Vickers



شکل ۵- اندازه‌گیری سختی در چهار منطقه از مقطع عرضی

ریاضی میان متغیر پاسخ و پارامترهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون<sup>۴</sup> به کار گرفته خواهد شد [۴۵]. میزان سطح ریسک<sup>۵</sup> ( $\alpha$ ) در فرآیند تحلیل، مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. جدول ۴، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون را برای پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در فرآیند FSW نشان می‌دهد.

مؤثر بودن یک عبارت از طریق مقدار P مربوط به آن عبارت، مشخص می‌شود. هرچه مقدار P مربوط به یک عبارت کوچکتر باشد، معنی‌داری آن عبارت در مدل بیشتر خواهد بود؛ بنابراین با احتساب  $\alpha = 0.05$  و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول D (قطر شانه ابزار) و عبارت تعاملی N.S (حاصل ضرب سرعت دورانی ابزار در نرخ پیشروی ابزار) به عنوان مهمترین عبارات موثر بر پارامتر MHD، معرفی شدند. لازم به ذکر است که سرعت دورانی ابزار و زاویه انحراف ابزار نیز به ترتیب به عنوان دومین و سومین عامل موثر بر پارامتر MHD، شناخته می‌شوند.

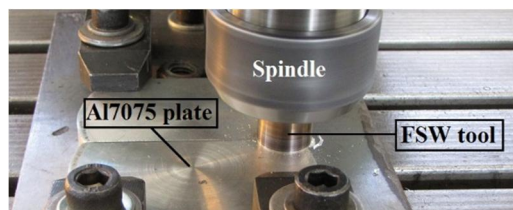
برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. با تأیید عدم معنی‌داری آزمون عدم برازش ( $P_{\text{Lack of fit}} > 0.05$ )، می‌توان دریافت که مدل به خوبی می‌تواند بر داده‌های مورد بررسی، برازش شود. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، آزمون عدم برازش برای متغیر پاسخ، معنی‌دار نیست و در نتیجه مدل ارائه شده به خوبی روند داده‌ها را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، بهترین تحلیل زمانی صورت می‌گیرد که همزمان رگرسیون، موثر و عدم برازش، غیرموثر باشد [۴۵]. از این رو، با توجه به مقادیر

همچنین، برای اندازه‌گیری استحکام تسلیم اتصالات از آزمون کشش استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های کشش مطابق استاندارد ASTM E8<sup>۱</sup> در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند، با استفاده از وایرکات<sup>۲</sup> استخراج و آماده شدند. سپس، هر یک از آن‌ها با استفاده از دستگاه کشش INSTRON و با نرخ پیشروی ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

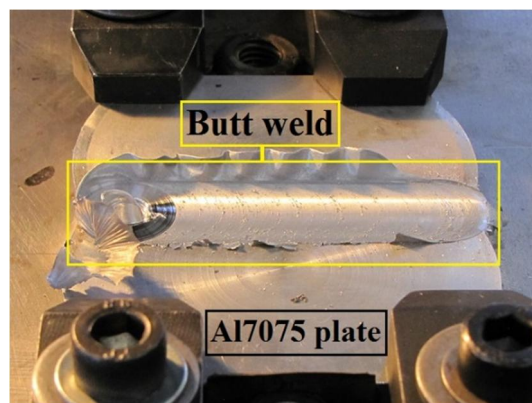
پس از ثبت داده‌های آزمون سختی‌سنجی، پارامتر MHD مطابق رابطه ۱ برای هر یک از مقاطع عرضی محاسبه شد. نتایج اندازه‌گیری و محاسبه پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولیدی به همراه مقادیر استحکام تسلیم حاصل از آزمون کشش، در جدول ۲ درج شده است.

## ۲-۶- تجزیه و تحلیل نتایج

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس<sup>۳</sup> انجام می‌شود؛ همچنین به منظور ایجاد توابع



شکل ۳- اجرای فرآیند FSW



شکل ۴- نمونه‌ای از اتصال لب به لب در فرآیند FSW

<sup>۴</sup> Regression Analysis

<sup>۵</sup> Confidence Level

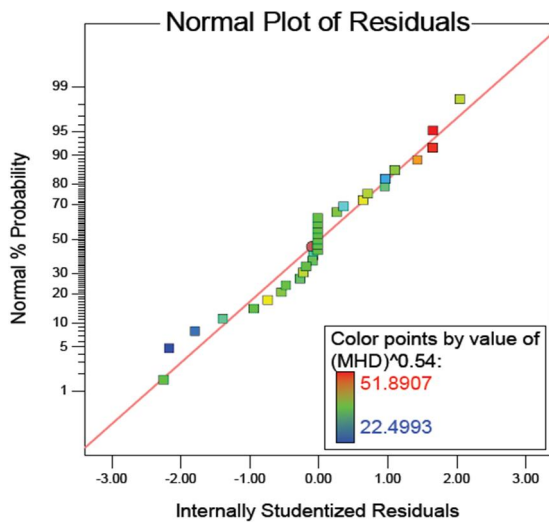
<sup>۶</sup> Lack of Fit

<sup>۱</sup> American Society for Testing and Materials

<sup>۲</sup> Wire Electrical Discharge Machining

<sup>۳</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

با توجه به استخراج معادله رگرسیون، می‌توان مقادیر پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات را پیش از اجرای فرآیند FSW و بر حسب متغیرهای ورودی، پیش‌بینی نمود. همان‌طور که در رابطه ۳ مشاهده می‌شود، تأثیر خطی متغیرهای



شکل ۶- توزیع نرمال مانده‌ها

P مندرج در جدول فوق الذکر ملاحظه می‌شود که عبارت رگرسیون، موثر و عبارت عدم برازش، غیرموثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات متغیر پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می‌گیرد.

مانده به صورت تفاضل پاسخ اندازه‌گیری شده در آزمون تجربی و پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون، تعریف می‌شود. برای آزمون صحت توزیع نرمال مانده‌ها از نمودار احتمال نرمال استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مانده‌ها عموماً از یک خط راست پیروی می‌کنند و شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن و عدم تقارن وجود ندارد.

معادله رگرسیون پارامتر MHD را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کند:

$$(MHD)^{0.54} = 37.88 - 5.82N - 0.17S - 6.88D + 4.87A - 10.81NS - 9.01ND \quad (3)$$

جدول ۴- آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در فرآیند FSW

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۰/۰۰۰۲	۷/۱۱	۱۳۸	۸۲۷/۹۸	۶	مدل رگرسیون
۰/۰۰۳۵	۱۰/۴۷	۲۰۳/۰۹	۲۰۳/۰۹	۱	N (سرعت دورانی ابزار)
۰/۹۲۷۱	$۸/۵۵۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۱۷	۰/۱۷	۱	S (نرخ پیشروی ابزار)
۰/۰۰۰۸	۱۴/۶۵	۲۸۴/۳۲	۲۸۴/۳۲	۱	D (قطر شانه ابزار)
۰/۰۱۲۲	۷/۳۴	۱۴۲/۴۳	۱۴۲/۴۳	۱	A (زاویه انحراف ابزار)
۰/۰۲۱۸	۶/۰۲	۱۱۶/۸۷	۱۱۶/۸۷	۱	N.S
۰/۰۰۵۲	۴/۱۸	۸۱/۱۱	۸۱/۱۱	۱	N.D
-	-	۱۹/۴۰	۴۶۵/۶۹	۲۴	خطای مانده
۰/۰۰۷۸	۲/۳۳	۲۵/۸۷	۴۶۵/۶۹	۱۸	عدم برازش
-	-	۰	۰	۶	خطای خالص
-	-	-	۱۲۹۳/۶۷	۳۰	مجموع



ارتباط میان قطر شانه ابزار و زاویه انحراف ابزار نیز در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، با تنظیم و تثبیت قطر شانه ابزار در یک مقدار معین، کاهش زاویه انحراف ابزار نسبت به راستای قائم، موجب کاهش مقدار پارامتر MHD می‌شود. در این وضعیت، کاهش زاویه انحراف ابزار منجر به اختلاط بهتر و موثرتری از مواد فلز پایه در درز اتصال می‌شود که منتج به بهبود سختی مقطع عرضی اتصال خواهد شد.

### ۷-۲- بهینه‌سازی و صحه‌گذاری

در این پژوهش، روش مطلوبیت<sup>۳</sup> به عنوان روش بهینه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۵]. هدف تابع مطلوبیت، کمینه سازی متغیر پاسخ (پارامتر MHD) است؛ بنابراین، مطلوبیت به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$d = \begin{cases} 1 & y < L \\ \left(\frac{U-y}{U-L}\right)^r & L \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه فوق، پارامترهای  $L$  و  $U$  به ترتیب، حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ  $y$  هستند. شکل تابع مطلوبیت بستگی به میدان وزنی<sup>۴</sup> ( $r$ ) دارد که برای بیان درجه اهمیت مقادیر هدف<sup>۵</sup>، استفاده می‌شود. در این پژوهش، مقدار وزن مساوی یک فرض می‌شود و در نتیجه، تابع مطلوبیت در مود خطی تعریف خواهد شد. جدول ۵، ترکیب بهینه منتخب از مقادیر متغیرهای ورودی فرآیند را با بالاترین مقدار تابع مطلوبیت (۰/۹۷۶) جهت دستیابی به مقادیر کمینه از پارامتر MHD نشان می‌دهد.

بنابراین، با توجه به مقدار بالای تابع مطلوبیت، می‌توان دریافت که روند بهینه سازی به طور موفقیت‌آمیزی، هدف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.

برای صحه‌گذاری ترکیب پارامتری بهینه، آزمون تجربی توسط ابزاری به قطر شانه ۱۸ میلی‌متر و با تنظیم سرعت دورانی، نرخ پیشروی و زاویه انحراف ابزار در مقادیر نزدیک به

ورودی فرآیند بر پارامتر MHD به ترتیب اهمیت عبارتند از: قطر شانه ابزار، سرعت دورانی ابزار، زاویه انحراف ابزار و نرخ پیشروی ابزار؛ همچنین، تأثیر تعاملی متغیرهای ورودی فرآیند به ترتیب اهمیت عبارتند از: حاصل ضرب سرعت دورانی در نرخ پیشروی ابزار و حاصل ضرب سرعت دورانی در قطر شانه ابزار.

آرپگاست [۴۶] رابطه میان شاخص حرارتی  $(HI)$  با سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار در فرآیند FSW را به صورت رابطه (۴) ارائه کرد:

$$(HI) \text{ or } \left(\frac{T}{T_m}\right)^\alpha = K \left(\frac{N^2}{S \times 10^4}\right)^\alpha \quad (4)$$

در این رابطه،  $T$ : بیشینه دما،  $T_m$ : دمای ذوب ماده،  $N$ : سرعت دورانی ابزار،  $S$ : نرخ پیشروی ابزار و  $K$  و  $\alpha$  به عنوان ثوابت ماده هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص حرارتی به صورت مستقیم با سرعت دورانی ابزار متناسب است و به صورت معکوس با نرخ پیشروی ابزار، تغییر می‌کند. از این‌رو، افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش نرخ پیشروی ابزار، موجب افزایش و تشدید شاخص حرارتی خواهد شد که منجر به انحلال و درشت‌شدگی رسوبات تقویت‌کننده در ناحیه جوش می‌شود [۴۷]. از این‌رو، با کاهش چگالی نابعی‌ها، خواص مکانیکی اتصال دچار افت می‌شود [۴۸].

چگونگی تغییرات متغیر پاسخ بر حسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه بُعدی منحنی رویه پاسخ<sup>۲</sup> نشان داد. همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، تنظیم همزمان مقادیر پارامترهای سرعت دورانی و قطر شانه ابزار در سطح بیشینه منتج به دستیابی به کمترین مقدار پارامتر MHD می‌شود. این موضوع ناشی از ایجاد اغتشاش مطلوب در منطقه جوشکاری است که منجر به تشدید تأثیرات کرنش‌سختی شده و منتج به بهبود سختی مقطع عرضی اتصال خواهد شد؛ همچنین در صورتی که سرعت دورانی ابزار در بیشترین مقدار (۱۲۰۰ دور بر دقیقه) تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از ۹ به ۲۱ میلی‌متر موجب کاهش مقدار پارامتر MHD می‌شود.

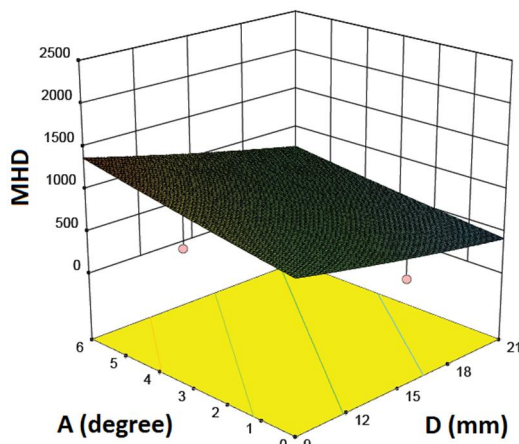
<sup>3</sup> Desirability Method

<sup>4</sup> Weight field

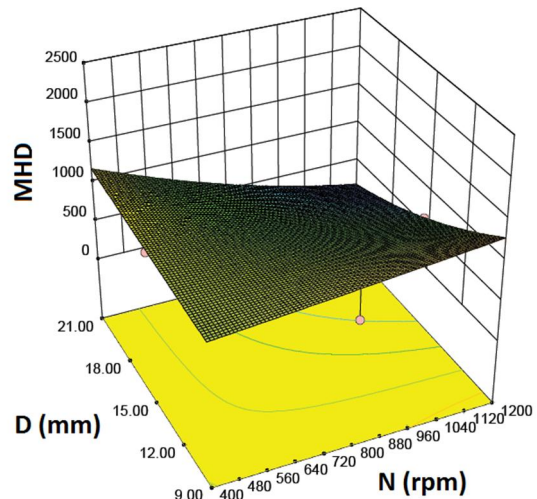
<sup>5</sup> Target value

<sup>1</sup> Heat Index

<sup>2</sup> Surface Plot



(ب) بررسی تأثیر A و D



(الف) بررسی تأثیر D و N

شکل ۷- تأثیر متغیرهای ورودی بر پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات حاصل از فرآیند FSW

جدول ۶- نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت‌گذاری

متغیر پاسخ	بهینه‌سازی	آزمون صحت‌گذاری	درصد اختلاف
پارامتر MHD	۵۵۱/۰۸۶	۵۳۲/۱۶۷	٪ ۳/۴۳

جدول ۷- عوامل آزمایش و دامنه تغییرات آن‌ها در فرآیند SFSW

متغیر	نماد	واحد	-۱	۰	+۱
سرعت دورانی ابزار	N	rpm	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
قطر شانه ابزار	D	mm	۱۵	۱۸	۲۱

عنوان متغیرهای ورودی فرآیند SFSW انتخاب شدند و هر یک از آن‌ها در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۷)؛ همچنین مقادیر نرخ پیشروی ابزار و زاویه انحراف ابزار در مقدار بهینه به دست آمده از فرآیند FSW، تنظیم و تثبیت شدند.

### ۳-۲- طراحی آزمایش

جدول ۸، طراحی اجرای آزمون‌های SFSW را با مقادیر واقعی و با تعداد ۱۰ اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد دو آزمون در سطوح مرکزی پارامترها، تکرار خواهد شد.

جدول ۵- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند FSW

نوع متغیر	نام متغیر	واحد	مقدار بهینه
ورودی	سرعت دورانی ابزار	rpm	۹۷۱/۴۷
	نرخ پیشروی ابزار	mm/min	۶۲/۵۹
	قطر شانه ابزار	mm	۱۸/۱۴
پاسخ	زاویه انحراف ابزار	درجه	۲/۰۵
	پارامتر MHD	-	۵۵۱/۰۸۶

مقادیر بهینه، به انجام رسید. اختلاف اندک میان نتایج بهینه‌سازی و آزمون تجربی، صحت و دقت فرآیند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند را مورد تأیید قرار داد (جدول ۶).

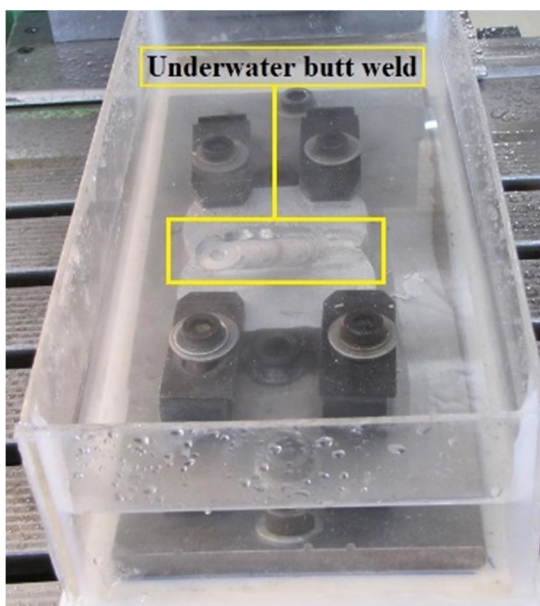
### ۳- تحلیل آماری و بهینه‌سازی فرآیند SFSW

#### ۳-۱- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات

با توجه به اینکه قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار به عنوان مهمترین عبارات خطی موثر بر پارامتر MHD در فرآیند FSW شناخته شدند (جدول ۴) و با عنایت به اینکه مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند FSW استخراج گردید (جدول ۵)، دو متغیر قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار به

جدول ۸- طراحی آزمون‌های SFSW و نتایج اندازه‌گیری

شماره آزمون	متغیرهای ورودی		متغیرهای خروجی	
	سرعت دورانی (N)	قطر شانه (D)	پارامتر MHD	استحکام تسلیم (MPa)
۱	۱۰۰۰	۱۵	۳۵۷	۳۸۹
۲	۱۰۰۰	۱۸	۲۷۷/۱۶۷	۳۲۱
۳	۸۰۰	۱۵	۲۶۴	۴۱۲
۴	۸۰۰	۲۱	۱۷۹/۱۶۷	۴۱۷
۵	۸۰۰	۱۸	۲۱۶/۵	۳۲۷
۶	۱۰۰۰	۲۱	۲۳۵/۸۳۳	۳۸۵
۷	۱۰۰۰	۱۸	۲۷۷/۱۶۷	۳۲۱
۸	۱۲۰۰	۲۱	۲۴۰/۵	۴۲۱
۹	۱۲۰۰	۱۵	۹۳/۱۶۷	۴۳۱
۱۰	۱۲۰۰	۱۸	۳۷۳/۶۶۷	۳۹۰



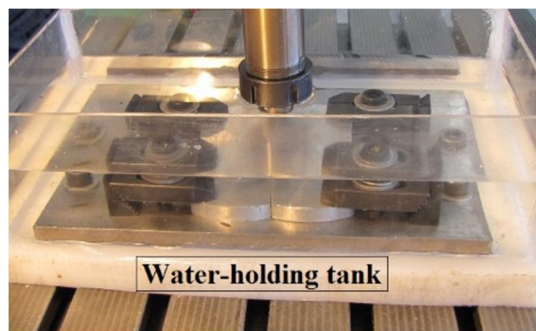
شکل ۹- نمونه‌ای از اتصال لب به لب در فرآیند SFSW

### ۳-۴- اندازه‌گیری متغیر پاسخ

برای اندازه‌گیری متغیر پاسخ، به صورت مشابه با فرآیند FSW، از آزمون سختی‌سنجی استفاده می‌شود؛ همچنین،

### ۳-۳- اجرای فرآیند

شکل ۸ قرارگیری قطعات به صورت لب به لب در فیکسچر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مجموعه فیکسچر و قطعات در داخل مخزنی حاوی آب قرار گرفته است. سپس، آزمون‌های SFSW منطبق بر اصول تشریح شده در بخش مقدمه و مطابق ۱۰ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۸ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال FP4MK انجام شدند. شکل ۹، نمونه‌ای از اتصال لب به لب تولید شده در فرآیند SFSW را نشان می‌دهد.



شکل ۸- قرارگیری مجموعه فیکسچر در مخزن حاوی آب

برای اندازه‌گیری استحکام تسلیم اتصالات از آزمون کشش استفاده شد. نتایج محاسبه پارامتر MHD مربوط به مقاطع عرضی اتصالات حاصل از فرآیند SFSW به همراه مقادیر استحکام تسلیم حاصل از آزمون کشش، در جدول ۸ درج شده است.

### ۳-۵- تجزیه و تحلیل نتایج

مقایسه مقادیر پارامتر MHD مندرج در جدول ۲ (فرآیند FSW) و جدول ۸ (فرآیند SFSW) نشان می‌دهد که میزان انحراف میکروسختی مناطق سه گانه موجود در مقطع عرضی اتصال نسبت به میکروسختی فلز پایه، در فرآیند SFSW به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به عبارت دیگر، مقادیر سختی مناطق سه گانه SZ، TMAZ و HAZ در فرآیند SFSW به سختی فلز پایه (BM) نزدیک شده است و بهبود موثری در مقادیر سختی مناطق حاصل از اجرای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، حاصل شده است. این نتیجه، دستاوردهای حاصل از تحقیقات سایر پژوهشگران [۲۸ و ۳۱] را مورد تأیید قرار می‌دهد.

از سوی دیگر، استحکام تسلیم فلز پایه (AI7075-T6) مساوی ۴۱۰ مگاپاسکال است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، پدیده نرم‌شدگی عموماً در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم رخ می‌دهد؛ بنابراین، انتظار می‌رود، مقادیر استحکام تسلیم فلز جوش حاصل از اجرای فرآیند FSW، کمتر از استحکام تسلیم

فلز پایه باشد. با مروری بر مقادیر استحکام تسلیم مندرج در جدول ۲ (آزمون FSW) می‌توان دریافت که بیشینه استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده مساوی ۳۹۲ مگاپاسکال است (ردیف ۲ آزمون FSW). از سوی دیگر، با افزایش نرخ خنک‌کاری و با کاهش دمای بیشینه، می‌توان خواص مکانیکی اتصال جوشی را بهبود بخشید. از این‌رو، مطابق مقادیر استحکام تسلیم فلز جوش حاصل از اجرای فرآیند SFSW مندرج در جدول ۸، می‌توان دریافت که بیشینه استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده مساوی ۴۳۱ مگاپاسکال است (ردیف ۹ آزمون SFSW)؛ بنابراین، اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با بهره‌گیری از تأثیر افزایش نرخ خنک‌کاری توانسته است، بیشینه مقدار استحکام تسلیم فلز جوش را به صورت قابل ملاحظه‌ای ارتقاء دهد و منتج به ارتقاء خواص تسلیم اتصال جوشی حاصل از فرآیند FSW شود.

جدول ۹، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون را برای پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در فرآیند SFSW نشان می‌دهد.

رابطه ۶، معادله رگرسیون پارامتر MHD را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کند:

$$(MHD)^{1.25} = 1016.73 + 54.88N - 63.11D \quad (6)$$

جدول ۹- آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در فرآیند SFSW

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۰/۰۰۲۷	۷/۱۱	۲۰۹۸۳/۶۲	۴۱۹۶۷/۲۵	۲	مدل رگرسیون
۰/۰۰۶۳	۱۰/۴۷	۱۸۰۷۳/۶۷	۱۸۰۷۳/۶۷	۱	N (سرعت دورانی ابزار)
۰/۰۰۳۹	۱۴/۶۵	۲۳۸۹۳/۵۸	۲۳۸۹۳/۵۸	۱	D (قطر شانه ابزار)
-	-	$1/960 \times 10^5$	$1/372 \times 10^6$	۷	خطای مانده
۰/۰۰۹۸	۲/۳۳	$2/287 \times 10^5$	$1/372 \times 10^6$	۶	عدم برازش
-	-	۰	۰	۱	خطای خالص
-	-	-	$1/414 \times 10^6$	۹	مجموع

(حاصل ضرب سرعت دورانی ابزار در نرخ پیشروی ابزار) به عنوان مهمترین عبارات موثر بر پارامتر MHD در فرآیند FSW شناخته شدند.

- صلاحیت و کفایت مدل رگرسیون پارامتر MHD در فرآیند FSW توسط آزمون عدم برازش و نمودار احتمال نرمال مورد بررسی قرار گرفت و توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات پارامتر پاسخ، مورد تأیید قرار گرفت.

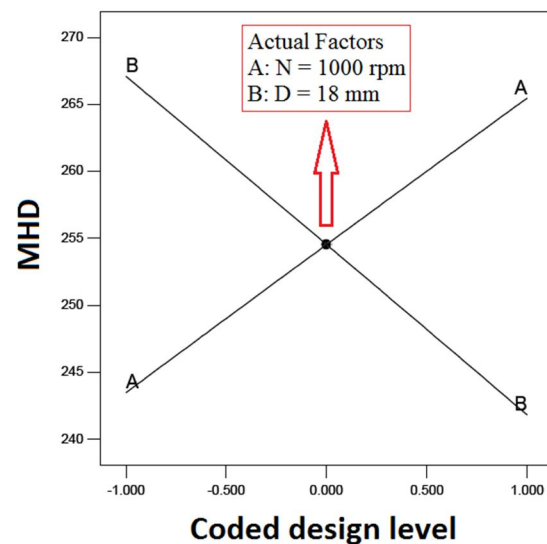
- معادلات رگرسیون حاصل از آنالیز واریانس برای پیش‌بینی مقادیر پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات تولید شده در فرآیندهای FSW و SFSW به عنوان تابعی از اثرات خطی و تعاملی متغیرهای ورودی فرآیند، استخراج گردید. از این‌رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به مینیمم پارامتر پاسخ، وجود دارد.

- معادله رگرسیون پارامتر MHD در فرآیند FSW نشان داد که تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر پاسخ به ترتیب اهمیت عبارتند از: قطر شانه ابزار، سرعت دورانی ابزار، زاویه انحراف ابزار و نرخ پیشروی ابزار.

- معادله رگرسیون پارامتر MHD در فرآیند SFSW نشان داد که تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر پاسخ به ترتیب اهمیت عبارتند از: قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار؛ همچنین، افزایش قطر شانه ابزار نسبت به سطح میانه (۱۸ میلی‌متر) و کاهش سرعت دورانی ابزار نسبت به سطح میانه (۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، موجب کاهش مقدار پارامتر MHD می‌شود.

- بررسی نمودارهای منحنی رویه پاسخ نشان داد که تنظیم همزمان مقادیر پارامترهای سرعت دورانی و قطر شانه ابزار در سطح بیشینه منتج به دستیابی به کمترین مقدار پارامتر MHD می‌شود؛ همچنین، با تنظیم و تثبیت قطر شانه ابزار در یک مقدار معین، کاهش زاویه انحراف ابزار نسبت به راستای قائم، موجب کاهش مقدار پارامتر MHD می‌شود.

همان‌طور که در رابطه ۶ مشاهده می‌شود، تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر MHD به ترتیب اهمیت عبارتند از: قطر شانه ابزار و سرعت دورانی ابزار. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، افزایش قطر شانه ابزار نسبت به سطح میانه (۱۸ میلی‌متر) و کاهش سرعت دورانی ابزار نسبت به سطح میانه (۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، موجب کاهش مقدار پارامتر MHD می‌شود. لازم به ذکر است که به کارگیری ابزار با قطر شانه بزرگتر منجر به افزایش حرارت ورودی به اتصال و تشدید حرارت اصطکاکی می‌شود که منتج به کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌شود؛ همچنین، کاهش بیش از حد سرعت دورانی ابزار، منجر به افت تأثیر اغتشاشی ابزار می‌شود که کاهش سختی مقطع عرضی اتصال را به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۰- تأثیر متغیرهای N و D بر پارامتر MHD مقاطع عرضی اتصالات حاصل از فرآیند SFSW

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سختی مقطع عرضی اتصال لب به لب آلیاژ Al7075 تولید شده در فرآیندهای FSW و SFSW با استفاده از روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت، به انجام رسید. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول (قطر شانه ابزار) و عبارت تعاملی N.S

- [5] Steel RJ, Packer SM, Fleck RD, Sanderson S, Tucker C (2013) Advances in FSW and new applications. Editor: Fujii H, Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, Woodhead Publishing 125-127.
- [6] Thomas WM, Nicholas ED (1997) Friction stir welding for the transportation industries. Mater Des 18: 269-273.
- [7] Gite RA, Loharkar PK, Shimpi R (2019) Friction stir welding parameters and application: A review. Mater Today-Proc 19(2): 361-365.
- [8] Woo W, Balogh L, Ungár T, Choo H, Feng Z (2008) Grain structure and dislocation density measurements in a friction-stir welded aluminum alloy using X-ray peak profile analysis. Mater Sci Eng A 498(1-2): 308-313.
- [9] Jata KV, Semiatin SL (2000) Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. Scripta Mater 43: 743-749.
- [10] Ramanjaneyulu K, Madhusudhan Reddy G, Hina G (2015) Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology. Defence Tech 11(3): 209-219.
- [11] Rathinasuriyan C, Sankar R, Avin Ganapathi S, Senthil Kumar VS (2018) Optimization of Welding Parameters for Friction Stir Lap Welding of AA6061-T6 Alloy. Mod Mech Eng 8: 31-41.
- [12] Liu HJ, Fujii H, Maeda M, Nogi K (2003) Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy. Mater Sci Lett 22: 1061-1063.
- [13] Guo Y, Ma Y, Wang F (2019) Dynamic fracture properties of 2024-T3 and 7075-T6 aluminum friction stir welded joints with different welding parameters. Theor Appl Fract Mec 104: 102372.
- [14] Cabibbo M, Mcqueen HJ, Evangelista E, Spigarelli S, Paola MD, Falchero A (2007) Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate. Mater Sci Eng A 460-461: 86-94.
- [15] Fratini L, Buffà G, Shivpuri R (2009) In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints. Int J Adv Manuf Tech 43: 664.
- [16] Sakurada D, Katoh K, Tokisue H (2002) Underwater friction welding of 6061 aluminum alloy. J Jpn Inst Light Met 52 (1): 2-6.
- [17] Derazkola HA, Khodabakhshi F (2019) Underwater submerged dissimilar friction-stir welding of AA5083 aluminum alloy and A441 AISI steel. Int J Adv Manuf Tech 102: 4383-4395.
- [18] Rouzbehani R, Kokabi AH, Sabet H, Paidar M, Ojo OO (2018) Metallurgical and mechanical properties of underwater friction stir welds of
- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند FSW جهت دستیابی به مینیمم مقدار پارامتر MHD، استخراج گردید. مقدار تابع مطلوبیت برابر با ۰/۹۷۶ به دست آمد. از این‌رو، مقدار بالای تابع مطلوبیت، نشان می‌دهد که روند بهینه سازی به طور موفقیت‌آمیزی، هدف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.
  - اختلاف اندک میان نتایج حاصل از بهینه سازی و آزمون صحت‌گذاری (کمتر از ۴ درصد)، صحت و دقت روند بهینه سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند FSW را تأیید کرد.
  - مقایسه مقادیر پارامتر MHD در فرآیندهای FSW و SFSW نشان می‌دهد که مقادیر سختی مناطق سه گانه SZ، TMAZ و HAZ متعلق به مقطع عرضی اتصال حاصل از اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، به سختی فلز پایه نزدیک شده است و بهبود موثری در مقادیر سختی، حاصل شده است؛ همچنین، اجرای فرآیند SFSW با بهره‌گیری از تأثیر افزایش نرخ خنک‌کاری توانست، بیشینه مقدار استحکام تسلیم فلز جوش را به صورت قابل ملاحظه‌ای ارتقاء دهد و منتج به ارتقاء خواص تسلیم اتصال جوشی حاصل از فرآیند FSW شود.

## ۵- مراجع

- [1] Tamasgavabari R, Ebrahimi AR, Abbasi SM, Yazdipour AR (2020) Effect of harmonic vibration during gas metal arc welding of AA-5083 aluminum alloy on the formation and distribution of intermetallic compounds. J Manuf Process 49: 413-422.
- [2] Pujari KS, Patil DV, Mewundi G (2018) Selection of GTAW process parameter and optimizing the weld pool geometry for AA 7075-T6 aluminium alloy. Mater Today-Proc 5(11): 25045-25055.
- [3] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Smith PT, Dawes CJ (1991) Friction stir butt welding. Int. Patent No. PCT/GB92/02203.
- [4] Zhao J, Jiang F, Jian HG, Wen K, Jiang L, Chen XB (2010) Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al-Mg-Sc alloy plates. Mater Des 31: 306-311.

- [32] Lokesh R, Senthil Kumar VS, Rathinasuriyan C, Sankar R (2015) Optimization of Process Parameters: Tool Pin Profile, Rotational Speed and Welding Speed for Submerged Friction Stir Welding of AA6063 Alloy. *Int J Tech Res Appl* 12: 35-38.
- [33] Rathinasuriyan C, Senthil Kumar VS (2016) Modelling and optimization of submerged friction stir welding parameters for AA6061-T6 alloy using RSM. *Kovove Mater* 54: 297-304.
- [34] Zhang HJ, Liu HJ, Yu L (2011) Microstructure and mechanical properties as a function of rotation speed in underwater friction stir welded aluminum alloy joints. *Mater Des* 32: 4402-4407.
- [35] Liu HJ, Zhang HJ, Yu L (2011) Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy. *Mater Des* 32(3): 1548-1553.
- [36] Zhang Z, Xiao BL, Ma ZY (2014) Influence of water cooling on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2014Al-T6 joints. *Mater Sci Eng A* 614: 6-15.
- [37] Sabari SS, Malarvizhi S, Balasubramanian V, Reddy G (2016) The effect of pin profiles on the microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welded AA2519-T87 aluminium alloy. *Int J Mech Mater Eng* 11(5): 1-14.
- [38] Jelokhani-Niaraki MR, Mostafa Arab NB, Naffakh-Moosavy H, Ghoreishi M (2016) The systematic parameter optimization in the Nd:YAG laser beam welding of Inconel 625. *Int J Adv Manuf Tech* 84(9-12): 2537-2546.
- [39] Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM (2016) *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118 91601-8.
- [40] Vahdati M, Moradi M (2020) Statistical analysis and optimization of the yield strength and hardness of surface composite Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produced by FSP via RSM and desirability approach. *Iran J Mater Form* 7(1): 32-45.
- [41] Vahdati M, Moradi M, Shamsborhan M (2020) Modeling and Optimization of the Yield Strength and Tensile Strength of Al7075 Butt Joint Produced by FSW and SFSW Using RSM and Desirability Function Method. *T Indian I Metals* 73: 2587-2600.
- [42] Design Expert software, version 11, <http://www.statease.com>.
- [43] <http://www.matweb.com>
- [44] AMSH6088: Heat Treatment of Aluminum Alloys, SAE International, <https://www.sae.org>.
- Al7075 aluminum alloy. *J Mater Process Tech* 262: 239-256.
- [19] Mofid MA, Abdollah-Zadeh A, Ghaini FM, Gur CH (2012) Submerged friction-stir welding (SFSW) underwater and under liquid nitrogen: An improved method to join Al alloys to Mg alloys. *Metall Mater Trans A* 43: 5106-5114.
- [20] Sabari SS, Malarvizhi S, Balasubramanian V, Reddy GM (2016) Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy. *Defence Tech* 12: 324-333.
- [21] Xua WF, Liu JH, Chen DL, Luan GH, Yao JS (2012) Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding. *Mater Sci Eng A* 548: 89-98.
- [22] Liu HJ, Zhang HJ, Huang YX, Lei Y (2010) Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy. *T Nonferr Metal Soc* 20: 1387-1391.
- [23] Klobcar D, Kosec L, Pietras A, Smolej A (2012) Friction-stir welding of aluminium alloy 5083. *Mater Tehnol* 46: 483-488.
- [24] Darras B, Khraisheh M, Abu-Farha F (2007) Friction stir processing of AZ31 commercial magnesium alloy. *J Mater Process Tech* 191: 77-81.
- [25] Kishta EE, Darras B (2014) Experimental investigation of underwater friction-stir welding of 5083 marine-grade aluminum alloy. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf* 230(3): 458-465.
- [26] Hosseini M, Manesh HD (2010) Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded al alloy. *Mater Des* 31: 4786-4791.
- [27] Liu HJ, Zhang HJ, Huang YX, Lei Y (2010) Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy. *T Nonferr Metal Soc* 20: 1387-1391.
- [28] Wang KS, Wu JL, Wang W, Zhou LH, Lin ZX, Kong L (2012) Underwater friction stir welding of ultrafine grained 2017 aluminum alloy. *J Cent South Univ* 19: 2081-2085.
- [29] Zhang HJ, Liu HJ, Yu L (2012) Effect of water cooling on the performances of friction stir welding heat-affected zone. *J Mater Eng Perform* 21(7): 1182-1187.
- [30] De PS, Mishra RS (2011) Friction stir welding of precipitation strengthened aluminium alloys: scope and challenges. *Sci Technol Weld Joi* 16: 343-347.
- [31] Wang Q, Zhao Z, Zhao Y, Yan K, Liu C, Zhang H (2016) The strengthening mechanism of spray forming Al-Zn-Mg-Cu alloy by underwater friction stir welding. *Mater Des* 102: 91-99.

- [47] Benavides S, Li Y, Murr LE, Brown D, McClure JC (1999) Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminium. *Scripta Mater* 41(8): 809-815.
- [48] Shanmuga Sundaram N, Murugan N (2010) Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys. *Mater Des* 31(9): 4184-4193.
- [45] Montgomery DC (2017) Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-11347-8.
- [46] Arbogast WJ (2003) Modeling friction stir joining as a metalworking process. *Proc. Hot Def Alum All III*: 313-327.