



## مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف پذیری کامپوزیت زمینه آلومینیومی حاصل از فرآیند FSA با استفاده از روش RSM

مهدی وحدتی\*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود،  
\* شاهرود، صندوق پستی ۹۵۱۶۱-۳۶۱۹۹، vahdati@shahroodut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از روش های جدید برای بهبود خواص مکانیکی لایه های سطحی، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) است. در صورتی که فرآیند FSP به همراه یک ماده مصرفی انجام شود، این فرآیند جدید تحت عنوان آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی (FSA) شناخته می شود. از این رو در پژوهش پیش رو، کامپوزیت های سطحی Al7075 با به کارگیری ذرات تقویت کننده از جنس آلومینا، با استفاده از این فرآیند و منطبق بر اصول طراحی آزمایش، تولید شدند. بدین منظور، روش RSM به عنوان روش طراحی آزمایش، انتخاب گردید و متغیرهای: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند، تعیین شدند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون داده های حاصل از آزمون های تجربی، صحت و دقت معادلات رگرسیون را مورد تأیید قرار داد و نشان داد که نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت کننده با تأثیرات خطی و مرتبه دوم، بر استحکام کششی و انعطاف پذیری نمونه های کامپوزیتی موثر هستند. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار 800 rpm تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش 17.97 درصدی استحکام کششی نمونه های کامپوزیتی می شود. علاوه بر این، کاهش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 20 mm/min و کاهش اندازه ذرات آلومینا از 50 μm به 20 μm، به ترتیب موجب افزایش انعطاف پذیری نمونه های کامپوزیتی به میزان 1.85 % و 5.04 % می شود. در پایان، با دستیابی به مقدار بیشینه تابع مطلوبیت (0.915)، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند تعیین شد و با اجرای آزمون صحت گذاری، به تأیید رسید.

دریافت: .....  
پذیرش: .....  
**کلیدواژه ها:**  
بهینه سازی، کامپوزیت سطحی،  
استحکام کششی،  
انعطاف پذیری،  
آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی

## Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM

Mahdi Vahdati\*

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
\* P.O.B. ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱, Shahrood, Iran, vahdati@shahroodut.ac.ir

### Keywords

Optimization,  
Surface composite,  
Tensile strength,  
Ductility,  
Friction stir alloying

### Abstract

One of the new methods to improve the mechanical properties of surface layers is the friction stir processing (FSP). If the FSP process is carried out with a consumable material, this new process is known as the friction stir alloying (FSA). Therefore in this research, the Al7075 surface composites by using reinforcing particles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were produced based on this process in accordance with the DOE approach. So, the RSM was selected as the experiment design method and variable factors such as: tool rotational speed, tool feed rate, tool shoulder diameter and size of reinforcing particles were determined as the input variables. The results of ANOVA and regression analysis of experimental data approved the accuracy of regression equations and showed that the tool feed rate, tool shoulder diameter and size of reinforcing particles with linear and second-order effects, affect on the tensile strength and ductility of the composite specimens. Also, if the tool rotational speed is set at 800 rpm, increasing the tool shoulder diameter from 9 mm to 15 mm will increase the tensile strength of the composite specimens by 17.97%. In addition, lowering the tool feed rate from 60 mm/min to 20 mm/min and reducing the size of alumina particles from 50 μm to 20 μm, will increase the ductility of composite specimens by 1.85% and 5.04%, respectively. Finally, by achieving maximum value of desirability function (0.915), the optimal condition of input variables was determined. In addition, the optimal condition has been confirmed by implementing the verification test.

### 1- مقدمه

استفاده شد [۳]. در ادامه، این فرآیند برای تولید کامپوزیت سطحی، اصلاح میکروساختار آلیاژهای ریختگی، آلیاژسازی و بهبود کیفیت اتصالات جوشی مورد استفاده قرار گرفت [۴ و ۵]. فرآیند FSP از اصولی مشابه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۲</sup> پیروی می کند [۶]. در این فرآیند، اعمال کرنش برشی

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> به عنوان یک تکنیک جدید برای بهبود و تقویت خواص مکانیکی لایه های سطحی قطعات، معرفی شده است [۱ و ۲]. فرآیند FSP در ابتدا برای اصلاح میکروساختار لایه های سطحی قطعات فلزی

<sup>2</sup> Friction stir welding (FSW)

<sup>1</sup> Friction stir processing (FSP)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Vahdati, M., "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. \*, No. \*, pp. \*\*\*\*, 20\*\*.

موجب بهبود مقاومت سایشی و فرسایشی آلیاژ آلومینیوم می‌شود [۱۹]. از این‌رو، برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم می‌توان از فرآیند FSA بهره گرفت [۲۰].

بدین منظور، میشرها و همکاران [۲۱]، کامپوزیت‌های سطحی  $Al_{15083}/SiC$  را با کسرهای حجمی متفاوتی از ذرات  $SiC$  به صورت موفقیت آمیزی تولید کردند. ذرات  $SiC$  به صورت یکنواخت در زمینه آلومینیومی توزیع شدند. نتایج نشان داد که سختی کامپوزیت سطحی با استفاده از ۲۷ درصد حجمی از ذرات  $SiC$  با اندازه ۰.۷ میکرون، تقریباً دو برابر سختی فلز پایه است. گروه دیگری از محققان، تأثیر هندسه و ابعاد پین را بر روی تشکیل کامپوزیت سطحی  $Al_{11050-H24}$  با استفاده از ذرات  $SiC$  مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. در این پژوهش، ذرات  $SiC$  با استفاده از ایجاد شیار و قرارگیری صفحه پوششی از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر، در فلز پایه جایگذاری شدند. نتایج نشان داد که پین ابزار با هندسه مربعی بدون در نظر گرفتن تأثیر سرعت دورانی ابزار، موجب توزیع همگن‌تری از ذرات  $SiC$  در منطقه اغتشاشی می‌شود. همچنین، ابعاد پین تأثیر اندکی بر توزیع همگن ذرات  $SiC$  در منطقه اغتشاشی داشت.

شفیعی و همکاران [۲۳] کامپوزیت سطحی زمینه فلزی  $Al_{6082}$  را با استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم تولید کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش تعداد پاس‌های فرآیند موجب توزیع یکنواخت‌تری از نانو ذرات آلومینا می‌شود. همچنین میکروسختی و مقاومت سایشی کامپوزیت سطحی در مقایسه با فلز پایه، به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. در مطالعه دیگری، آلیاژ  $Al_{2024}$  پوشش‌دهی شده توسط پودر آلومینا، تحت فرآیند FSA قرار گرفت [۲۴]. نتایج نشان داد که ذرات آلومینا به صورت یکنواخت و با متوسط عمق نفوذ ۶۰۰ میکرون در سطح فلز پایه توزیع شده‌اند. همچنین، میکروسختی و مقاومت سایشی نانو کامپوزیت سطحی ارتقاء یافت. گروهی از محققان، لایه-های کامپوزیت سطحی  $Al_{6360}/(TiC+B_4C)$  را به صورت ترکیبی و با نسبت‌های حجمی متفاوتی از ذرات  $TiC$  و  $B_4C$  تولید کردند [۲۵]. نتایج نشان داد که افزودن ذرات فوق الذکر با نسبت  $50\% TiC + 50\% B_4C$  موجب افزایش مقاومت سایشی  $Al_{6360}$  می‌شود. سلیمانی و همکاران [۲۶]، کامپوزیت سطحی  $Al_{5083}$  را با ترکیبی از ذرات  $SiC$  و  $MoS_2$  تولید کردند. تحلیل میکروساختار کامپوزیت ترکیبی نشان داد که توزیع یکنواختی از ذرات تقویت‌کننده در منطقه فرآوری حاصل شده است و اتصال محکمی میان لایه کامپوزیتی و فلز پایه ایجاد شده است.

احمدی فرد و همکاران [۲۷] کامپوزیت سطحی زمینه فلزی  $Al_{5083}/SiC$  را با استفاده از فرآیند FSA تولید کردند. آن‌ها دریافتند که میکروسختی و استحکام کششی نمونه کامپوزیتی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. آن‌ها در پژوهش دیگری، نانو کامپوزیت زمینه مسی را با استفاده از ذرات تقویت‌کننده  $SiO_2$  تولید کردند [۲۸]. نتایج نشان داد که رفتار سایشی، میکروسختی و استحکام کششی نانو کامپوزیت سطحی نسبت به فلز پایه ارتقاء یافته است.

میکروساختار ناحیه اصلاح شده در فرآیند FSA متناسب با سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار نیز دچار تغییر می‌شود. کورت و همکاران [۲۹] نشان دادند که افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار منتج به توزیع یکنواختی از ذرات  $SiC$  در کامپوزیت سطحی  $AA_{1050}$  می‌شود. از سوی دیگر، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش حرارت ورودی می‌گردد که منجر به شکستن دندریت‌های درشت و بسته شدن خلل و فرج خواهد شد. همچنین، افزایش سرعت دورانی ابزار نیز موجب افزایش حرارت ورودی و

بالا به جنس قطعه کار، موجب می‌شود تا میکروساختار فوق ریز دانه در دمایی زیر نقطه ذوب ماده، ایجاد شود. اصول فرآیند FSP در شکل ۱ نشان داده شده است.

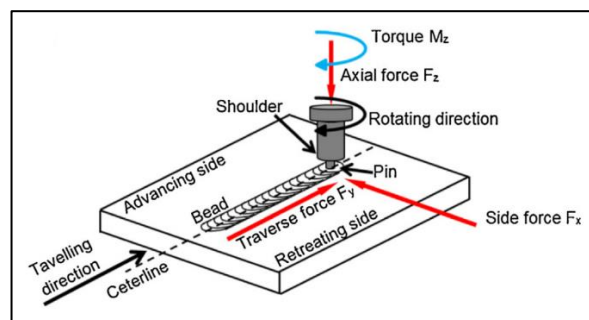


Fig. 1 Principles of FSP process [4]

شکل ۱ اصول فرآیند FSP [۴]

در این فرآیند، پین ابزار با سرعت دورانی بالا در قطعه کار نفوذ می‌کند. مرحله نفوذ تا زمانی که شانه ابزار در تماس با سطح قطعه کار قرار گیرد، ادامه می‌یابد. سپس، ابزار در یک جهت معین حرکت می‌کند. حرکت چرخشی پین موجب انتقال ماده از جلوی ابزار به پشت ابزار می‌گردد. در طی این پیمایش، حرارت ناشی از اصطکاک میان سطوح ابزار و قطعه کار موجب افزایش موضعی دما و تغییر شکل پلاستیک ماده می‌شود.

فرآیند FSP می‌تواند به همراه یک ماده مصرفی نیز انجام شود. این فرآیند جدید تحت عنوان آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> شناخته می‌شود [۷]. با استفاده از این فرآیند، خواص سطحی فلز پایه همچون سایش، مقاومت خوردگی، سختی، استحکام، انعطاف‌پذیری، عمر خستگی و قابلیت شکل‌پذیری، بهبود می‌یابد. روش‌های متداول برای جایگذاری پودر تقویت‌کننده در فرآیند FSA عبارتند از: ایجاد شیار [۸]، سوراخ کاری [۹] و استفاده از صفحه پوششی [۱۰] (شکل ۲).

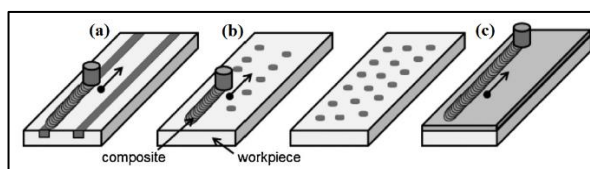


Fig. 2 Methods for placing the reinforcing powder (a) creating a groove (b) drilling (c) using a cover plate

شکل ۲ روش‌های جایگذاری پودر تقویت‌کننده [۴] (a) ایجاد شیار (b) سوراخ کاری (c) استفاده از صفحه پوششی

فرآیند FSA اساساً برای تولید کامپوزیت‌های سطحی در آلیاژهای آلومینیوم [۱۱ و ۱۲] و منیزیم [۱۳ و ۱۴] استفاده می‌شود. با این وجود، کامپوزیت‌های سطحی از مواد با نقطه ذوب بالا همچون مس [۱۵]، فولاد [۱۶] و تیتانیوم [۱۷] نیز با استفاده از این فرآیند، تولید شده‌اند. در این راستا، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی<sup>۲</sup>، گروه جدیدی از مواد هستند که در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم از خواص مطلوبی همچون: مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی، سختی و سختی بالاتر برخوردار هستند [۱۸]. در این گروه از کامپوزیت‌ها، افزودن مواد پرکننده به ویژه ذرات تقویت‌کننده سرامیکی

<sup>1</sup> Friction stir alloying (FSA)

<sup>2</sup> Aluminum metal matrix composite (AMMC)

گرفتند. دامنه تغییر هر یک از این عوامل بر اساس آزمون‌های اولیه که منتج به تولید سالم نمونه کامپوزیتی شد، تعیین گردید (جدول ۱).

جدول ۱ عوامل آزمایش و دامنه تغییر آن‌ها

**Table 1** Experimental factors and their range of variation

متغیر	نماد	واحد	-۱	۰	+۱
سرعت دورانی ابزار	N	rpm	۴۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰
نرخ پیشروی ابزار	S	mm/min	۲۰	۶۰	۱۰۰
قطر شانه ابزار	D	mm	۹	۱۵	۲۱
اندازه ذرات تقویت‌کننده	P	μm	۲۰	۵۰	۸۰

همچنین، به منظور ارزیابی استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌های کامپوزیتی به ترتیب از دو شاخص مهم استحکام کششی نهایی<sup>۵</sup> و درصد ازدیاد طول<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های تولیدی به عنوان متغیرهای پاسخ، انتخاب شدند.

### 3- انتخاب طرح آزمایش

در پژوهش پیش رو، متدولوژی سطح پاسخ به عنوان روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳-۳۵]. در اکثر مسائل مربوط به متدولوژی سطح 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 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 مشاهده شده در پاسخ است.

نرم افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، دیزاین اکسپرت<sup>۷</sup> [۳۶] است. جدول ۲، طراحی آزمایش را به صورت آزمون‌های کدگذاری شده و با تعداد ۳۱ اجرا، نشان می‌دهد که از این میان، تعداد هفت آزمون در سطوح مرکزی پارامترها (سطح صفر)، تکرار خواهد شد. به منظور آماده‌سازی آلیاژ AI7075، صفحات آلیاژی مطابق استاندارد AMSH6088 [۳۸] تحت عملیات حرارتی پیرسختی قرار گرفتند. بدین منظور در ابتدا عملیات انحلال به مدت یک ساعت و در دمای 480°C بر روی قطعات انجام شد. سپس، صفحات آلیاژی برای دستیابی به محلول جامد فوق اشباع تحت عملیات آب‌دهی<sup>۸</sup> قرار گرفتند. در ادامه، عملیات پیرسازی مصنوعی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای 120°C بر روی قطعات انجام شد. در پایان، صفحات آلیاژی در معرض هوا خنک شدند.

جدول ۲ طراحی آزمون‌ها و نتایج اندازه‌گیری

**Table 2** Design of tests and measurement results

تغییر دانه‌بندی می‌شود [۳۰]. بنابراین جهت دستیابی به میکروساختار ریزدانه و منطقه اغتشاشی عاری از عیب، سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار بایستی بهینه شوند.

نخعی و همکاران [۳۱] نانوکامپوزیت PP/EPDM/nanoclay را با استفاده از فرآیند FSP تولید کردند. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند (سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و دمای شانه ابزار) بر خواص کششی نانوکامپوزیت، از طرح باکس-بنکن<sup>۱</sup> استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی ابزار، استحکام کششی از 15.8 مگاپاسکال به 18.2 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دمای شانه ابزار موجب کاهش درصد ازدیاد طول نسبی نمونه در نقطه شکست، می‌شود. آن‌ها در پژوهشی دیگر، به منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت PP/EPDM/nanoclay و مدل‌سازی ریاضی آن، از متدولوژی سطح پاسخ و طرح باکس-بنکن استفاده نمودند [۳۲]. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی ابزار، افزایش تعداد پاس‌های فرآیند FSP و کاهش دمای شانه ابزار، چقرمگی شکست نمونه افزایش می‌یابد.

از این‌رو، با توجه به قابلیت و مزایای فرآیند آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی در تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی و به منظور تکمیل و توسعه تحقیقات انجام شده در این حوزه، در مقاله پیش‌رو، کامپوزیت‌های سطحی زمینه آلومینیومی AI7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با استفاده از ذرات تقویت‌کننده آلومینا و با به‌کارگیری فرآیند FSA تولید شدند. بدین منظور، متدولوژی سطح پاسخ<sup>۲</sup> به عنوان روش طراحی آزمایش<sup>۳</sup>، انتخاب شد. در ادامه، تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های سطحی، به انجام رسید. صحت و دقت معادلات رگرسیون با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز واریانس<sup>۴</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 اندازه ذرات تقویت‌کننده، بر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در پایان، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند با استفاده از روش مطلوبیت، استخراج شد.

با توجه به تحقیقات مرور شده در حوزه تولید و مطالعه کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیومی، مهمترین جوانب نوآوری مقاله پیش‌رو در مقایسه با تحقیقات منتشر شده، عبارتند از تمایز و تفاوت در: ترکیب جنس فلز پایه و نوع ذرات تقویت‌کننده، روش طراحی و تحلیل آزمون (متدولوژی سطح پاسخ)، استخراج مدل رگرسیون پارامترهای پاسخ، بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند (روش مطلوبیت)، نوع متغیرهای ورودی فرآیند و نوع پارامترهای خروجی فرآیند.

### 2- انتخاب عوامل آزمایش و متغیرهای پاسخ

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه فرآیندهای FSP و FSA، چهار متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار، قطر شانه ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شدند و هر یک از آن‌ها در سه سطح پایین (-۱)، میانه (۰) و بالا (+۱) مورد بررسی قرار

<sup>5</sup> Ultimate tensile strength (UTS)

<sup>6</sup> Elongation (EI)

<sup>7</sup> Design Expert

<sup>8</sup> Quenching

<sup>1</sup> Box-Behnken design

<sup>2</sup> Response surface methodology (RSM)

<sup>3</sup> Design of experiment (DOE)

<sup>4</sup> Analysis of variance (ANOVA)

آلومینا به ترتیب مساوی  $3.9 \text{ g/cm}^3$  و  $2400 \text{ MPa}$  است. این ذرات با خلوص بیش از 99% و در سه اندازه ۲۰، ۵۰ و ۸۰ میکرون تهیه شدند [۳۹]. ابزارهای FSA از جنس فولاد ابزار گرم کار H13 در سه قطر شانه ۹، ۱۵ و ۲۱ میلیمتر و به ترتیب در سه قطر پین ۳، ۵ و ۷ میلیمتر و با هندسه مخروطی شیاردار در بخش پین، طراحی و ساخته شدند. قطر شانه و پین به ترتیب با حروف a و d در نقشه ابزار مشخص شده اند (شکل ۳).

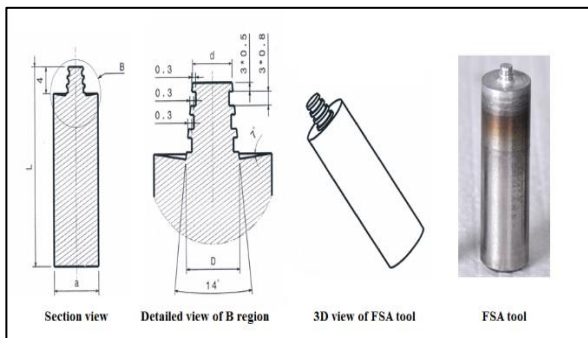


Fig. 3 Design and manufacture a sample of FSA tool

شکل ۳ طراحی و ساخت نمونه‌ای از ابزار FSA

به منظور جایگذاری میکروذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در سطح قطعه‌کار، تعداد ۱۸ سوراخ به قطر ۲ mm و عمق 3 mm در فواصل ۴ میلیمتری نسبت به یکدیگر ایجاد می‌شود (شکل ۴). در صورتی که مجموع حجم ۱۸ سوراخ ایجاد شده با  $V_h$  نشان داده شود و فرض شود که پودر آلومینا با توجه به وجود فضاهای خالی میان میکروذرات، با تراکم ۹۰ درصدی در داخل سوراخ‌ها جایگذاری شده است، از این‌رو، حجم کلی پودر مصرفی ( $V_p$ ) که مجموع حجم سوراخ‌ها را اشغال کرده است، مساوی  $0.9V_h$  خواهد شد. بنابراین، درصد حجمی ذرات اضافه شده به فلز پایه مطابق رابطه زیر برابر با 47.37% می‌باشد:

$$\text{Volume percent} = \left( \frac{V_p}{V_p + V_h} \right) \times 100 = \left( \frac{0.9V_h}{1.9V_h} \right) \times 100 \quad (2)$$

پس از پر نمودن سوراخ‌ها توسط پودر اکسید آلومینیوم، درب سوراخ‌ها توسط ابزار فاقد پین، بسته شد. سپس، آزمون‌های FSA منطبق بر اصول تشریح شده در بخش مقدمه و مطابق ۳۱ ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۲ با استفاده از ماشین فرز اونیورسال انجام شدند. ماشین فرز اونیورسال از نوع دیجیتال، مدل FP4MK و ساخت ایران است. شکل ۵، نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی  $\text{Al}_7075/\text{Al}_2\text{O}_3$  تولید شده در آزمون شماره ۱۱ را نشان می‌دهد.

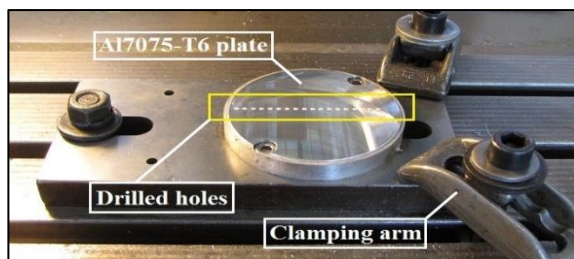


Fig. 4 Drilling the workpiece surface

شکل ۴ سوراخ‌کاری سطح قطعه‌کار

شماره آزمون	متغیرهای ورودی					متغیرهای خروجی	
	سرعت دورانی (N)	نرخ پیشروی (S)	قطر شانه (D)	اندازه ذرات (P)	استحکام کششی نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)	
۱	-۱	-۱	-۱	۱	۳۸۰	۸.۱۲	
۲	-۱	۱	۱	۱	۳۹۱	۸.۰۵	
۳	-۱	۱	۱	-۱	۳۸۵	۸.۰۵	
۴	۱	۱	۱	-۱	۴۹۰	۸.۰۰	
۵	۱	۱	-۱	۱	۴۴۵	۷.۶۲	
۶	.	.	-۱	.	۴۱۰	۷.۸۰	
۷	-۱	-۱	۱	۱	۳۷۵	۸.۱۲	
۸	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۹	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۱۰	.	.	۱	.	۵۱۵	۷.۲۰	
۱۱	.	.	-۱	.	۳۸۰	۸.۱۰	
۱۲	۱	۱	-۱	-۱	۲۷۰	۸.۸۰	
۱۳	۱	۱	-۱	۱	۳۹۲	۸.۰۰	
۱۴	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۱۵	-۱	-۱	-۱	-۱	۲۶۰	۸.۱۵	
۱۶	-۱	۱	-۱	-۱	۳۷۱	۸.۱۰	
۱۷	۱	۱	-۱	۱	۳۶۸	۸.۱۲	
۱۸	-۱	.	.	.	۳۷۸	۸.۰۷	
۱۹	۱	۱	-۱	-۱	۳۹۰	۸.۱۰	
۲۰	۱	.	.	.	۳۹۲	۸.۱۰	
۲۱	.	.	.	۱	۴۱۸	۷.۹۰	
۲۲	۱	۱	۱	-۱	۳۹۰	۸.۱۰	
۲۳	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۲۴	۱	۱	۱	۱	۴۲۸	۷.۸۵	
۲۵	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۲۶	.	.	۱	.	۴۹۷	۷.۶۲	
۲۷	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۲۸	.	.	.	.	۵۱۰	۷.۵۰	
۲۹	-۱	-۱	۱	-۱	۳۶۲	۸.۱۵	
۳۰	.	.	.	-۱	۵۰۵	۷.۷۰	
۳۱	-۱	۱	-۱	۱	۳۸۵	۸.۰۵	

#### 4- اجرای آزمایش

جدول ۳، ترکیب شیمیایی ماده تحت آزمایش (Al7075-T6) را نشان می‌دهد.

جدول ۳ ترکیب شیمیایی آلیاژ Al7075-T6 [۳۷]

Table 3 Chemical composition of Al7075-T6 alloy [37]

نام عنصر	درصد وزنی (%)
آلومینیوم	87.1 - 91.4
روی	5.1 - 6.1
منیزیم	2.1 - 2.9
مس	1.2 - 2.0
آهن	0.50
سیلیسیم	0.40
منگنز	0.30
کروم	0.18 - 0.28
تیتانیوم	0.20

ذرات تقویت‌کننده مورد استفاده در فرآیند تولید کامپوزیت سطحی از جنس اکسید آلومینیوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) هستند. چگالی و مقاومت فشاری پودر

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 متغیرهای پاسخ و پارامترهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون<sup>۵</sup> به کار گرفته خواهد شد [۴۰]. میزان سطح ریسک<sup>۶</sup> ( $\alpha$ ) در فرآیند تحلیل، مساوی 0.05 در نظر گرفته شد. جداول ۴ و ۵، نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون را به ترتیب برای استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نشان می‌دهند. با احتساب  $\alpha = 0.05$  و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول  $S$  (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم  $D^2$  (مجذور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر استحکام کششی نهایی نمونه‌ها و پارامتر مرتبه اول  $S$  (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم  $P^2$  (مجذور اندازه ذرات تقویت‌کننده) به عنوان عبارات موثر بر درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، شناخته و معرفی شدند.

برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش استفاده می‌شود. بنابراین 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 جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای 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 [۴۰]. از این رو، با توجه به مقادیر  $P$  مندرج در جداول فوق‌الذکر ملاحظه می‌شود که عبارت رگرسیون، موثر و عبارت عدم برازش، غیرموثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش‌بینی تغییرات متغیرهای پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می‌گیرد. همچنین، برای آزمون صحت توزیع نرمال مانده‌ها از نمودار احتمال نرمال استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ (a) و (b) مشاهده می‌شود، مانده‌ها در هر دو نمودار، عموماً از یک خط راست پیروی می‌کنند و هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن، عدم تقارن و نقاط دورافتاده وجود ندارد.

روابط (۳) و (۴) به ترتیب معادلات رگرسیون استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده، ارائه می‌کنند:

$$UTS = 499.38 + 1.96N + 29.06S + 18.39D - 54.36N^2 - 57.23D^2 \quad (3)$$

$$(\%EL)^{-0.16} = 0.72 - 4.072 \times 10^{-4}N + 2.114 \times 10^{-3}S + 1.021 \times 10^{-3}P - 3.347 \times 10^{-3}N^2 - 4.472 \times 10^{-3}P^2 \quad (4)$$

با توجه به استخراج معادلات رگرسیون برای استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، می‌توان مقادیر متغیرهای پاسخ را پیش از اجرای فرآیند و بر حسب متغیرهای ورودی، پیش‌بینی نمود. از این رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به ماکزیمم پارامترهای پاسخ، وجود دارد.

چگونگی تغییرات متغیر پاسخ بر حسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه بُعدی منحنی سطح پاسخ نشان داد. در این نمودارها

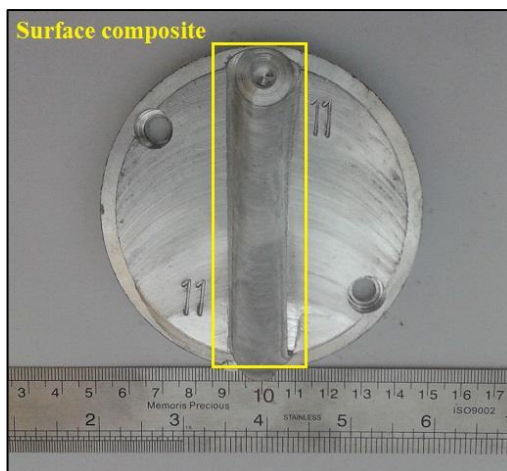


Fig. 5 A sample of Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface composite (test no. 11)

شکل ۵ نمونه‌ای از کامپوزیت سطحی Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (آزمون شماره ۱۱)

### ۵- اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ

برای اندازه‌گیری استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی از آزمون کشش استفاده می‌شود. استحکام کششی نهایی عبارت است از بیشینه تنش کششی که نمونه آزمون پیش از این که مقطع آن به صورت قابل توجهی دچار باریک‌شدگی شود، تحمل می‌کند. همچنین، درصد ازدیاد طول معیاری از انعطاف‌پذیری و تغییر شکل پلاستیک نمونه است که می‌تواند قبل از شکست، از خود نشان دهد.

بدین منظور، نمونه‌های کشش مطابق استاندارد<sup>۱</sup> ASTM E8 در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند FSA، با استفاده از وایرکات<sup>۲</sup> استخراج و آماده شدند. سپس، هر یک از آن‌ها با استفاده از دستگاه کشش و با نرخ پیشروی 2 mm/min در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند. دستگاه کشش از نوع اونیورسال، مدل اینسترون<sup>۳</sup> و ساخت کشور آمریکا است. شکل ۶، تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد.

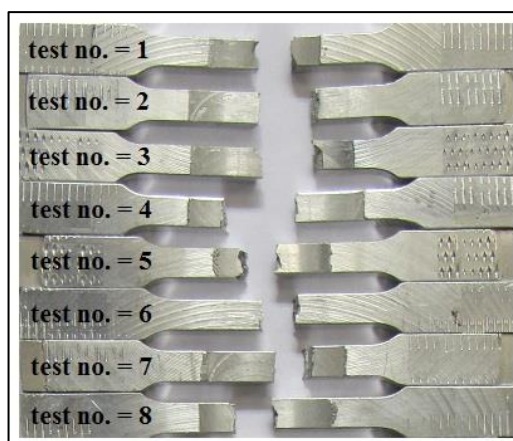


Fig. 6 A number of broken samples in the tensile test

شکل ۶ تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده در آزمون کشش

### ۶- تجزیه و تحلیل نتایج

<sup>۴</sup> Analysis of variance (ANOVA)

<sup>۵</sup> Regression analysis

<sup>۶</sup> Confidence level

<sup>۱</sup> American society for testing and materials

<sup>۲</sup> Wire electrical discharge machining

<sup>۳</sup> INSTRON

استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب کاهش مدت زمان مواجهه ابزار با قطعه‌کار می‌شود که منجر به کاهش حرارت ورودی به منطقه اغتشاشی خواهد شد.

تأثیرات متقابل دو متغیر ورودی بر روی متغیر پاسخ قابل مشاهده است و مقادیر سایر متغیرهای ورودی در سطوح مرکزی (سطح صفر) ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

ارتباط استحکام کششی نهایی با دو پارامتر نرخ پیشروی ابزار و قطر شانه ابزار در شکل (۸- a) نشان داده شده است. در این وضعیت، در صورتی که قطر شانه ابزار ثابت در نظر گرفته شود، افزایش نرخ پیشروی موجب افزایش

جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای استحکام کششی نهایی

Table 4 ANOVA results of modified regression model for the ultimate tensile strength

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
< 0.0001	9.14	16952.27	84761.37	5	مدل رگرسیون
0.8411	0.041	76.14	76.14	1	N (سرعت دورانی ابزار)
0.0084	8.19	15196.06	15196.06	1	S (نرخ پیشروی ابزار)
0.0821	3.28	6086.72	6086.72	1	D (قطر شانه ابزار)
0.0106	7.62	14140.62	14140.62	1	N <sup>2</sup>
0.0045	9.75	18084.40	18084.40	1	D <sup>2</sup>
-	-	1854.62	46365.41	25	خطای مانده
0.5795	0.94	1828.92	34749.41	19	عدم برازش
-	-	1936	11616	6	خطای خالص
-	-	-	1.311E+5	30	مجموع

جدول ۵ آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای درصد ازدیاد طول

Table 5 ANOVA results of modified regression model for the percentage of elongation

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
< 0.0001	8.41	8.541E-5	4.271E-4	5	مدل رگرسیون
0.5743	0.32	3.290E-6	3.290E-6	1	N (سرعت دورانی ابزار)
0.0094	7.92	8.043E-5	8.043E-5	1	S (نرخ پیشروی ابزار)
0.1864	1.85	1.875E-5	1.875E-5	1	P (اندازه ذرات)
0.0303	5.28	5.360E-5	5.360E-5	1	N <sup>2</sup>
0.0029	10.87	1.104E-4	1.104E-4	1	P <sup>2</sup>
-	-	1.016E-5	2.539E-4	25	خطای مانده
0.3677	1.37	1.086E-5	2.064E-4	19	عدم برازش
-	-	7.916E-6	4.750E-5	6	خطای خالص
-	-	-	6.810E-4	30	مجموع

از سوی دیگر، ارتباط استحکام کششی نهایی با دو پارامتر سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار در شکل (۸- b) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنظیم مقادیر سرعت دورانی و قطر شانه ابزار به ترتیب در مقادیر 800 rpm و 15 mm منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در سطح میانه تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. در این وضعیت، افزایش قطر شانه ابزار موجب نرم‌شدن ماده و افزایش نرخ سیلان آن می‌شود که در پی آن، توزیع بهتری از ذرات تقویت‌کننده در فلز پایه ایجاد می‌شود. توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه فلزی موجب تجمع نایجابی‌ها در همسایگی ذرات می‌شود که منجر به افزایش چگالی نایجابی‌ها در زمینه فلزی و فصل مشترک "زمینه - پودر" خواهد شد. از این‌رو، استحکام کششی نمونه کامپوزیتی بهبود می‌یابد [۴۴].

از سوی دیگر، افزایش قطر شانه ابزار از 15 mm به 21 mm باعث کاهش استحکام کششی می‌شود. در این وضعیت، افزایش قطر شانه ابزار موجب

از این‌رو، انحلال و رشد دانه‌ها کاهش یافته و منتج به بهسازی دانه‌بندی میکروساختار و افزایش استحکام کششی می‌شود. ارتباط میان شاخص حرارتی (HI) با سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار در فرآیند FSW به صورت زیر ارائه شده است [۴۱]:

$$(HI) \text{ or } \left( \frac{T}{T_m} \right) = K \left( \frac{N^2}{S \times 10^4} \right)^\alpha \quad (5)$$

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 مستقیماً با سرعت دورانی ابزار متناسب است و به صورت معکوس با نرخ پیشروی ابزار، تغییر می‌کند. بنابراین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار معینی تثبیت شود، افزایش نرخ پیشروی ابزار موجب تقلیل شاخص حرارتی خواهد شد که منجر به کاهش نرخ انحلال رسوبات تقویت‌کننده می‌شود [۴۲]. از این‌رو، خواص کششی نمونه بهبود می‌یابد [۴۳].

<sup>1</sup> Heat index

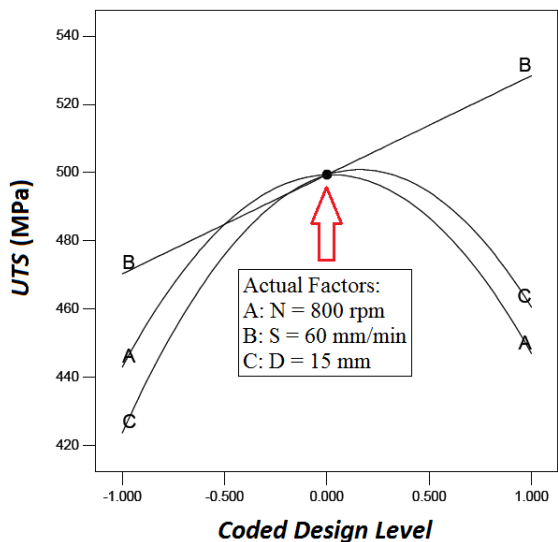
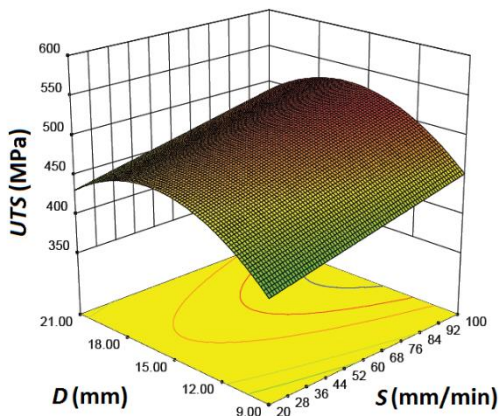


Fig. 9 The effect of N, S, and D variables on the ultimate tensile strength

شکل ۹ تأثیر متغیرهای N، S و D بر استحکام کششی نهایی

در ادامه، با توجه به نتایج تحلیل واریانس مدل رگرسیون برای درصد ازدیاد طول (جدول ۵)، تأثیر سه متغیر: سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و اندازه ذرات تقویت‌کننده بر انعطاف‌پذیری نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، کاهش نرخ پیشروی ابزار و کاهش اندازه ذرات آلومینا نسبت به سطح میانه، منتج به افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، کاهش نرخ پیشروی ابزار موجب افزایش مدت تماس ابزار با فلز پایه می‌شود که منجر به افزایش حرارت اصطکاکی خواهد شد. از این رو، افزایش دمای منطقه اغتشاشی منتج به رشد دانه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری نمونه می‌شود. حذف خوشه‌ها و حفرات و انحلال و توزیع آن‌ها در زمینه فلزی به همراه کاهش کسر عیوب در فصل مشترک "زمینه - پودر" نیز می‌تواند به عنوان بخشی از دلایل افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی مطرح شود [۴۵]. همچنین با کاهش نرخ پیشروی، توزیع یکنواخت‌تری از ذرات آلومینا در فلز پایه حاصل می‌شود که این موضوع با کاهش اندازه ذرات آلومینا، تقویت می‌شود.

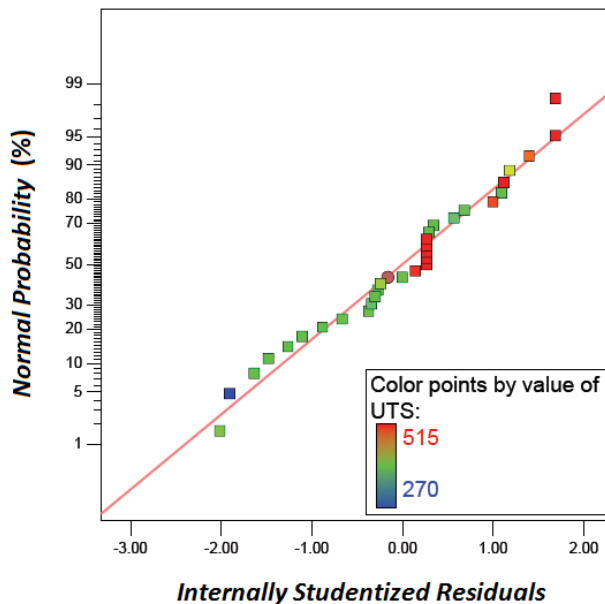


a) Investigation the effect of S and D)

(a) بررسی تأثیر S و D

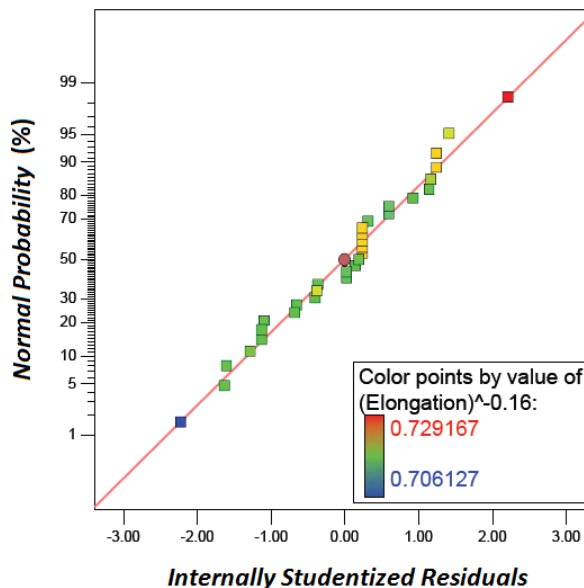
افزایش حرارت اصطکاکی و دمای منطقه اغتشاشی می‌شود که منجر به رشد دانه‌ها و انحلال رسوبات خواهد شد.

تأثیر متغیرهای سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و قطر شانه ابزار بر استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی علاوه بر شکل ۸، در شکل ۹ نیز نشان داده شده است.



(a) Ultimate tensile strength {UTS}

(a) استحکام کششی نهایی {UTS}



(b) Percentage of elongation { [(% EI)] ^(-0.16)}

(b) درصد ازدیاد طول {[(EI) %]^(-0.16)}

Fig. 7 Normal probability plot

شکل ۷ نمودار احتمال نرمال

بهینه سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند، مورد تأیید قرار گرفت.

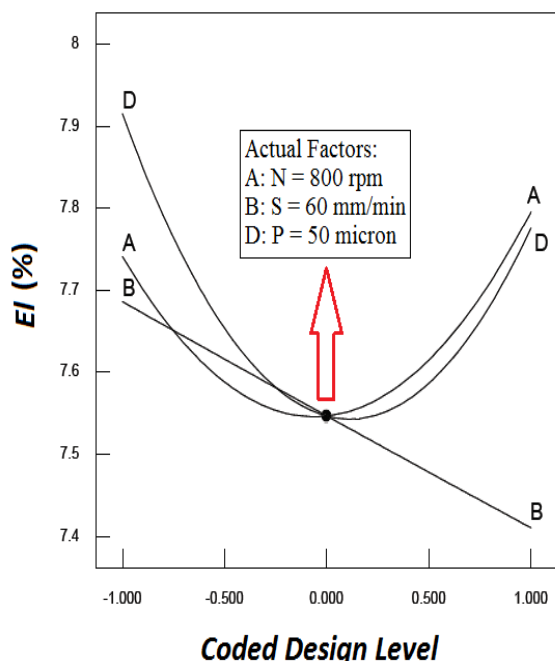


Fig. 10 The effect of N, S, and P variables on the percentage of elongation

شکل ۱۰ تأثیر متغیرهای N، S و P بر درصد ازدیاد طول

جدول ۶ ترکیب بهینه از متغیرهای ورودی فرآیند

Table 6 Optimal combination of process input variables

نوع متغیر	نام متغیر	واحد	مقدار بهینه
ورودی	سرعت دورانی ابزار	rpm	629.66
	نرخ پیشروی ابزار	mm/min	99.99
	قطر شانه ابزار	mm	15.73
پاسخ	اندازه ذرات تقویت کننده	μm	۲۰
	استحکام کششی نهایی	MPa	519.13
	ازدیاد طول	%	7.8

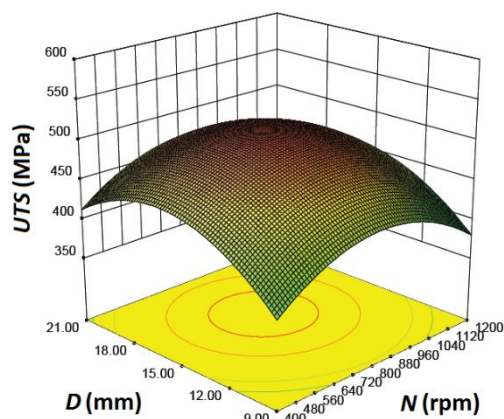
جدول ۷ مقایسه نتایج حاصل از بهینه سازی و آزمون صحت گذاری

Table 7 Comparison of the results obtained from optimization and verification test

پاسخ خروجی	بهینه سازی	صحت گذاری	درصد اختلاف
استحکام کششی (MPa)	519.13	510.5	1.66 %
ازدیاد طول (%)	7.8	7.2	7.69 %

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، تحلیل آماری و بهینه سازی پارامترهای موثر بر استحکام کششی و انعطاف پذیری کامپوزیت سطحی  $Al_7075/Al_2O_3$  تولید شده در فرآیند آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از متدلوژی سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، به انجام رسید. نتایج مهم حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می شوند:



b) Investigation the effect of N and D)

(b) بررسی تأثیر N و D

Fig. 8 Influence of input variables on the ultimate tensile strength

شکل ۸ تأثیر متغیرهای ورودی بر استحکام کششی نهایی

به کارگیری ابزار در سرعت دورانی بالاتر نسبت به سطح میانه موجب افزایش انعطاف پذیری نمونه کامپوزیتی می شود. یکی از دلایل وقوع این پدیده می تواند افزایش دما در منطقه اغتشاشی باشد که منجر به انحلال موضعی فازهای سخت و نرم شدگی ماده می شود. این پدیده غالباً در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر رخ می دهد

۷- بهینه سازی و صحت گذاری

در این پژوهش، روش مطلوبیت<sup>۱</sup> به عنوان روش بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد [۳۳]. در این پژوهش، هدف تابع مطلوبیت، بهینه سازی متغیرهای پاسخ است. بنابراین، مطلوبیت به صورت زیر تعریف می شود:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left( \frac{y-L}{U-L} \right)^r & L \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق، پارامترهای  $L$  و  $U$  به ترتیب، حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ  $y$  هستند. در این پژوهش، مقدار وزن مساوی یک فرض می شود و در نتیجه، تابع مطلوبیت در مود خطی تعریف خواهد شد. جدول ۶، ترکیب بهینه از مقادیر متغیرهای ورودی فرآیند با بالاترین مقدار تابع مطلوبیت ( $d = 0.915$ ) را جهت دستیابی همزمان به مقادیر بهینه از استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نشان می دهد.

بنابراین با توجه به مقدار بالای تابع مطلوبیت، می توان دریافت که روند بهینه سازی به طور موفقیت آمیزی، اهداف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.

برای صحت گذاری ترکیب پارامتری مندرج در جدول ۶، آزمون تجربی توسط ابزاری به قطر شانه 15 mm، با استفاده از ذرات  $Al_2O_3$  به اندازه ۲۰ میکرون و با تنظیم سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار در مقادیر نزدیک به مقادیر بهینه متغیرهای ورودی، به انجام رسید. جدول ۷، نتایج حاصل از آزمون صحت گذاری و مقایسه آن با نتایج بهینه سازی را ارائه می کند. با توجه به اختلاف اندک میان نتایج بهینه سازی و آزمون تجربی، صحت و دقت فرآیند

<sup>1</sup> Desirability method



- [2] Yousefpour, H. and Akbari Mousavi, S. A. A., "Investigations on microstructure, wear behavior and corrosion resistance of brass/graphite composite produced by friction stir processing", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 253-260, 2016.
- [3] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [4] Weglowski, M. S., "Friction stir processing - State of the art", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 114-129, 2018.
- [5] Zadali Kotiyani, M. and Ranjbar, Kh., "Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of in-situ formed Al 3003/Al3Zr + Al3Ti composite fabricated via friction stir processing", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No.3, pp. 363-372, 2019.
- [6] Thomas, W. M. Nicholas, E. D. Needham, J. C. Murch, M. G. Templesmith, P. and Dawes, C. J., "Improvements to friction welding", *International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8*, 1991.
- [7] Sahu, P. K. Singh, S. Chen, G. Yijun, L. Zhang, S. and Shi, Q., "Wear behavior of the friction stir alloyed AZ31 Mg at different volume fractions of Al particles reinforcement and its enhanced quality attributes", *Tribology International*, Vol. 146, pp. 106268, 2020.
- [8] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Gerlich, A. P., "Strengthening analyses and mechanical assessment of Ti/Al2O3 nano-composites produced by friction stir processing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 631, pp. 75-85, 2015.
- [9] Sharma, V. Prakash, U. and Manoj Kumar, B. V., "Surface composites by friction stir processing: A review", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, pp. 117-134, 2015.
- [10] Avettand-Fènoël, M. N. Simar, A. Shabadi, R. Taillard, R. and de Meester, B., "Characterization of oxide dispersion strengthened copper based materials developed by friction stir processing", *Material Design*, Vol. 60, pp. 343-357, 2014.
- [11] Gopan, V. Sree Kumar, P. S. Chandran, J. P. Vijay, W. and Sanjay Kumar, M., "Experimental investigation on the effect of process parameters on friction stir processing of aluminium", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, pp. 13674-13681, 2018.
- [12] Bharti, S. Dutta, V. Sharma, S. and Kumar, R., "A study on the effect of Friction Stir Processing on the hardness of Aluminum 6000 series", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, No. 7, pp. 5185-5188, 2019.
- [13] Faraji, G. Dastani, O. and Mousavi, S. A. A. A., "Effect of process parameters on microstructure and micro-hardness of AZ91/Al2O3 surface composite produced by FSP", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, pp. 1583-1590, 2011.
- [14] Khayyamin, D. Mostafapour, A. and Keshmiri, R., "The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO2 composite fabricated by FSP", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 217-221, 2013.
- [15] Sathiskumar, R. Murugan, N. Dinaharan, I. and Vijay, S. J., "Characterization of boron carbide particulate reinforced in situ copper surface composites synthesized using friction stir processing", *Materials Characterization*, Vol. 84, pp. 16-27, 2013.
- [16] Ghasemi-Kahrizangi, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Moshref-Javadi, M., "Effect of friction stir processing on the tribological performance of Steel/Al2O3 nanocomposites", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 276, pp. 507-515, 2015.
- [17] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Gerlich, A. P., "Strengthening analyses and mechanical assessment of Ti/Al2O3 nano-composites produced by friction stir processing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 631, pp. 75-85, 2015.
- [18] Rao, V. R. Ramanaiah, N. and Sarcar, M. M. M., "Fabrication and investigation on properties of TiC reinforced Al7075 metal matrix composites", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 592-594, pp. 349-353, 2014.

- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم D<sup>2</sup> (مجذور قطر شانه ابزار) به عنوان عبارات موثر بر استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی معرفی شدند. همچنین، پارامتر مرتبه اول S (نرخ پیشروی ابزار) و عبارت مرتبه دوم P<sup>2</sup> (مجذور اندازه ذرات تقویت‌کننده) به عنوان عبارات موثر بر درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، استخراج و مشخص شدند.
- بررسی نمودار منحنی سطح پاسخ نشان داد، در صورتی که قطر شانه ابزار ثابت در نظر گرفته شود، افزایش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 100 mm/min موجب افزایش 5.81 درصدی استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. در این حالت، افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش حرارت ورودی به منطقه اغتشاشی می‌شود که منتج به کاهش رشد دانه‌ها و بهسازی میکروساختار خواهد شد.
- با بررسی نمودار منحنی سطح پاسخ می‌توان دریافت که تنظیم مقادیر سرعت دورانی ابزار و قطر شانه ابزار به ترتیب در مقادیر 800 rpm و 15 mm، منتج به دستیابی به ماکزیمم استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. همچنین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار 800 rpm تنظیم شود، افزایش قطر شانه ابزار از 9 mm به 15 mm باعث افزایش 17.97 درصدی استحکام کششی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش بیشتر در قطر شانه ابزار موجب افزایش دمای منطقه اغتشاشی می‌شود که منجر به انحلال دانه‌ها و کاهش استحکام کششی خواهد شد.
- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که کاهش نرخ پیشروی ابزار از 60 mm/min به 20 mm/min و کاهش اندازه ذرات آلومینا از 50 μm به 20 μm، به ترتیب موجب افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی به میزان 1.85 % و 5.04 % می‌شود. همچنین با کاهش نرخ پیشروی، توزیع یکنواخت‌تری از ذرات آلومینا در فلز پایه حاصل می‌شود که این موضوع با کاهش اندازه ذرات آلومینا، تقویت می‌شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت دورانی ابزار نسبت به سطح میانه منجر به انحلال موضعی فازهای سخت و نرم‌شدگی ماده می‌شود که منتج به افزایش انعطاف‌پذیری نمونه کامپوزیتی خواهد شد.
- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جهت دستیابی به مقادیر بیشینه از استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کامپوزیتی، استخراج گردید. مقدار بالای تابع مطلوبیت (0.915)، نشان داد که روند بهینه‌سازی به طور موفقیت‌آمیزی، اهداف از پیش تعیین شده را به صورت مناسب و مطلوب، محقق نموده است.
- اختلاف اندک میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت-گذاری (کمتر از ۸ درصد)، صحت و دقت روند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند را تأیید نمود

## 9-مراجع

- [1] Mironov, S. Sato, Y. S. and Kokawa, H., "Nanocrystalline titanium, Chapter 4: Friction-stir processing", Elsevier, ISBN 9780128145999, pp. 55-69, 2019.

- [36] Design Expert software, <http://www.statease.com>, available in 1, April 2020.
- [37] Online materials information resource, <http://www.matweb.com>, available in 1, April 2020.
- [38] Heat Treatment of Aluminum Alloys, Aerospace Material Specification, AMSH6088, 1997.
- [39] Pourian Chemical Institute, <http://pourian-chemical.com>, available in 22, May 2020.
- [40] Montgomery, D. C., "Design and analysis of experiments", 9th edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-11347-8, 2017.
- [41] Arbegast, W. J., "Modeling friction stir joining as a metalworking process", Proceedings of Hot Deformation of Aluminum Alloys III, pp. 313-327, 2003.
- [42] Benavides, S., Li, Y., Murr, L. E., Brown, D. and McClure, J. C., "Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminium", Scripta Materialia, Vol. 41, No. 8, pp. 809-815, 1999.
- [43] Shanmuga Sundaram, N. and Murugan, N., "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys", Materials & Design, Vol. 31, No. 9, pp. 4184-4193, 2010.
- [44] Ahmadi, A., Toroghinejad, M. R. and Najafizadeh, A., "Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process", Materials & Design, Vol. 53, pp.13-19, 2014.
- [45] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding", International Journal of Materials Research, Vol. 108, No. 12, pp.1036-1044, 2017.
- [19] Josyula, S. K. and Narala, S. K. R., "A brief review on manufacturing of Al-TiC MMC", Advanced Materials Research, Vol. 980, pp. 62-68, 2014.
- [20] Sharma, V. Prakash, U. and Manoj Kumar, B. V., "Surface composites by friction stir processing: A review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 224, pp. 117-134, 2015.
- [21] Mishra, R. S. Ma, Z. Y. and Charit, I., "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 341, No. 1-2, pp. 307-310, 2003.
- [22] Mahmoud, E. R. I. Takahashi, M. Shibayanagi, T. and Ikeuchi, K., "Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 5, pp. 413-425, 2009.
- [23] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, S. F. and Zarei-Hanzaki, A., "Microstructures and mechanical properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface nano-composite layer produced by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 500, No. 1-2, pp. 84-91, 2009.
- [24] Zahmatkesh, B. and Enayati, M. H., "A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 24-25, pp. 6734-6740, 2010.
- [25] Maxwell Rejil, C. Dinaharan, I. Vijay, S. J. and Murugan, N., "Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC+B4C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate", Materials Science and Engineering: A, Vol. 552, pp. 336-344, 2012.
- [26] Soleymani, S. Abdollah-zadeh, A. and Alidokht, S. A., "Microstructural and tribological properties of Al5083 based surface hybrid composite produced by friction stir processing", Wear, Vol. 278-279, pp. 41-47, 2012.
- [27] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, S. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016.
- [28] Khodabakhshi, E. Kazemi, Sh. and Ahmadifard, S., "Investigation the mechanical and microstructural properties of copper surface composite Cu/SiO<sub>2</sub> fabricated by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 426-433, 2018.
- [29] Kurt, A. Uygur, I. and Cete, E., "Surface modification of aluminium by friction stir processing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 313-317, 2011.
- [30] Azizieh, M. Kokabi, A. H. and Abachi, P., "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites fabricated by friction stir processing", Materials and Design, Vol. 32, pp. 2034-2041, 2011.
- [31] Nakhaei, M. R., Naderi, G. and Mostafapour, A., "Effect of processing parameters on morphology and tensile properties of PP/EPDM/organoclay nanocomposites fabricated by friction stir processing", Iranian Polymer Journal, Vol. 25, pp. 179-191, 2016.
- [32] Mostafapour, A., Naderi G. and Nakhaei M. R., "Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted friction stir processing", Polymer Composites, Vol. 39, No. 7, pp. 2336-2346, 2018.
- [33] Myers, R. H. Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments", 4th edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118 91601-8, 2016.
- [34] Vahdati, M. Mahdavejad, R. and Amini, S., "Statistical Analysis and Optimization of Factors Affecting the Spring-back Phenomenon in UVaSPIF Process Using Response Surface Methodology", International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 8, No.1, pp. 13-23, 2015.
- [35] Choopani, Y. Khajehzadeh, M. and Razfar, M., "Optimization of parameters affecting the magnetic abrasive finishing process using response surface method", In Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 41-50, 2019.