



## تحلیل آماری و بهینه‌سازی استحکام کششی اتصال لب‌به‌لب آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خشک و خیس با استفاده از روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت

مهدی وحدتی<sup>۱\*</sup>، محمود مرادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

### کلمات کلیدی:

تحلیل آماری

بهینه‌سازی

استحکام کششی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

روش رویه پاسخ

**خلاصه:** تأثیرات ناشی از سیکل‌های حرارتی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به نرم‌شدگی اتصال آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم می‌شود. برای رفع این محدودیت، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب توسعه یافته است. در این پژوهش، در ابتدا با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصالات لب‌به‌لب از آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ تولید شدند. بدین منظور، 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 پارامترهای موثر بر استحکام کششی اتصالات به انجام رسید. سپس با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب و بر اساس مقادیر بهینه نرخ پیشروی ابزار و زاویه انحراف ابزار، اتصالات لب‌به‌لب تولید شدند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی، صحت و دقت معادلات رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که عبارات خطی، تعاملی و سهموی از متغیرهای سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار بر استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در زیر آب، موثر هستند. همچنین، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند با استفاده از روش مطلوبیت، تعیین شد و با اجرای آزمون صحت‌گذاری، به تأیید رسید.

### ۱- مقدمه

عیوب متداول در جوشکاری ذوبی در این فرآیند ظاهر نمی‌شوند که این امر موجب بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری جوش می‌شود. علاوه بر این، به دلیل کاهش تنش‌های پسماند ناشی از کاهش شار حرارتی، اعوجاج محصولات نهایی نیز کاهش می‌یابد [۴ و ۵]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم توسعه داده شد و در ادامه، برای بسیاری از مواد و آلیاژهای متفاوت به کار گرفته شد. این فرآیند در صنایع متعددی همچون: هوافضا، خودروسازی، راه‌آهن، کشتی‌سازی و سازه‌های دریایی کاربرد دارد [۶-۸].

اتصال آلیاژهای آلومینیوم [۱] و منیزیم [۲] با استفاده از فرآیندهای جوشکاری ذوبی همواره با مسائل و مشکلات متنوعی مواجه بوده است. بروز معایبی همچون: ترک، حفره و تخلخل در طی جوشکاری ذوبی، بر کیفیت و خواص مکانیکی جوش تأثیر می‌گذارد. در دهه ۱۹۹۰ میلادی، یک فرآیند جوشکاری حالت جامد با نام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> توسط موسسه جوشکاری انگلستان [۳] توسعه یافت. در این فرآیند، درجه حرارت در زیر دمای سالیدوس<sup>۲</sup> باقی می‌ماند و هیچ‌گونه ذوبی ایجاد نمی‌شود. از این‌رو،

در این فرآیند، یک ابزار چرخشی غیرمصرفی با هندسه پین و شانه در ماده نفوذ می‌کند و نیروی عمودی را بر قطعه کار اعمال

1 Friction stir welding (FSW)

2 Solidus temperature

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vahdati@shahroodut.ac.ir



می‌نماید. حرکت خطی ابزار باعث جابجایی ماده از ناحیه پیشرو<sup>۱</sup> به ناحیه پسرو<sup>۲</sup> می‌شود. سپس، ماده در ناحیه پشت پین توسط شانه ابزار، مخلوط و تثبیت می‌شود که منجر به ایجاد اتصال جامد خواهد شد [۹-۱۱].

اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به تولید میکروساختار ریزدانه در منطقه اغتشاشی می‌شود. از این‌رو، خواص مکانیکی مطلوبی در قطعه کار مشاهده می‌شود. اگرچه حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با فرآیند جوشکاری ذوبی<sup>۳</sup> کمتر است، با این وجود، پدیده نرم‌شدگی عموماً در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم رخ می‌دهد. به منظور رفع این مشکل، می‌توان نرخ خنک‌کاری را افزایش داد و با کاهش دمای بیشینه، خواص مکانیکی اتصال را بهبود بخشید. بدین‌منظور، خنک‌کاری خارجی در تعدادی از فرآیندهای اتصال‌دهی حالت جامد به کار گرفته شده است [۱۲-۱۴].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب<sup>۴</sup> به عنوان مدل بهبودیافته‌ای از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی 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 [۱۵-۱۷]. در این فرآیند، جوشکاری در زیر آب انجام می‌شود. از این‌رو، فرآیند در یک مخزن آب و یا در وضعیتی که آب به صورت پیوسته از روی سطح قطعه کار عبور نماید، انجام می‌شود. در طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، ظرفیت بالای جذب حرارتی آب موجب کاهش نرخ انتقال حرارت به منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی<sup>۵</sup> و منطقه متأثر از حرارت<sup>۶</sup> می‌شود. از این‌رو، دمای پایین موجود در این مناطق نمی‌تواند منجر به درشت‌شدگی رسوبات شود [۱۸]. همچنین به علت کاهش حرارت ورودی، عرض مناطق متأثر از حرارت و کار مکانیکی و متأثر از حرارت کاهش می‌یابد [۱۸ و ۱۹]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با کاهش عیوب متنوع جوشکاری همچون: تخلخل، انقباض حجمی، ترک‌خوردگی ناشی از انجماد و اعوجاج ناشی از تنش‌های پسماند، موجب بهبود خواص مکانیکی می‌شود. این فرآیند برای آلیاژهای

حساس به حرارت در طی فرآیند جوشکاری، مناسب است. از این‌رو به طور گسترده‌ای برای آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود [۲۰ و ۲۱]. به علت تغییر شکل شدید ماده در فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، تغییرات میکروساختاری متفاوتی در نواحی مختلفی از مقطع اتصال رخ می‌دهد. این تغییرات میکروساختاری منجر به ایجاد تغییرات ویژه‌ای در خواص مکانیکی اتصال می‌شود. رفتار کششی اتصال در فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب به طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از اغتشاش، گرمایش و شرایط خنک‌کاری است [۲۲-۲۵]. نتایج تحقیقات نشان داده است که نوع خنک‌کاری (هوا یا آب) نقش مهمی در بهبود خواص کششی اتصال دارد [۲۱ و ۲۲]. یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که خواص کششی اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب بهتر از اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است [۱۸ و ۲۰].

لیو و همکاران [۲۱]، خواص کششی آلیاژ آلومینیوم گرید ۲۲۱۹ را بر اساس استفاده از هوا و آب به عنوان خنک‌کننده، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استحکام کششی اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب افزایش یافته است که این موضوع ناشی از اصلاح دانه‌بندی و افزایش چگالی نابجایی بوده است. همچنین، وانگ و همکاران [۲۶] در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۵۵ به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها نشان دادند که استحکام کششی اتصال در محیط آبی نسبت به محیط هوایی به میزان ۱۵ درصد افزایش می‌یابد که این موضوع ناشی از بهبود سیکل حرارتی و تأثیر آن بر مکانیزم استحکام‌بخشی محلول جامد بوده است. کیشتا و داراس [۲۷] خواص کششی آلیاژ آلومینیوم غیرقابل‌عملیات حرارتی گرید ۵۰۸۳ را در محیط‌های خنک‌کننده هوایی و آبی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که استحکام کششی اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب افزایش یافته است و به محدوده استحکام فلز پایه نزدیک شده است.

از سوی دیگر، تغییرات سرعت دورانی ابزار [۲۴ و ۲۷]، سرعت جوشکاری [۲۳ و ۲۸] و عمق نفوذ ابزار نیز منجر به تغییر شرایط اصطکاکی و اغتشاشی می‌شود که در نتیجه بر استحکام کششی اتصال تأثیر می‌گذارد. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در

- 1 Advancing side (AS)
- 2 Retreating side (RS)
- 3 Fusion welding (FW)
- 4 Submerged friction stir welding (SFSW)
- 5 Thermo-mechanically affected zone (TMAZ)
- 6 Heat affected zone (HAZ)

رگرسیون پارامتر پاسخ (استحکام کششی نهایی) و بهینه‌سازی متغیرهای ورودی موثر بر پارامتر پاسخ با استفاده از تابع مطلوبیت.

## ۲- تحلیل آماری و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

### ۲-۱- انتخاب متغیر پاسخ

به منظور ارزیابی استحکام کششی اتصالات تولیدشده در فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، از شاخص مهم استحکام کششی نهایی استفاده می‌شود. مقدار این پارامتر با استفاده از نتایج آزمون کشش و ثبت میزان تنش و کرنش عملی بر نمونه استاندارد اتصال، به دست می‌آید. از این‌رو در پژوهش حاضر، استحکام کششی نهایی اتصال به عنوان متغیر پاسخ، انتخاب شد.

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

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام‌شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، 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 که منتج به تولید سالم اتصال شد، تعیین گردید (جدول ۱).

لازم به ذکر است که متغیرهای ورودی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب و سطوح تغییرات آن‌ها پس از تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی اتصالات تولیدشده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، استخراج و تعیین خواهند شد.

### ۲-۳- انتخاب طرح آزمایش

در پژوهش پیش‌رو، روش روبه پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹-۳۱]. در اکثر مسائل مربوط به روش روبه 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

زیر آب آلیاژ آلومینیوم گرید ۲۲۱۹ مشاهده شد که افزایش سرعت دورانی ابزار تا حد معینی، استحکام کششی اتصال را بهبود می‌دهد که به علت افزایش تأثیر کرنش‌سختی است [۱۸]. همچنین با افزایش سرعت جوشکاری، استحکام کششی افزایش می‌یابد که به دلیل گرمایش کافی و اغتشاش مناسب جنس ماده است [۲۳ و ۲۸]. استحکام کششی به میزان کمتری از تغییرات عمق نفوذ ابزار تأثیر می‌پذیرد [۲۴]. افزایش عمق نفوذ باعث افزایش عملیات فورجینگ و اختلاط بیشتر ماده می‌شود که منتج به افزایش استحکام کششی خواهد شد.

مروری بر تحقیقات انجام‌شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نشان می‌دهد که متغیرهای متنوع و متفاوتی بر استحکام کششی اتصال تأثیر می‌گذارند که در اغلب موارد، تأثیر هر یک از آن‌ها به صورت مستقل و برای هر یک از فرآیندهای مذکور به صورت مجزا، مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو با توجه به قابلیت و مزایای فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب در اتصال‌دهی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم، در این پژوهش، تحلیل آماری، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی اتصال لب‌به‌لب آلیاژ آلومینیوم گرید ۲۰۲۵ به تفکیک برای هر دو فرآیند، انجام شد. بدین‌منظور، روش روبه پاسخ<sup>۱</sup> به عنوان روش طراحی آزمایش<sup>۲</sup>، انتخاب شد. در ادامه، تحلیل آماری پارامترهای موثر بر استحکام کششی اتصالات تولیدشده، به انجام رسید. صحت و دقت معادلات رگرسیون با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز واریانس<sup>۳</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 استحکام کششی نهایی<sup>۴</sup> اتصالات تولیدشده مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به تحقیقات مرور شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، مهمترین جوانب نوآوری مقاله پیش‌رو در مقایسه با تحقیقات منتشرشده عبارتند از تمایز و تفاوت در: نوع متغیرهای ورودی فرآیند، روش طراحی و تحلیل آماری آزمون (روش روبه پاسخ)، استخراج معادلات

- 1 Response surface methodology (RSM)
- 2 Design of experiment (DOE)
- 3 Analysis of variance (ANOVA)
- 4 Ultimate tensile strength (UTS)

جدول ۱. عوامل آزمایش و دامنه تغییرات آن‌ها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Table 1. Experimental factors and the extent of their changes in the FSW process

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

با استفاده از فرآیندهای جوشکاری ذوبی، همواره با مشکلاتی مواجه بوده است که از آن جمله می‌توان به واکنش‌پذیری سریع آلومینیوم مذاب با اکسیژن، حساسیت به ترک گرم و ظهور تنش‌های پسماند در جوش، اشاره نمود. از این‌رو، توسعه فرآیندهای نوین جوشکاری حالت جامد به منظور غلبه بر مشکلات فوق‌الذکر و دستیابی به اتصال مستحکم و با کیفیت، امری لازم و ضروری است [۳۷].

به منظور آماده‌سازی آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵<sup>۲</sup>، صفحات آلیاژی به ضخامت ۱۰ میلیمتر مطابق استاندارد عملیات حرارتی آلیاژهای آلومینیوم<sup>۳</sup> [۳۸] تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار گرفتند. بدین‌منظور در ابتدا عملیات انحلال به مدت یک ساعت و در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد بر روی قطعات انجام شد. سپس، صفحات آلیاژی برای دستیابی به محلول جامد فوق‌اشباع تحت عملیات آبدهی<sup>۴</sup> قرار گرفتند. در ادامه، عملیات پیرسازی مصنوعی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد بر روی قطعات انجام شد. در پایان، صفحات آلیاژی در معرض هوا خنک شدند. ابزارهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز از جنس فولاد ابزار گرم‌کار<sup>۵</sup> در پنج قطر شانه ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ میلیمتر و با هندسه مخروطی شیاردار در قسمت پین، طراحی و ساخته شدند (شکل ۱).

آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منطبق بر اصول تشریح‌شده در بخش مقدمه و مطابق ۳۱ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۲ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال<sup>۶</sup> انجام شدند (شکل

مستقل ( $x$ ) است. در این پژوهش، از تابع تقریب‌کننده به صورت مدل مرتبه دوم استفاده می‌گردد که به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

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

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

نرم‌افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> [۳۲] است. جدول ۲، طراحی اجرای آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی 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 آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ است. جدول ۳، ترکیب شیمیایی این آلیاژ را نشان می‌دهد. آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی خوب و استحکام خستگی عالی از اهمیت ویژه‌ای در صنعت برخوردار است [۳۳ و ۳۴]. ویژگی‌های مطلوب این ماده، باعث شده است تا این گرید آلیاژی، کاربرد وسیعی در صنایع خودرو، دریایی و هوافضا داشته باشد [۳۵ و ۳۶]. از سوی دیگر، اتصال‌دهی این گروه از آلیاژها

2 Al7075-T6  
3 AMSH6088  
4 Quenching  
5 H13  
6 FP4MK milling machine

1 Design Expert

جدول ۲. طراحی آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و نتایج اندازه‌گیری

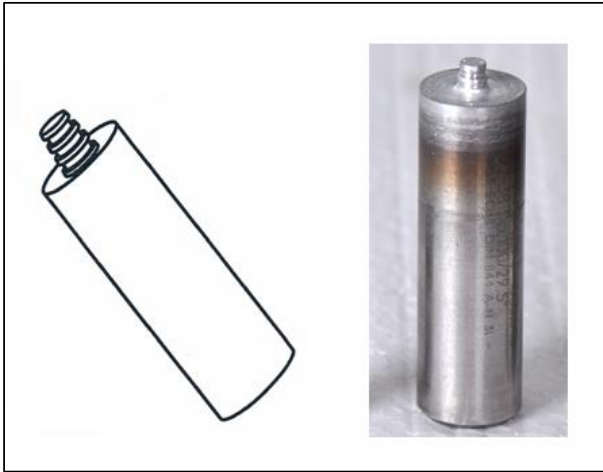
Table 2. Design of FSW tests and measurement results

متغیر خروجی	متغیرهای ورودی				شماره آزمون
	استحکام کششی نهایی (MPa)	زاویه انحراف (A)	قطر شانه (D)	نرخ پیشروی (S)	
۳۵۰	2	0	0	0	۱
۴۳۰	0	0	0	2	۲
۴۳۵	0	0	0	0	۳
۳۹۸	-1	1	-1	1	۴
۴۳۵	0	0	0	0	۵
۴۳۵	0	0	0	0	۶
۴۳۲	0	0	2	0	۷
۴۳۵	0	0	0	0	۸
۳۵۵	1	-1	-1	1	۹
۳۹۰	1	1	-1	1	۱۰
۳۳۱	-1	-1	1	-1	۱۱
۳۰۸	1	-1	-1	-1	۱۲
۳۶۲	-1	-1	1	1	۱۳
۳۱۷	1	1	-1	-1	۱۴
۳۷۰	0	-2	0	0	۱۵
۳۲۰	-1	1	1	-1	۱۶
۳۱۳	1	1	1	-1	۱۷
۳۴۷	-1	-1	-1	1	۱۸
۳۴۵	-1	1	-1	-1	۱۹
۴۳۵	0	0	0	0	۲۰
۴۱۵	-1	1	1	1	۲۱
۳۱۵	0	0	0	-2	۲۲
۴۴۵	0	2	0	0	۲۳
۴۳۵	0	0	0	0	۲۴
۳۱۲	1	-1	1	-1	۲۵
۴۳۰	-2	0	0	0	۲۶
۴۳۵	0	0	0	0	۲۷
۳۷۷	1	1	1	1	۲۸
۳۲۰	-1	-1	-1	-1	۲۹
۳۲۲	1	-1	1	1	۳۰
۳۶۵	0	0	-2	0	۳۱

جدول ۳. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ [۳۹]

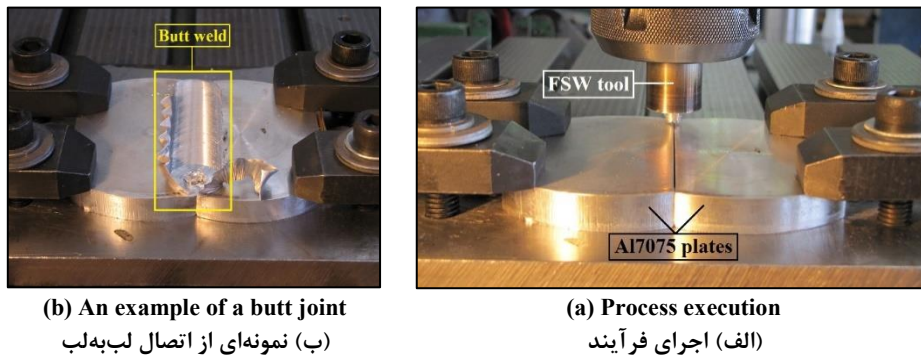
Table 3. Chemical composition of Al7075\_T6 alloy [39]

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



شکل ۱. طراحی و ساخت نمونه‌ای از ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Fig. 1. Design and fabrication a sample of FSW tool



شکل ۲. تنظیمات فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Fig. 2. FSW set-up

۲- الف). شکل (۲-ب)، نمونه‌ای از اتصال لب‌به‌لب تولیدشده را نشان می‌دهد.

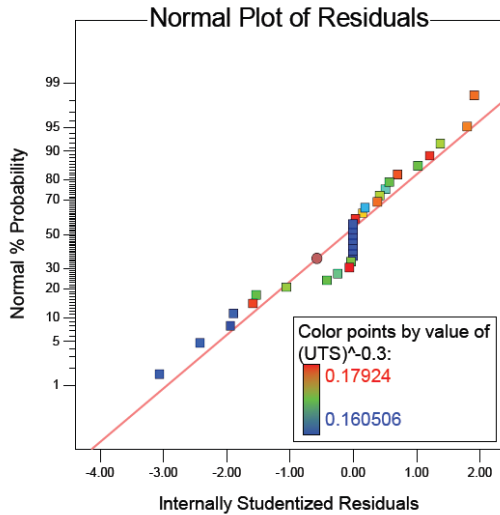
۲-۵- اندازه‌گیری متغیر پاسخ  
برای اندازه‌گیری استحکام کششی نهایی اتصالات از آزمون کشش استفاده می‌شود. بدین‌منظور، نمونه‌های کشش مطابق استاندارد آزمون و مواد<sup>۱</sup> در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، با استفاده از وایرکات<sup>۲</sup> استخراج و آماده شدند. سپس، هر یک از آن‌ها با استفاده از دستگاه کشش اینسترون<sup>۳</sup> و با

نرخ پیشروی ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند. شکل ۳، تعدادی از نمونه اتصالات گسیخته‌شده پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری استحکام کششی نهایی اتصالات حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در جدول ۲ درج شده است.

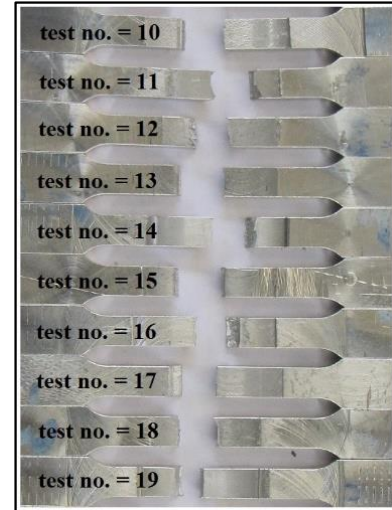
۲-۶- تجزیه و تحلیل نتایج  
تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس<sup>۴</sup> انجام می‌شود. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان متغیر پاسخ و پارامترهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون<sup>۵</sup> به کار

۱ American society for testing and materials (ASTM E8)  
۲ Wire electrical discharge machining  
۳ INSTRON

4 Analysis of variance (ANOVA)  
5 Regression analysis



شکل ۴. نمودار احتمال نرمال  
Fig. 4. Normal probability plot



شکل ۳. تعدادی از نمونه اتصالات گسیخته شده  
Fig. 3. A number of broken joints

برازش، غیرموثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش بینی تغییرات متغیر پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می گیرد.

مانده به صورت تفاضل پاسخ اندازه گیری شده در آزمون تجربی و پاسخ پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون، تعریف می شود. برای آزمون صحت توزیع نرمال مانده ها از نمودار احتمال نرمال استفاده می شود. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، مانده ها عموماً از یک خط راست پیروی می کنند و شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن و عدم تقارن وجود ندارد.

رابطه ۲، معادله رگرسیون استحکام کششی نهایی را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می کند:

$$\begin{aligned} (UTS)^{-0.3} = & 0.16 - 7.563 \times 10^{-3} N - 1.007 : \\ & \times 10^{-3} S - 4.078 \times 10^{-3} D + 3.517 \times 10^{-3} A \\ & + 0.013 N^2 + 8.71 \times 10^{-3} S^2 + \\ & 7.646 \times 10^{-3} D^2 + 9.902 \times 10^{-3} A^2 \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به استخراج معادله رگرسیون، انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نهایی، وجود دارد. همان طور که در این رابطه مشاهده می شود، تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر استحکام کششی نهایی به ترتیب اهمیت عبارتند از: سرعت دورانی ابزار، قطر شانه ابزار، زاویه انحراف

گرفته خواهد شد [۴۰]. میزان سطح ریسک  $(\alpha)$  در فرآیند تحلیل، مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. جدول ۴، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل رگرسیون را برای استحکام کششی نهایی اتصالات تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان می دهند. مؤثر بودن یک عبارت از طریق مقدار  $P$  مربوط به آن عبارت، مشخص می شود. هرچه مقدار  $P$  مربوط به یک عبارت کوچکتر باشد، معنی داری آن عبارت در مدل بیشتر خواهد بود. بنابراین با احتساب میزان سطح ریسک و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول  $N$  (سرعت دورانی ابزار) و عبارت مرتبه دوم  $N^2$  (مجذور سرعت دورانی ابزار) به عنوان مهمترین عبارات مؤثر بر استحکام کششی نهایی اتصالات، شناخته و معرفی شدند.

برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش<sup>۲</sup> استفاده می شود. با تأیید عدم معنی داری آزمون عدم برازش، می توان دریافت که مدل به خوبی می تواند بر داده های مورد بررسی، برازش شود. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای پاسخ، معنی دار نیست و در نتیجه مدل ارائه شده به خوبی روند داده ها را نشان می دهد. از سوی دیگر، بهترین تحلیل زمانی صورت می گیرد که همزمان رگرسیون، موثر و عدم برازش، غیرموثر باشد [۴۰]. از این رو، با توجه به مقادیر  $P$  مندرج در جدول فوق الذکر ملاحظه می شود که عبارت رگرسیون، موثر و عبارت عدم

1 Confidence level  
2 Lack of fit

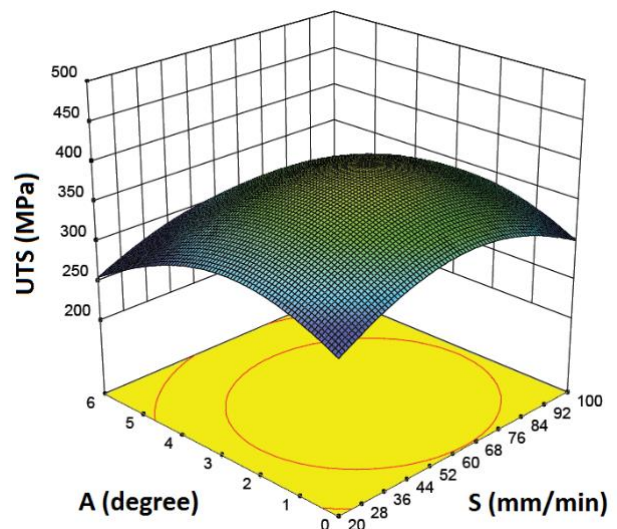
جدول ۴. آنالیز واریانس مدل رگرسیون برای استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Table 4. Analysis of variance of the regression model for the ultimate tensile strength of FSW joints

مقدار $P$	مقدار $F$	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
<۰/۰۰۰۱	۹/۴۶	$۱/۳۳۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰۶۵ \times ۱۰^{-۳}$	۸	مدل رگرسیون
<۰/۰۰۰۱	۲۴/۴۰	$۳/۴۳۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۴۳۲ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$N$ (سرعت دورانی ابزار)
۰/۵۱۷۵	۰/۴۳	$۶/۰۸۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۶/۰۸۷ \times ۱۰^{-۶}$	۱	$S$ (نرخ پیشروی ابزار)
۰/۰۱۴۲	۷/۰۹	$۹/۹۷۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۹/۹۷۷ \times ۱۰^{-۵}$	۱	$D$ (قطر شانه ابزار)
۰/۰۳۱۵	۵/۲۸	$۷/۴۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۷/۴۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	۱	$A$ (زاویه انحراف ابزار)
۰/۰۰۰۲	۲۰/۴۰	$۲/۸۷۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۸۷۰ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$N^2$
۰/۰۰۵۲	۹/۶۴	$۱/۳۵۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳۵۶ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$S^2$
۰/۰۱۲۳	۷/۴۳	$۱/۰۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$D^2$
۰/۰۰۱۹	۱۲/۴۶	$۱/۷۵۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۷۵۲ \times ۱۰^{-۴}$	۱	$A^2$
-	-	$۱/۴۰۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۰۹۴ \times ۱۰^{-۴}$	۲۲	خطای مانده
۰/۳۷۵۲	۰/۵۴	$۱/۹۳۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۰۹۴ \times ۱۰^{-۴}$	۱۶	عدم برازش
-	-	۰	۰	۶	خطای خالص
-	-	-	$۱/۳۷۴ \times ۱۰^{-۳}$	۳۰	مجموع

ابزار و نرخ پیشروی ابزار.

از سوی دیگر، چگونگی تغییرات متغیر پاسخ بر حسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه‌بعدی منحنی رویه پاسخ<sup>۱</sup> نشان داد. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، تنظیم مقادیر پارامترهای نرخ پیشروی و زاویه انحراف ابزار نزدیک به سطح میانه منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نهایی اتصال می‌شود. همچنین به ازای تنظیم زاویه انحراف ابزار در یک مقدار معین، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب کاهش استحکام کششی نهایی می‌شود که این موضوع ناشی از افزایش حرارت ورودی به درز اتصال است. از سوی دیگر، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب گرمایش ناکافی و اغتشاش نامطلوب جنس ماده می‌شود که منجر به کاهش استحکام کششی نهایی اتصال و بروز عیوب میکروساختاری خواهد شد.



شکل ۵. تأثیر متغیرهای ورودی  $S$  و  $A$  بر استحکام کششی نهایی اتصالات حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Fig. 5. Influence of input variables ( $S$  and  $A$ ) on the ultimate tensile strength of FSW joints

1 Surface plot



جدول ۵. مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Table 5. Optimal values of FSW input variable

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
	استحکام کششی نهایی	MPa	۴۴۵/۰۰۱

جدول ۶. نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحه‌گذاری

Table 6. Results of optimization and verification test

متغیر پاسخ	بهینه‌سازی	آزمون صحه‌گذاری	درصد اختلاف
استحکام کششی نهایی (MPa)	۴۴۵/۰۰۱	۴۲۰	٪ ۵/۶۲

۷-۲- بهینه‌سازی و صحه‌گذاری

در این پژوهش، روش مطلوبیت<sup>۱</sup> به عنوان روش بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰]. هدف تابع مطلوبیت، بیشینه‌سازی متغیر پاسخ (استحکام کششی نهایی) است. بنابراین، مطلوبیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left( \frac{y-L}{U-L} \right)^r & L \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (3)$$

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>۲</sup> دارد که برای بیان درجه اهمیت مقادیر هدف<sup>۳</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 مقدار بیشینه از استحکام کششی نهایی نشان می‌دهد.

بنابراین، با توجه به مقدار بالای تابع مطلوبیت، می‌توان دریافت که روند بهینه‌سازی 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 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 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

۳-۱- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات

با توجه به اینکه سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار به عنوان مهمترین عبارات خطی موثر بر استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شناخته شدند (جدول ۴) و با عنایت به اینکه مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استخراج گردید (جدول ۵)، دو متغیر: سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب انتخاب شدند و

1 Desirability method  
2 Weight field  
3 Target value

جدول ۷. عوامل آزمایش و دامنه تغییرات آن‌ها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب  
**Table 7. Experimental factors and the extent of their changes in the SFSW process**

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

جدول ۸. طراحی آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب و نتایج اندازه‌گیری

**Table 8. Design of SFSW tests and measurement results**

شماره آزمون	متغیرهای ورودی		متغیر خروجی
	سرعت دورانی ( $N$ )	قطر شانه ( $D$ )	استحکام کششی نهایی (MPa)
۱	۱۰۰۰	۱۵	۴۰۹
۲	۱۰۰۰	۱۸	۳۹۲
۳	۸۰۰	۱۵	۴۶۱
۴	۸۰۰	۲۱	۴۷۲
۵	۸۰۰	۱۸	۳۹۸
۶	۱۰۰۰	۲۱	۴۰۴
۷	۱۰۰۰	۱۸	۳۹۲
۸	۱۲۰۰	۲۱	۴۶۹
۹	۱۲۰۰	۱۵	۴۸۰
۱۰	۱۲۰۰	۱۸	۴۲۸

را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مجموعه فیکسچر و قطعات در داخل مخزنی حاوی آب قرار گرفته است. سپس، آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب منطبق بر اصول تشریح‌شده در بخش مقدمه و مطابق ۱۰ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۸ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال انجام شدند. شکل (۶-ب)، نمونه‌ای از اتصال لب‌به‌لب تولید شده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب را نشان می‌دهد.

#### ۳-۴- اندازه‌گیری متغیر پاسخ

برای اندازه‌گیری متغیر پاسخ، به صورت مشابه با فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از آزمون کشش استفاده می‌شود. نتایج اندازه‌گیری استحکام کششی نهایی اتصالات حاصل از فرآیند

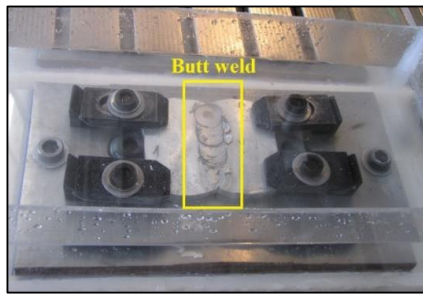
هر یک از آن‌ها در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۷). همچنین مقادیر نرخ پیشروی ابزار و زاویه انحراف ابزار در مقدار بهینه به‌دست‌آمده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تنظیم و تثبیت شدند.

#### ۳-۲- طراحی آزمایش

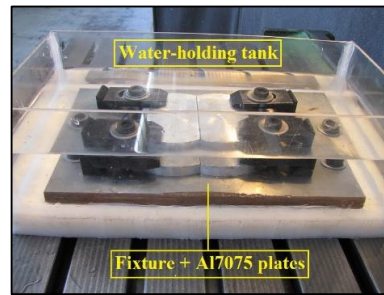
جدول ۸، طراحی اجرای آزمون‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب را با مقادیر واقعی و با تعداد ۱۰ اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد دو آزمون در سطوح مرکزی پارامترها، تکرار خواهد شد.

#### ۳-۳- اجرای فرآیند

شکل (۶-الف)، قرارگیری قطعات به صورت لب‌به‌لب در فیکسچر



(b) An example of a butt joint  
(ب) نمونه‌ای از اتصال لب‌به‌لب



(a) Placement of fixture and parts in the water-holding tank  
(الف) قرارگیری مجموعه فیکسچر و قطعات در مخزن حاوی آب

شکل ۶. تنظیمات فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

Fig. 6. SFSW set-up

جدول ۹. آنالیز واریانس مدل رگرسیون برای استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

Table 9. Analysis of variance of the regression model for the ultimate tensile strength of SFSW joints

مقدار $P$	مقدار $F$	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۰/۰۲۸۹	۸/۶۲	$۱/۶۱۲ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۸/۰۵۹ \times ۱۰^{-۱۷}$	۵	مدل رگرسیون
۰/۲۸۹۳	۱/۴۹	$۲/۷۸۶ \times ۱۰^{-۱۸}$	$۲/۷۸۶ \times ۱۰^{-۱۸}$	۱	$N$ (سرعت دورانی ابزار)
۰/۸۸۷۸	۰/۰۲۳	$۴/۲۲۶ \times ۱۰^{-۲۰}$	$۴/۲۲۶ \times ۱۰^{-۲۰}$	۱	$D$ (قطر شانه ابزار)
۰/۶۴۷۹	۰/۲۴	$۴/۵۴۵ \times ۱۰^{-۱۹}$	$۴/۵۴۵ \times ۱۰^{-۱۹}$	۱	$N.D$
۰/۰۱۱۱	۱۹/۹۵	$۳/۷۳۱ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۳/۷۳۱ \times ۱۰^{-۱۷}$	۱	$N^2$
۰/۰۱۸۹	۱۴/۵۶	$۲/۷۲۳ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۲/۷۲۳ \times ۱۰^{-۱۷}$	۱	$D^2$
-	-	$۱/۸۷۰ \times ۱۰^{-۱۸}$	$۷/۴۸۱ \times ۱۰^{-۱۸}$	۴	خطای مانده
۰/۷۹۳۸	۰/۳۳	$۲/۴۹۴ \times ۱۰^{-۱۸}$	$۷/۴۸۱ \times ۱۰^{-۱۸}$	۳	عدم برازش
-	-	.	.	۱	خطای خالص
-	-	-	$۸/۸۰۷ \times ۱۰^{-۱۷}$	۹	مجموع

استحکام کششی نهایی فلز جوش حاصل از اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، کمتر از استحکام کششی نهایی فلز پایه باشد. با مروری بر مقادیر استحکام کششی نهایی مندرج در جدول ۲ (آزمون جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی) می‌توان دریافت که بیشینه استحکام کششی نهایی اندازه‌گیری شده مساوی ۴۴۵ مگاپاسکال است (ردیف ۲۳ آزمون جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی). 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

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب در جدول ۸ درج شده است.

لازم به ذکر است که استحکام کششی نهایی فلز پایه مساوی ۴۸۵ مگاپاسکال است. از سوی دیگر، پدیده نرم‌شدگی عموماً در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم رخ می‌دهد. وقوع این پدیده ناشی از عدم انحلال و یا درشت‌شدگی رسوبات تقویت‌کننده است که منجر به افت خواص مکانیکی اتصالات جوشی می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود مقادیر

جدول ۱۰. مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

Table 10. Optimal values of SFSW input variables

نوع متغیر	نام متغیر	واحد	مقدار بهینه
ورودی	سرعت دورانی ابزار	rpm	۱۲۰۰
	قطر شانه ابزار	mm	۱۵
پاسخ	استحکام کششی نهایی	MPa	۴۸۱/۸۷۵

استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نشان می‌دهد. با احتساب میزان سطح ریسک و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، عبارت مرتبه دوم  $N^2$  (مجذور سرعت دورانی ابزار) به عنوان مهمترین عبارت موثر بر استحکام کششی نهایی اتصالات در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، شناخته و معرفی شد.

همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای پاسخ، معنی‌دار نیست و در نتیجه مدل ارائه‌شده به خوبی روند داده‌ها را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، ملاحظه می‌شود که عبارت رگرسیون، موثر و عبارت عدم برازش، غیرموثر است. از این‌رو، توانایی مدل برازش‌یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات متغیر پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می‌گیرد.

رابطه ۴، معادله رگرسیون استحکام کششی نهایی را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری‌شده، ارائه می‌کند:

$$(UTS)^{-3} = 1.745 \times 10^{-8} - 6.814 \times 10^{-10} N \quad (11)$$

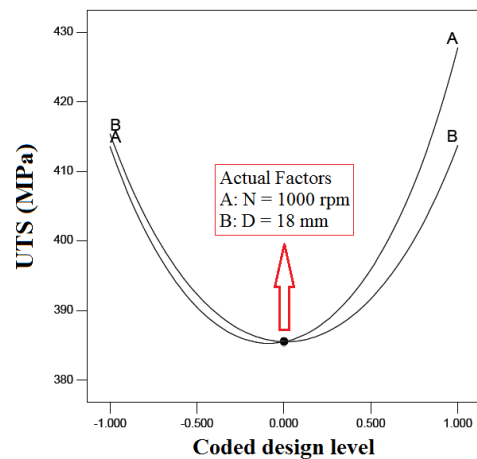
$$+ 8.393 \times 10^{-11} D + 3.371 \times 10^{-10} ND \quad (4)$$

$$- 3.999 \times 10^{-9} N^2 - 3.416 \times 10^{-9} D^2$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر استحکام کششی نهایی به ترتیب اهمیت عبارتند از: سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار. همچنین، تأثیر سهموی متغیرهای ورودی فرآیند به ترتیب اهمیت عبارتند از: سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش و یا کاهش مقادیر پارامترهای سرعت دورانی و قطر شانه ابزار نسبت به سطح میانه (۱۰۰۰ دور بر دقیقه و ۱۸ میلی‌متر)، استحکام کششی نهایی اتصال نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که کاهش بیش از حد سرعت دورانی منجر به کاهش تأثیر اغتشاشی ابزار می‌شود که کاهش استحکام کششی را به همراه خواهد داشت. همچنین، افزایش بیش از حد در مقادیر سرعت دورانی و یا قطر شانه ابزار منجر به افزایش حرارت ورودی به اتصال و کاهش استحکام آن می‌شود.

### ۳-۶- بهینه‌سازی و صحه‌گذاری

جدول ۱۰، ترکیب بهینه منتخب از مقادیر متغیرهای ورودی



شکل ۷. تأثیر متغیرهای ورودی  $N$  و  $D$  بر استحکام کششی نهایی اتصالات حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

Fig. 7. Influence of input variables ( $N$  and  $D$ ) on the ultimate tensile strength of SFSW joints

کششی نهایی فلز جوش حاصل از اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب مندرج در جدول ۸، می‌توان دریافت که بیشینه استحکام کششی نهایی اندازه‌گیری‌شده مساوی ۴۸۰ مگاپاسکال است (ردیف ۹ آزمون جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب). بنابراین، اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با بهره‌گیری از تأثیر افزایش نرخ خنک‌کاری توانسته است، بیشینه مقدار استحکام کششی نهایی فلز جوش را به صورت قابل‌ملاحظه‌ای به مقدار استحکام کششی نهایی فلز پایه (۴۸۵ مگاپاسکال) نزدیک نماید و منتج به ارتقاء خواص کششی اتصال جوشی حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شود.

### ۳-۵- تجزیه و تحلیل نتایج

جدول ۹، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل رگرسیون را برای

جدول ۱۱. نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت‌گذاری  
Table 11. Results of optimization and verification test

متغیر پاسخ	بهینه‌سازی	آزمون صحت‌گذاری	درصد اختلاف
استحکام کششی نهایی (MPa)	۴۸۱/۸۷۵	۴۸۰	٪۰/۳۹

- معادلات رگرسیون حاصل از آنالیز واریانس برای پیش‌بینی مقادیر استحکام کششی نهایی اتصالات تولیدشده در فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب به عنوان تابعی از اثرات خطی، تعاملی و سهموی متغیرهای ورودی فرآیند، استخراج گردید. از این‌رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم پارامتر پاسخ، وجود دارد.

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

- معادله رگرسیون استحکام کششی نهایی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب نشان داد که تأثیر خطی متغیرهای ورودی فرآیند بر پارامتر پاسخ به ترتیب اهمیت عبارتند از: سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار.

- بررسی نمودار منحنی رویه پاسخ نشان داد که تنظیم مقادیر پارامترهای نرخ پیشروی و زاویه انحراف ابزار نزدیک به سطح میانه منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نهایی اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌شود.

- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب جهت دستیابی به ماکزیمم مقدار استحکام کششی نهایی، استخراج گردید. مقادیر تابع مطلوبیت به ترتیب برای فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب برابر با ۰/۹۷۶ و ۱ به دست آمد. از این‌رو، مقادیر بالای تابع مطلوبیت، نشان می‌دهد که روند بهینه‌سازی به طور موفقیت‌آمیزی، هدف از پیش‌تعیین‌شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.

- اختلاف اندک میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت‌گذاری (کمتر از ۶ درصد برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی

فرآیند را با بالاترین مقدار تابع مطلوبیت (عدد ۱) جهت دستیابی به مقدار بیشینه از استحکام کششی نهایی نشان می‌دهد.

برای صحت‌گذاری ترکیب پارامتری بهینه، آزمون تجربی توسط ابزاری به قطر شانه ۱۵ میلی‌متر و با سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و تنظیم نرخ پیشروی و زاویه انحراف ابزار به ترتیب در مقادیر نزدیک به مقادیر بهینه حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، 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 ۱۱).

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل آماری و بهینه‌سازی استحکام کششی اتصال لب‌به‌لب آلیاژ آلومینیوم گرید ۷۰۷۵ تولیدشده در فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با استفاده از روش رویه پاسخ و تابع مطلوبیت، به انجام رسید. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که پارامتر مرتبه اول  $N$  (سرعت دورانی ابزار) و عبارت مرتبه دوم  $N^2$  (مجذور سرعت دورانی ابزار) به عنوان مهمترین عبارات موثر بر استحکام کششی نهایی اتصالات در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، هستند.

- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، عبارت مرتبه دوم  $N^2$  (مجذور سرعت دورانی ابزار) به عنوان مهمترین عبارت موثر بر استحکام کششی نهایی اتصالات در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، معرفی شد.

- صلاحیت و کفایت مدل‌های رگرسیون استحکام کششی نهایی در هر دو فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب توسط آزمون عدم برازش و نمودار احتمال نرمال مورد بررسی قرار گرفت و توانایی مدل‌های برازش‌یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات پارامتر پاسخ، مورد تأیید قرار گرفت.

- [8] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, *Materials and Design*, 18 (1997) 273-269.
- [9] A.N. Siddiquee, S. Pandey, Experimental investigation on deformation and wear of WC tool during friction stir welding (FSW) of stainless steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (2014) 486-479.
- [10] R.A. Gite, P.K. Loharkar, R. Shimpi, Friction stir welding parameters and application: A review, *Materials Today: Proceedings*, 19 (2) (2019) 365-361.
- [11] J.H. Cho, S.H. Han, C.G. Lee, Cooling effect on microstructure and mechanical properties during friction stir welding of Al-Mg-Si aluminum alloys, *Materials Letters*, 180 (2016) 161-157.
- [12] L. Fratini, G. Buffa, R. Shivpuri, In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43 (2009) 664.
- [13] D. Sakurada, K. Katoh, H. Tokisue, Underwater friction welding of 6061 aluminum alloy, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 52 (1) (2002) 6-2.
- [14] H.A. Derazkola, F. Khodabakhshi, Underwater submerged dissimilar friction-stir welding of AA5083 aluminum alloy and A441 AISI steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (2019) 4395-4383.
- [15] R. Rouzbehani, A.H. Kokabi, H. Sabet, M. Paidar, O.O. Ojo, Metallurgical and mechanical properties of underwater friction stir welds of Al7075 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 262 (2018) 256-239.
- [16] M.A. Mofid, A. Abdollah-Zadeh, F.M. Ghaini, C.H. Gur, Submerged friction-stir welding (SFSW) underwater and under liquid nitrogen: An improved method to join Al alloys to Mg alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43 (2012) 5114-5106.
- [17] S.S. Sabari, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, G.M. Reddy, Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy, *Defence Technology*, 12 (2016) 333-324.

اغتشاشی و کمتر از ۱ درصد برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، صحت و دقت روند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند را تأیید نمود.

• اجرای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با بهره‌گیری از تأثیر افزایش نرخ خنک‌کاری توانست، بیشینه مقدار استحکام کششی نهایی فلز جوش را به صورت قابل‌ملاحظه‌ای به مقدار استحکام کششی نهایی فلز پایه نزدیک نماید و منتج به ارتقاء خواص کششی اتصال جوشی حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شود.

### مراجع

- [1] R. Tamasgavabari, A.R. Ebrahimi, S.M. Abbasi, A.R. Yazdipour, Effect of harmonic vibration during gas metal arc welding of AA-5083 aluminum alloy on the formation and distribution of intermetallic compounds, *Journal of Manufacturing Processes*, 49 (2020) 422-413.
- [2] B. Qin, F.C. Yin, C.Z. Zeng, J.C. Xie, J. Shen, Microstructure and mechanical properties of TIG/A-TIG welded AZ61/ZK60 magnesium alloy joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29 (9) (2019) 1872-1864.
- [3] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P.T. Smith, C.J. Dawes, Friction stir butt welding, *Int. Patent No. PCT/GB02203/92* (1991).
- [4] M. Guerra, C. Schmidt, L.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, *Materials Characterization*, 49 (2003) 101-95.
- [5] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta Materialia*, 36 (1) (1997) 75-69.
- [6] J. Zhao, F. Jiang, H.G. Jian, K. Wen, L. Jiang, X.B. Chen, Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al-Mg-Sc alloy plates, *Materials and Design*, 31 (2010) 311-306.
- [7] R.J. Steel, S.M. Packer, R.D. Fleck, S. Sanderson, C. Tucker, *Advances in FSW and new applications*, Editor: Fujii H, *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, Woodhead Publishing, (2013) 127-125.

- [28] S.S. Sabari, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, Influences of tool traverse speed on tensile properties of air cooled and water cooled friction stir welded AA2519-T87 aluminium alloy joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 237 (2016) 300-286.
- [29] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, ISBN 8-91601 118-1-978 (2016).
- [30] M. Vahdati, M. Moradi, 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, *Iranian Journal of Materials Forming*, 7 (1) (2020) 45-32.
- [31] M. Vahdati, M. Moradi, M. Shamsborhan, 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, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, doi: 10.1007/s-020-12666 8-02075 (2020).
- [32] Design Expert software, version 11, <http://www.statease.com>.
- [33] A. Esmaili, M.H. Shaeri, M. Talafi Noghani, A. Razaghian, Fatigue behavior of AA7075 aluminium alloy severely deformed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, 757 (2018) 332-324.
- [34] J.F. Li, Z.W. Peng, C.X. Li, Z.Q. Jia, W.J. Chen, Z.Q. Zheng, Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18 (4) (2008) 762-755.
- [35] A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, W.S. Miller, Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, *Materials Science and Engineering: A*, 280 (1) (2000) 107-102.
- [36] J.C. Williams, E.A. Starke, Progress in structural materials for aerospace systems, *Acta Materialia*, 51 (19) (2003) 5799-5775.
- [37] N. Mendes, P. Neto, A. Loureiro, A.P. Moreira, Machines and control systems for friction stir welding: A review, [18] H.J. Zhang, H.J. Liu, L. Yu, Microstructure and mechanical properties as a function of rotation speed in underwater friction stir welded aluminum alloy joints, *Materials and Design*, 32 (2011) 4407-4402.
- [19] T.W. Nelson, R.J. Steel, W.J. Arbegast, In situ thermal studies and post-weld mechanical properties of friction stir welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, 8 (4) (2003) 288-283.
- [20] W.F. Xua, J.H. Liu, D.L. Chen, G.H. Luan, J.S. Yao, Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding, *Materials Science and Engineering A*, 548 (2012) 98-89.
- [21] H.J. Liu, H.J. Zhang, Y.X. Huang, Y. Lei, Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20 (2010) 1391-1387.
- [22] Q. Wang, Z. Zhao, Y. Zhao, K. Yan, H. Zhang, The adjustment strategy of welding parameters for spray formed 7055 aluminum alloy underwater friction stir welding joint, *Materials and Design*, 88 (2015) 1376-1366.
- [23] H.J. Liu, H.J. Zhang, L. Yu, Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, *Materials and Design*, 32 (3) (2011) 1553-1548.
- [24] H. Zhang, H. Liu, Mathematical model and optimization for underwater friction stir welding of a heat-treatable aluminum alloy, *Materials and Design*, 45 (2013) 211-206.
- [25] H.J. Zhang, H.J. Liu, L. Yu, Effect of water cooling on the performances of friction stir welding heat-affected zone, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21 (7) (2012) 1187-1182.
- [26] Q. Wang, Y. Zhao, K. Yan, S. Lu, Corrosion behaviour of spray formed 7055 aluminum alloy joint welded by underwater friction stir welding, *Materials and Design*, 68 (2015) 103-97.
- [27] E.E. Kishta, B. Darras, Experimental investigation of underwater friction-stir welding of 5083 marine-grade aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (3) (2014) 465-458.

[39] <http://www.matweb.com>

Materials & Design, 90 (2016) 265-256.

[40] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, ISBN 8-11347-119-1-978 (2017).

[38] AMSH6088: Heat Treatment of Aluminum Alloys, SAE International, <https://www.sae.org>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Vahdati, M. Moradi, Statistical analysis and optimization of tensile strength of Al7075 butt joint produced by friction stir welding and submerged friction stir welding via response surface methodology and desirability approach, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2719-2734.*

DOI: [10.22060/mej.2020.18104.6735](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18104.6735)

