



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Statistical modeling of friction stir processing of Al/Al₂O₃ composite

Vahid Modanloo^a, Majid Elyasi^{b,*}

^a Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

^b Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Surface composite;

Friction stir processing;

Aluminum alloy;

Alumina powder;

ABSTRACT

In this research, friction stir processing for producing Al/Al₂O₃ composite has been investigated. The mechanical and wear properties of the reinforced composite are compared with processed and base materials. The response surface method has been used to determine the effect of the input parameters on the tensile strength and wear rate. Also, by using analysis of variance, the optimal levels of the parameters have been specified to achieve maximum strength and minimum wear. The obtained results showed that adding the alumina powder significantly increases the strength and wear resistance, and can also make the microstructure uniform. In addition, by examining the optimal results, it was found that by selecting the rotational speed of 1200 rpm, the feed rate of 40 mm/min, and 0.6 g of alumina powder, the highest strength (384 MPa) and the lowest wear rate (7.4 mm³/min) can be achieved for the processed composite sample.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: elyasi@nit.ac.ir

How to cite this article:

مدل سازی آماری فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی کامپوزیت آلومینیوم/آلومینا

وحید مدانلو^۱، مجید الیاسی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵	در این پژوهش، فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی جهت تولید کامپوزیت آلومینیوم ۱۱۰۰ تقویت شده با پودر آلومینا بررسی شده است. خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت تقویت شده با آلومینیوم فرآوری شده و ماده پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ برای تعیین تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند بر استحکام کششی و نرخ سایش استفاده شده است. همچنین با استفاده از آنالیز واریانس، سطوح بهینه پارامترها جهت دستیابی به بیشینه استحکام و کمینه سایش مشخص شده است. نتایج حاصل نشان داد که افزودن پودر آلومینا باعث افزایش قابل توجه استحکام و مقاومت به سایش و همچنین منجر به ریزساختار یکنواخت می شود. به علاوه، با بررسی نتایج بهینه مشخص شد که با انتخاب سرعت دوران ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی متر بر دقیقه و ۰/۶ گرم پودر آلومینا، بیشترین استحکام معادل ۳۸۴ مگاپاسکال و کمترین نرخ سایش معادل ۷/۴ میلی متر مکعب بر دقیقه برای نمونه کامپوزیتی فرآوری شده به دست می آید.

واژگان کلیدی:

کامپوزیت سطحی،
فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی،
آلیاژ آلومینیوم،
پودر آلومینا،

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

غیرقابل جذب درون قطعه، حالت پلاستیک (خمیری) در منطقه جوش به وجود آمده و با حرکت ابزار به سمت جلو، قطعه مستحکم می شود. فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی دارای مزایایی از جمله عدم تولید گازهای سمی و عدم نفوذ تغییرات فاز در منطقه جوش می باشد. در این روش، ذرات تقویت کننده به صورت پودر چسبیده به سطح گیره های نگه دارنده قطعات قرار می گیرند و با حرکت ابزار به منطقه جوش منتقل شده و در ماده زمینه تجزیه می شوند. بنابراین، با تغییر پارامترهای فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی مانند

کامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات افزودنی به دلیل برخورداری از خواص مطلوبی مانند استحکام بالا، سبکی، مقاومت در برابر سایش و خوردگی کاربرد گسترده ای در صنایع هوافضا، نظامی، حمل و نقل و پزشکی دارند. روش های مختلفی برای ساخت این نوع کامپوزیت ها وجود دارد که هر یک مزایا و معایب خود را دارند. یکی از روش ها، فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی می باشد که بسیار پرکاربرد است [۱]. در این روش با دوران یک ابزار

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

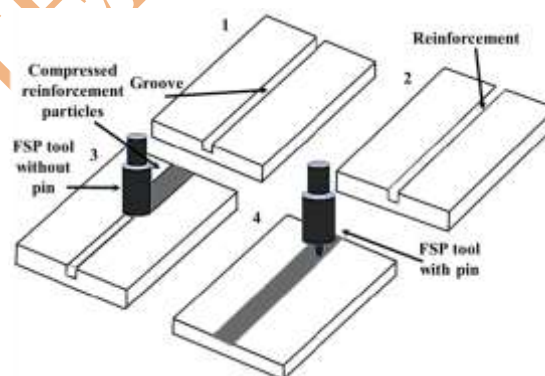
۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

کارباید (SiC) بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی چندپاسه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی عیوب جوشکاری TIG مانند ریزساختار درشت، تخلخل و ترک‌های جامدشدن را برطرف کرده و اندازه دانه‌های جوش را کاهش می‌دهد. تانگراسو و همکاران [۹] به ساخت کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده تیتانیوم کارباید (TiC) با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی پرداختند. آن‌ها با استفاده از یک فرآیند تک‌پاسه به بررسی اثر درصد وزنی TiC بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش سطح کامپوزیت تولیدشده پرداختند. آن‌ها دریافتند که در اثر افزایش درصد وزنی TiC مساحت ناحیه اغتشاشی کاهش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از خواص مکانیکی نشان داد که افزایش درصد TiC سبب افزایش استحکام و سختی و کاهش مقاومت کششی می‌شود. دواراجو و همکاران [۱۰] با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی به ساخت کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده SiC و اکسید آلومینیوم (آلومینا) پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثرات سرعت دوران ابزار، درصد وزنی SiC را بر استحکام کششی، سختی و نرخ سایش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که در اثر انجام فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی اندازه ذرات تقویت‌کننده در مقایسه با ذرات اولیه کاهش پیدا می‌کند. به علاوه، در اثر افزودن پودر آلومینا یک سری عیوب در اطراف این پودر در سطح کامپوزیت به وجود می‌آید. چن و همکاران [۱۱] به ساخت کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیومی با ذرات تقویت‌شده آلومینا پرداختند. آن‌ها ابتدا ورق‌هایی از ترکیب آلومینیوم و روی پراکسید (ZrO_2) را از طریق فرآیند متالورژی پودر تولید و سپس با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی ذرات با اندازه متوسط ۱۰ میکرومتر را در فاز زمینه پخش نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت پیشروی ابزار و دمای زینترینگ تأثیر بسزایی در ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده دارد. انجام فرآیند زینترینگ در دمای ۸۳۳ کلین و فرآیند فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه سبب افزایش مدول الاستیسیته تا ۱۰۹ گیگاپاسکال شده و استحکام کششی به ۴۸۸ مگاپاسکال افزایش می‌دهد. علی‌رغم وجود پژوهش‌های فراوان در ارتباط با فرآوری

سرعت دوران، سرعت حرکت خطی، فشار وارده به ابزار و زاویه شیب ابزار می‌توان خواص کامپوزیت را کنترل کرد [۲]. خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات آلومینا به روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی بستگی زیادی به ریزساختار منطقه جوش دارد [۳]. ریزساختار منطقه جوش تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع و مقدار ذرات تقویت‌کننده، پارامترهای فرآیند، نوع و شکل ابزار، نحوه توزیع ذرات در زمینه و مکانیزم‌های تقویت است [۴]. برای بررسی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های ساخته‌شده به روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، معمولاً از آزمایش‌های سختی سنجی، کشش، خمش، خستگی، سایش و خوردگی استفاده می‌شود [۵]. فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی یک روش مناسب برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات آلومینا است که با تغییر پارامترهای آن می‌توان خواص کامپوزیت را بهینه کرد [۶]. در شکل (۱) شماتیک فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی [۶]

تاکنون تحقیقات متعددی از سوی پژوهشگران در زمینه فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی گزارش شده است. صلاح و همکاران [۷]، اثر فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی چندپاسه بر ریزساختار اتصال جوش با آلیاژهای آلومینیومی غیرمشابه AA5083-H321 و AA8011-H14 را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی عیوب جوشکاری TIG مانند ساختار دانه‌درشت، تخلخل، ریزحفره‌ها و ترک خوردگی انجام را از بین برده و اندازه دانه اتصال جوش داده‌شده کاهش می‌یابد. به علاوه، با افزایش تعداد پاس، همگن‌سازی اولیه جوش بهبود می‌یابد. مهدی و میشرا [۸] به بررسی تأثیر ذرات تقویت‌کننده سیلیکون

مقدار	پارامتر (واحد)
۲۸۲	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۳۱۴	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
۱۲	ازدیاد طول (درصد)
۱۲۵	سختی (ویکرز)

جهت اندازه‌گیری نرخ سایش نمونه‌ها، نمونه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر از منطقه فرآوری‌شده بریده شده و به‌عنوان پین در دستگاه تست سایش (طبق استاندارد ASTM-G99) قرار گرفت. وزن نمونه قبل از آزمایش توسط یک ترازوی دیجیتال دقیق با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و میزان نرخ سایش آن تحت آزمون سایش با نیروی وارده ۱۰ نیوتن تحت سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی ریزساختار، ورق‌های فرآوری‌شده در جهت عمود بر راستای فرآیند بریده، مانع و پرداخت شدند. برای بررسی اندازه‌ها در منطقه جوش از میکروسکوپ نوری و جهت بررسی سطح ساییده‌شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمایش‌های تجربی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، نمونه ورق آلومینیوم ۱۱۰۰ تحت فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی قرار گرفت. در اولین آزمایش هیچ ماده افزودنی به ورق اضافه نشده و فرآیند معمولی بر روی آن انجام شد. سپس پودر آلومینا به میزان ۰/۳ گرم در ناحیه شیار اضافه‌شده و فرآوری انجام شد. در این قسمت هدف بررسی تأثیر انجام فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی بدون اضافه کردن پودر آلومینا و با اضافه کردن پودر بر ریزساختار، استحکام، سختی و نرخ سایش آن می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌ها، خواص موردنظر اندازه‌گیری شده و با ورق اولیه مقایسه شد. پس از انجام آزمایش‌های مرحله اول و مقایسه خواص موردنظر در قبل و بعد از فرآیند، آزمایش‌های مرحله دوم با هدف بررسی اثرات پارامترهای فرآیند مانند سرعت دوران ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا بر استحکام و نرخ سایش طراحی شد. در این مرحله، جهت بررسی اثرات اصلی پارامترهای مذکور، از روش رویه پاسخ با طرح مرکب مرکزی استفاده شد. بدین ترتیب تعداد ۲۰ آزمایش در این مرحله طراحی و انجام خواهد شد. پارامترهای f ، N و W به ترتیب بیانگر سرعت دوران ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر

اصطکاکی-اغتشاشی کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تحقیق جامعی در خصوص استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی استحکام کششی و نرخ سایش و بهینه‌سازی همزمان آن‌ها گزارش نشده است.

روش‌های سنتی پیش‌بینی خواص استحکام و سایش کامپوزیت‌های آلومینیومی تولیدشده با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی معمولاً بر پایه آزمون و خطا بوده که منجر به افزایش زمان و هزینه می‌گردد. امروزه محققان با توسعه روش‌های محاسباتی نظیر طراحی آزمایش و رگرسیون توانسته‌اند از هزینه‌های فرآیند به میزان قابل توجهی بکاهند. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا استفاده‌شده بر روی خروجی‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از طرح مرکب مرکزی و آنالیز واریانس، میزان تأثیرگذاری و مشارکت پارامترها تعیین شده است. در نهایت سطوح بهینه پارامترها برای بهینه‌سازی همزمان استحکام کششی و نرخ سایش کامپوزیت زمینه آلومینیومی ۱۱۰۰ تقویت‌شده با پودر آلومینا مشخص شده است.

۲- مواد و روش‌ها

ورق استفاده‌شده در این پژوهش از جنس آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ می‌باشد. جهت تعیین خواص مکانیکی ماده از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 استفاده شده است. نمونه استاندارد با استفاده از دستگاه وایرکات برش داده‌شده و سپس با دستگاه SANTAM با ظرفیت ۳۰ تن و سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفت. جدول ۱ خواص مکانیکی ماده استفاده‌شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، از آزمون سختی ویکرز برای تعیین سختی ماده استفاده شد. جهت انجام آزمون‌های فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، ورق‌های اولیه در ابعاد $150 \times 100 \times 2$ میلی‌متر آماده‌شده و شیارهایی در آن توسط یک ماشین فرز با ماکزیمم دور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به وجود آمد. سپس این شیارها از پودر آلومینا پر شده و فرآیند انجام شد. برای گیره‌بندی قطعات و همچنین موقعیت‌دهی صحیح از فیکسچر استفاده شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰

آلومینا می‌باشند. سپس، هر یک از آزمایش‌های طراحی شده انجام و مقادیر استحکام و نرخ سایش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های طراحی شده مرحله دوم به روش طرح مرکب مرکزی به همراه خروجی‌های موردنظر در جدول ۲ نشان

داده شده است. در ادامه، نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب [۱۲] تحلیل شده و اثرات پارامترها مورد بررسی قرار گرفت.

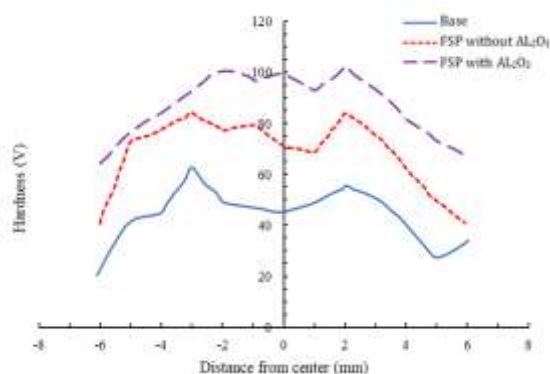
جدول ۲- طراحی آزمایش با استفاده از طرح مرکب مرکزی و خروجی‌های مربوطه

شماره آزمایش	N (rpm)	f (mm/min)	W (g)	استحکام کششی (MPa)	نرخ سایش ($\text{mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$)
۱	۸۰۰	۴۰	۰	۲۵۶	۸/۲
۲	۱۶۰۰	۴۰	۰	۲۹۴	۶/۸
۳	۸۰۰	۸۰	۰	۱۹۶	۹/۷
۴	۱۶۰۰	۸۰	۰	۲۱۳	۷/۸
۵	۸۰۰	۴۰	۰/۶	۳۳۷	۷/۷
۶	۱۶۰۰	۴۰	۰/۶	۳۷۱	۷/۸
۷	۸۰۰	۸۰	۰/۶	۳۱۱	۷/۴
۸	۱۶۰۰	۸۰	۰/۶	۳۴۱	۷
۹	۸۰۰	۶۰	۰/۳	۱۹۶	۹/۱
۱۰	۱۶۰۰	۶۰	۰/۳	۳۴۱	۷/۶
۱۱	۱۲۰۰	۴۰	۰/۳	۳۹۶	۷/۳
۱۲	۱۲۰۰	۸۰	۰/۳	۲۲۲	۷/۸
۱۳	۱۲۰۰	۶۰	۰	۲۲۰	۸/۱
۱۴	۱۲۰۰	۶۰	۰/۶	۳۷۱	۷
۱۵	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۲۴	۸
۱۶	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۲۰	۷/۸
۱۷	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۱۸	۷/۹
۱۸	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۲۸	۸/۱
۱۹	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۲۹	۸
۲۰	۱۲۰۰	۶۰	۰/۳	۳۲۴	۸/۱

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

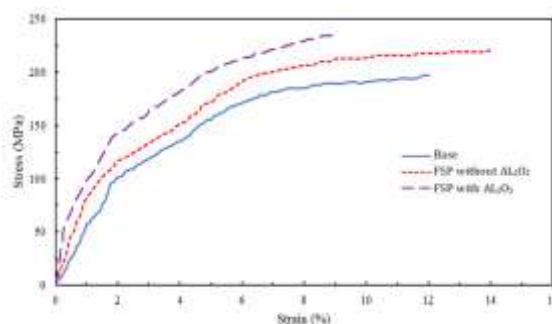
بهبود ریزساختار و کاهش اندازه دانه‌ها است. با کاهش اندازه دانه‌ها میزان سختی و استحکام افزایش پیدا می‌کند. اما در این شکل ملاحظه می‌گردد که افزودن آلومینا به منطقه اغتشاشی سبب افزایش بیشتر سختی می‌گردد. دلیل این پدیده بروز ناخالصی در ریزساختار منطقه اغتشاشی بوده که سبب افزایش دانسیته نابجایی‌ها و جابه‌جایی آن‌ها و در نتیجه افزایش میزان سختی خواهد شد. علاوه بر این، در اثر افزودن آلومینا ساختار منطقه اغتشاشی ریزتر شده و این ساختار ریز افزایش سختی را به همراه خواهد داشت. در ادامه، میزان نرخ سایش و نوع سایش نمونه‌های پایه، فرآوری شده بدون افزودن آلومینا و کامپوزیت‌شده با افزودن آلومینا اندازه‌گیری شده و مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۳- پروفایل سختی برای نمونه‌های مختلف: فلز پایه، فرآوری‌شده و کامپوزیت‌شده با پودر آلومینا

تصاویر سطح ساییده‌شده نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق شکل، برای نمونه‌های پایه و فرآوری‌شده در اثر آزمون سایش جریان پلاستیک زیادی در سطح سایش مشاهده می‌شود. در اثر حرارت ناشی از اصطکاک، ماده نرم شده و نمی‌تواند در مقابل تغییر شکل پلاستیک و حرارت ناشی از لغزش مقاومت کند. در چنین حالتی مد سایش به صورت سایش چسبنده است که نشان‌دهنده نرخ سایش بالا (مقاومت به سایش پایین) است. البته ملاحظه می‌گردد که میزان تغییر شکل پلاستیک و سایش چسبنده در شکل (۴-ب) (نمونه فرآوری‌شده بدون آلومینا) کمتر از نمونه پایه شکل (۴-الف) است که دلیل این افزایش میزان سختی ناشی از ریزساختار شدن است. اما در شکل (۴-ج) ملاحظه می‌گردد که در اثر افزودن پودر آلومینا، تغییر شکل

به‌منظور بررسی افزودن پودر آلومینا بر خواص مکانیکی نمونه شامل استحکام کششی و استحکام تسلیم، نمونه‌های پایه، فرآوری‌شده بدون افزودن آلومینا و کامپوزیت‌شده با افزودن پودر آلومینا تحت آزمون کشش تک‌محوره قرار گرفتند. در شکل (۲) نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های فوق‌الذکر نشان داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی بدون پودر آلومینا، میزان استحکام کششی در اثر بهبود ریزساختار بهبود پیدا کرده و به دلیل هم‌محور شدن دانه‌ها میزان کرنش شکست نیز افزایش پیدا می‌کند. اما ملاحظه می‌گردد که هنگامی که پودر آلومینا به منطقه اغتشاشی افزوده می‌شود میزان استحکام افزایش یافته اما میزان کرنش شکست کاهش پیدا می‌کند. دلیل این پدیده این است که ذرات آلومینا در حین آزمون کشش به‌عنوان ناخالصی عمل کرده و به‌عنوان نابجایی موانعی را بر سر جریان یافتن مواد ایجاد کرده و این عامل سبب بالا رفتن تنش شکست شده و رفتار شکست ماده را ترد می‌کند. در چنین شرایطی میزان کرنش شکست کاهش می‌یابد [۱۳].

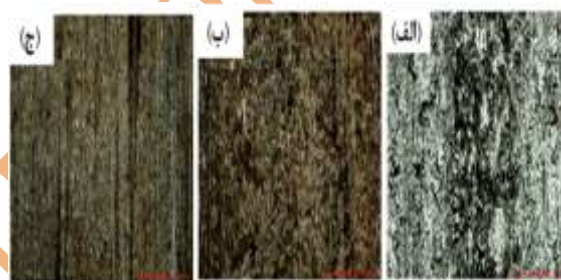


شکل ۲- نتیجه آزمون کشش برای نمونه‌های مختلف: فلز پایه، فرآوری‌شده و کامپوزیت‌شده با پودر آلومینا

به‌منظور بررسی اثر افزودن پودر آلومینا در فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی بر سختی منطقه اغتشاشی، آزمون میکروسختی نمونه‌ها انجام شده و پروفایل سختی در راستای عرض منطقه اغتشاشی به‌دست‌آمد که در شکل (۳) نشان داده شده است. طبق شکل، با انجام فرآیند بدون افزودن آلومینا، میزان سختی افزایش‌یافته که دلیل آن

نتایج تجربی و مدل رگرسیون برای استحکام کششی ارائه شده است. بیشترین میزان خطا در حدود ۱۵٪ می باشد که قابل قبول است. شکل (۶) منحنی اثرات اصلی پارامترهای فرآیند را بر میزان استحکام کششی نشان می دهد. همان طور که مشخص است، با افزایش سرعت دورانی ابزار (از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه) استحکام کششی افزایش پیدا می کند. در فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی سرعت دوران ابزار نقش تولید حرارت را بر عهده دارد، به طوری که با افزایش سرعت دوران میزان حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک سطح بهتر صورت گرفته و جریان مواد بهبود می یابد. این بهبود در جریان مواد سبب توزیع بهتر ذرات آلومینا در ناحیه اغتشاشی شده و افزایش استحکام را به همراه خواهد داشت. همچنین در اثر افزایش در سرعت پیشروی میزان استحکام کاهش می یابد. همچنین در فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، سرعت پیشروی نقش انتقال مواد، انتقال حرارت و تعیین زمان فرآیند را به عهده دارد. هنگامی که سرعت پیشروی افزایش می یابد، ابزار زمان کمتری را با سطح قطعه کار درگیر بوده و میزان حرارت تولیدی کاهش می یابد. در اثر این کاهش حرارت مواد به خوبی تغییر شکل پلاستیک نداده و این عامل سبب شده تا به جای عمل اغتشاشی، عمل شخم زنی غالب گردد که سبب بروز پلیسه در اطراف کار شده و پخش ذرات آلومینا در منطقه اغتشاشی بسیار کم می باشد. در چنین حالتی استحکام کاهش پیدا می کند (از ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور بر دقیقه). در نتیجه با افزایش میزان وزن آلومینا از صفر تا ۰/۶ گرم، میزان استحکام افزایش پیدا می کند. هنگامی که وزن آلومینا در ناحیه اغتشاشی افزایش می یابد، تعداد ذرات آن افزایش پیدا کرده و میزان ناخالصی هایی که به عنوان نابعی عمل می کنند افزایش می یابد. با افزایش دانسیته نابعی ها در حین آزمون کشش، نیروی بیشتری برای رسیدن به شکست نیاز است و این عامل بهبود استحکام را به همراه دارد. علاوه بر اثر افزودن آلومینا ریزساختار ماده تغییر یافته و از ساختاری خشن با ساختاری ریز و یکنواخت تبدیل شده که این عامل نیز افزایش استحکام را به همراه خواهد داشت. نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی (پیشروی، دور و وزن) بر استحکام کششی در شکل (۷) نشان داده شده است. طبق شکل، ملاحظه می گردد که جهت رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، باید سرعت دوران ابزار در بیشترین سطح،

پلاستیک شدید سطح و مد سایش چسبنده محو و به صورت الگوهای سایش لغزان و شیارهای موازی درمی آید که نشان دهنده بهبود نرخ سایش سطح است [۱۴]. دلیل این پدیده این است که در اثر افزودن پودر آلومینا تغییر شکل پلاستیک سطحی ناشی از سایش به خوبی صورت نگرفته که آلومینا به عنوان موانعی بر سر راه تغییر شکل قرار گرفته و بهبود خواص سایشی را به همراه خواهد داشت. در مرحله بعد به منظور بررسی اثرات پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی و نرخ سایش، تعداد ۲۰ آزمایش با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی با در نظر گرفتن اثر سه پارامتر سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا استفاده شده انجام شد.



شکل ۴- تصویر سطح سایش: (الف) فلز پایه (ب) فرآوری شده (ج) کامپوزیت شده با پودر آلومینا

۳-۲- استحکام کششی

پس از انجام تحلیل واریانس، نتایج طبق جدول ۳ به دست آمد. همانطور که مشخص است، عبارت خطی معادله رگرسیون تاثیر گذاری بیش تری نسبت به عبارت های درجه دوم و متقابل دارد زیرا مقدار P-value آن از ۰/۰۵ کمتر است [۱۵]. همچنین درصد مشارکت پارامترهای ورودی در جدول ۴ ارائه شده است که در آن سرعت دوران ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا به ترتیب برابر با ۱۳/۶۱، ۲۶/۸۸ و ۵۹/۵۱٪ می باشد. در نتیجه می توان دریافت که میزان پودر اضافه شده دارای بیشترین تاثیر و سرعت دوران ابزار دارای کمترین تاثیر بر روی استحکام کششی می باشند. همچنین مقدار کفایت مدل (R^2) نیز حدود ۸۰٪ حاصل شد که مطلوب است. به علاوه یک مدل تجربی از استحکام کششی بر اساس متغیرهای فرآیند مطابق با رابطه (۱) به دست آمد. در شکل (۵)، مقایسه بین

پیشروی در کمترین سطح و میزان پودر آلومینا اضافه شده در منطقه اغتشاشی نیز در بیشترین سطح خود باشد.

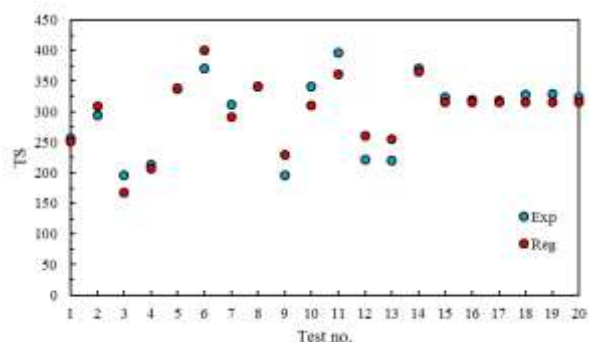
جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس برای استحکام کششی

منبع	Adj SS	F-Value	P-Value
مدل	۵۶۷۸۹/۸	۴/۳۵	۰/۰۱۶
خطی	۵۱۲۰۴/۱	۱۱/۷۶	۰/۰۰۱
N	۶۹۶۹/۶	۴/۸۰	۰/۰۵۳
f	۱۳۷۶۴/۱	۹/۴۸	۰/۰۱۲
W	۳۰۴۷۰/۴	۲۰/۹۹	۰/۰۰۱
درجه دو	۴۵۹۴/۴	۱/۰۶	۰/۴۱۱
N ²	۲۷۹۲/۱	۱/۹۲	۰/۱۹۶
F ²	۲۰۵/۱	۰/۱۴	۰/۷۱۵
W ²	۶۵/۱	۰/۰۴	۰/۸۳۷
اثر متقابل	۹۹۱/۴	۰/۲۳	۰/۸۷۵
N×f	۷۸/۱	۰/۰۵	۰/۸۲۱
N×W	۱۰/۱	۰/۰۱	۰/۹۳۵
f×W	۹۰۳/۱	۰/۶۲	۰/۴۴۹
خطا	۱۴۵۱۵/۰	-	-
عدم برازش	۱۴۴۲۲/۱	۱۵۵/۳۶	۰/۰۰۰
خطای خالص	۹۲/۸	-	-
کل	۷۱۳۰۴/۸	-	-

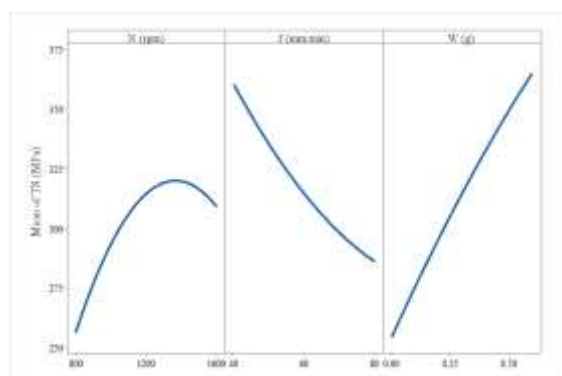
جدول ۴- مشارکت پارامترها در استحکام کششی

میزان مشارکت (%)	پارامتر
۱۳/۶۱	سرعت دوران ابزار
۲۶/۸۸	سرعت پیشروی ابزار
۵۹/۵۱	میزان پودر آلومینا

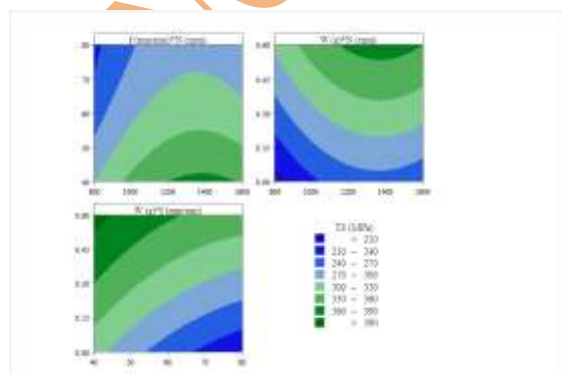
$$\begin{aligned}
 TS \text{ (MPa)} = & 85 + 0.565 N - 4.51f \\
 & + 99W - 0.000199N^2 \\
 & + 0.0216f^2 - 54W^2 \\
 & - 0.00039N \times f \\
 & + 0.009N \times W \\
 & + 1.77f \times W
 \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۵- مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون برای استحکام کششی



شکل ۶- اثر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی



شکل ۷- نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی بر استحکام کششی

جدول ۶- مشارکت پارامترها در نرخ سایش

پارامتر	میزان مشارکت (%)
سرعت دوران ابزار	۶۰/۰۵
سرعت پیشروی ابزار	۸/۳۳
میزان پودر آلومینا	۳۱/۶۰

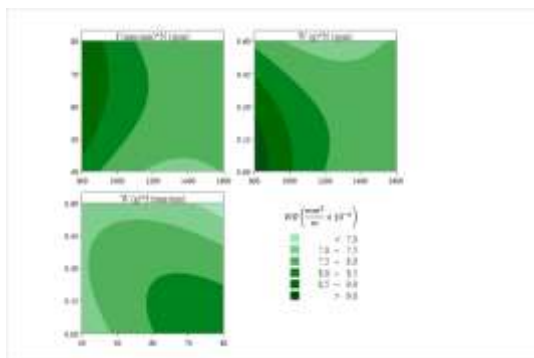
۳-۳- نرخ سایش

پس از انجام آنالیز واریانس، نتایج طبق جدول ۵ به دست آمد. همانطور که قابل مشاهده است، تمامی عبارت‌های خطی، درجه دوم و متقابل تاثیرگذار هستند. به علاوه طبق جدول ۶، سرعت دورانی با ۶۰/۰۵٪ بیشترین مشارکت و سرعت پیشروی با ۸/۳۳٪ کمترین مشارکت را بر روی نرخ سایش دارند. پارامتر وزن نیز دارای میزان مشارکت ۳۱/۶۰٪ می‌باشد. مقدار کفایت مدل (R^2) نیز حدود ۹۶٪ حاصل شد که بسیار مطلوب است [۱۶].

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس برای نرخ سایش

منبع	Adj SS	F-Value	P-Value
مدل	۸/۱۴۱۹۱	۲۶/۱۴	۰/۰۰۰
خطی	۴/۳۳۱۰۰	۴۱/۷۱	۰/۰۰۰
N	۲/۶۰۱۰۰	۷۵/۱۵	۰/۰۰۰
f	۰/۳۶۱۰۰	۱۰/۴۳	۰/۰۰۹
W	۱/۳۶۹۰۰	۳۹/۵۶	۰/۰۰۰
درجه دو	۰/۹۴۰۹۱	۹/۰۶	۰/۰۰۳
N ²	۰/۶۳۸۴۱	۱۸/۴۵	۰/۰۰۲
F ²	۰/۲۷۸۴۱	۸/۰۴	۰/۰۱۸
W ²	۰/۲۷۸۴۱	۸/۰۴	۰/۰۱۸
اثر متقابل	۲/۸۷۰۰۰	۲۷/۶۴	۰/۰۰۰
N×f	۰/۱۲۵۰۰	۳/۶۱	۰/۰۸۷
N×W	۰/۱۲۵۰۰	۳۲/۵۱	۰/۰۰۰
f×W	۰/۶۲۰۰۰	۴۶/۸۱	۰/۰۰۰
خطا	۰/۳۴۶۰۹	-	-
عدم برازش	۰/۲۷۷۷۶	۴/۰۶	۰/۰۷۵
خطای خالص	۰/۰۶۸۳۳	-	-
کل	۸/۴۸۸۰۰	-	-

رابطه (۲) مدل تجربی برای نرخ سایش بر اساس متغیرهای فرآیند را نشان می‌دهد. همچنین، در شکل (۸)، مقایسه بین نتایج تجربی و مدل رگرسیون برای نرخ سایش ارائه شده است. بیشترین میزان خطا در حدود ۴٪ می‌باشد که مطلوب است. اثرات پارامترهای فرآیند بر میزان نرخ سایش در شکل (۹) نشان داده شده است. طبق شکل، با افزایش سرعت دورانی (از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه) میزان نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد در اثر افزایش حرارت ناشی از افزایش سرعت دورانی ابزار، جریان مواد در حین فرآیند بهبود یافته و این عامل سبب بهبود پخش ذرات آلومینا در زمینه آلومینیوم می‌گردد. در چنین شرایطی نرخ سایش کاهش می‌یابد، اما هنگامی که سرعت چرخش ابزار از حد بحرانی (۱۲۰۰ دور بر دقیقه) بیشتر شود، در اثر افزایش نیروی گریز از مرکز احتمال پرت شدن ذرات آلومینا به بیرون از ناحیه اغتشاشی بالا رفته و این عامل افزایش نرخ سایش را به همراه دارد. ملاحظه می‌گردد که در اثر افزایش سرعت پیشروی میزان نرخ سایش افزایش می‌یابد. همچنین در اثر افزایش پیشروی نرخ خنک‌شوندگی افزایش یافته و این عامل سبب جریان نامناسب مواد خواهد شد. در چنین حالتی خط اغتشاشی خشن‌شده که منجر به شکل‌گیری پلیسه در اطراف این خط و عیوب متالورژیکی می‌شود. در چنین حالتی پخش ذرات آلومینا در خط اغتشاشی به‌خوبی صورت نگرفته و این عامل سبب می‌شود که در حین تست سایش ماده تغییر شکل پلاستیک زیادی داده و مد سایش از چسبنده به لغزش تبدیل می‌شود. همچنین در شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود که در اثر افزایش آلومینا میزان مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. هنگامی که میزان آلومینا افزایش پیدا می‌کند این عامل سبب کاهش میزان تماس فلز به فلز در حین آزمون سایش شده و در نتیجه آن تغییر شکل پلاستیک سطح در حین آزمون سایش کم می‌شود. در چنین شرایطی مد



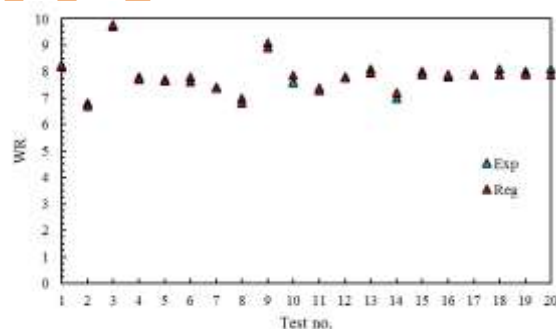
شکل ۱۰- نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی بر نرخ سایش

۳-۴- بهینه‌سازی

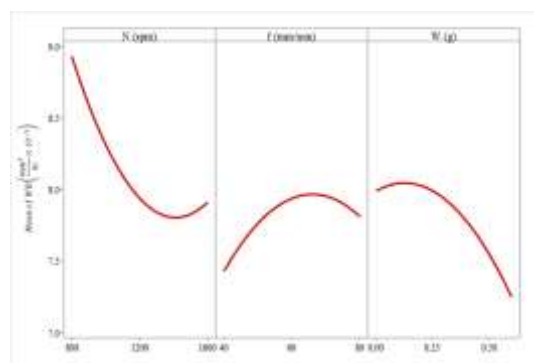
در این پژوهش جهت بهینه‌سازی کردن استحکام کششی و کمینه کردن نرخ سایش به‌طور همزمان، از تئوری تابع مطلوبیت استفاده شده است. پس از وارد کردن اطلاعات مربوط به هر پارامترها و پاسخ آن از لحاظ وزن و مطلوبیت، تمامی حالت‌ها (ترکیب‌های بهینه مختلفی از پارامترهای فرآیند) مورد بررسی قرار گرفته و آن رشته جواب‌هایی که مطلوبیت بالاتری دارند به‌عنوان رشته جواب بهینه شناخته می‌شوند. شکل (۱۱) مقادیر بهینه برای حالت‌های تک‌هدفه و چندهدفه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد که با انتخاب سرعت دوران ابزار ۱۲۰۴ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، و میزان ۰/۶ گرم اکسید آلومینیوم می‌توان به‌طور همزمان به استحکام بالا به همراه نرخ سایش پایین مناسب دست پیدا کرد. پس از به دست آوردن مقادیر بهینه نیاز است که این مقادیر با انجام یک آزمایش مورد صحت‌سنجی قرار گیرند. در همین راستا، آزمایشی با جواب‌های بهینه انجام و مقادیر خطای استحکام کششی و نرخ سایش آن مقایسه شد. مقایسه نتایج بهینه با آزمایش تأییدی بیانگر میزان خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۰٪ برای هر دو خروجی (استحکام و نرخ سایش) می‌باشد که حاکی از دقت قابل قبول مدل تجربی و روش بهینه‌سازی ارائه شده می‌باشد.

سایش از حالت چسبنده به حالت لغزنده تبدیل می‌شود که سبب افزایش مقاومت به سایش می‌شود. شکل (۱۰) بیانگر نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی بر نرخ سایش است. ملاحظه می‌گردد که جهت رسیدن به کمترین مقدار نرخ سایش (بیشترین مقدار مقاومت به سایش) نیاز است که سرعت دورانی ابزار در سطح میانی خود، سرعت پیشروی در کمترین سطح و میزان آلومینا اضافه‌شده در بیشترین مقدار خود انتخاب گردد.

$$WR \left(\frac{mm^3}{m} \times 10^{-3} \right) = 9.07 - 0.00850 N + 0.1462 f + 1.64 W + 0.000003 N^2 - 0.000795 f^2 - 3.54 W^2 - 0.000016 N \times f + 0.003125 N \times W - 0.0750 f \times W \quad (2)$$



شکل ۸- مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون برای نرخ سایش

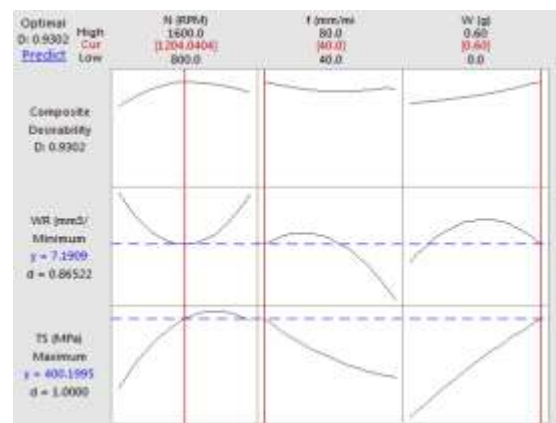


شکل ۹- اثرات پارامترهای فرآیند بر نرخ سایش

خروجی‌ها استخراج گردید. پارامترهای سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، شرایط بهینه فرآیند برای دستیابی به بالاترین استحکام و کمترین نرخ سایش مشخص شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن پودر آلومینا و اعمال فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی سبب شده تا مقاومت به سایش نمونه کامپوزیت شده بالا رفته و تغییر شکل پلاستیک در حین سایش کم شود به طوری که مد سایش از حالت چسبیده (برای ماده پایه و نمونه فرآوری شده) به حالت لغزان و ساییده شده تغییر می‌یابد. همچنین با افزودن ۰/۶ گرم پودر آلومینا و اعمال سرعت دوران ۱۲۰۴ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، می‌توان به استحکام ۴۰۰ مگاپاسکال و نرخ سایش ۷/۱۹ میلی‌متر مکعب بر دقیقه رسید.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.



شکل ۱۱- نتایج بهینه‌سازی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی برای تولید کامپوزیت آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات آلومینا استفاده شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی و نرخ سایش، روش رویه پاسخ با طرح مرکب مرکزی استفاده شده و مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی

مراجع

- [1] Malopheyev, Sergey S., Ivan S. Zuiko, Sergey Yu Mironov, and Rustam O. Kaibyshev. "Microstructural aspects of the fabrication of Al/Al₂O₃ composite by friction stir processing." *Materials* 16, no. 7 (2023): 2898.
- [2] Orłowska, Marta, Florian Pixner, Andreas Hütter, Norbert Enzinger, Lech Olejnik, and Małgorzata Lewandowska. "Manufacturing of coarse and ultrafine-grained aluminum matrix composites reinforced with Al₂O₃ nanoparticles via friction stir processing." *Journal of Manufacturing Processes* 80 (2022): 359-373.
- [3] Abbass, Muna Khethier, and NA Baheer Sharhan. "Characteristics of Al6061-SiC-Al₂O₃ surface hybrid composites fabricated by friction stir processing." *Journal of Materials and Engineering* 1, no. 4 (2023): 147-158.
- [4] Elyasi, Majid, Javad Taherian, Morteza Hosseinzadeh, Andrzej Kubit, and Hamed Aghajani Derazkola. "The effect of pin thread on material flow and mechanical properties in friction stir welding of AA6068 and pure copper." *Heliyon* 9, no. 4 (2023).
- [5] Khoram, Davood, Majid Elyasi, Hamed Aghajani Derazkola, and Mohamad Javad Mirnia. "Effects of shear bond on quality of Friction stir additive manufactured copper." *Materials Letters* 352 (2023): 135153.
- [6] Parumandla, Naresh, and Kumar Adepu. "Effect of Al₂O₃ and SiC nano reinforcements on microstructure, mechanical and wear properties of surface nanocomposites fabricated by friction stir processing." *Materials Science* 24, no. 3 (2018): 338-344.
- [7] Salah, Abdellah Nait, Sipokazi Mabuwa, Husain Mehdi, Velaphi Msomi, Mohammed Kaddami, and Prabhujit Mohapatra. "Effect of multipass FSP on Si-rich TIG welded joint of dissimilar aluminum alloys AA8011-H14 and AA5083-H321: EBSD and microstructural evolutions." *Silicon* 14, no. 15 (2022): 9925-9941.
- [8] Mehdi, Husain, and R. S. Mishra. "Consequence of reinforced SiC particles on microstructural and mechanical properties of AA6061 surface composites by multi-pass FSP." *Journal of Adhesion Science and Technology* 36, no. 12 (2022): 1279-1298.

- [9] Thangarasu, A., N. Murugan, Isaac Dinaharan, and S. J. Vijay. "Synthesis and characterization of titanium carbide particulate reinforced AA6082 aluminium alloy composites via friction stir processing." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15, no. 2 (2015): 324-334.
- [10] Devaraju, A., A. Kumar, A. Kumaraswamy, and B. Kotiveerachari. "Influence of reinforcements (SiC and Al₂O₃) and rotational speed on wear and mechanical properties of aluminum alloy 6061-T6 based surface hybrid composites produced via friction stir processing." *Materials & Design* 51 (2013): 331-341.
- [11] Chen, Chin-Fu, Po-We Kao, Liuwen Chang, and New-Jin Ho. "Mechanical properties of nanometric Al₂O₃ particulate-reinforced Al-Al₁₁Ce₃ composites produced by friction stir processing." *Materials transactions* 51, no. 5 (2010): 933-938.
- [12] Moradian, M., A. Doniavi, V. Modanloo, and V. Alimirzaloo. "Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods." *ADMT journal* (2017): 101-108.
- [13] Liu, Z. Y., B. L. Xiao, W. G. Wang, and Z. Y. Ma. "Analysis of carbon nanotube shortening and composite strengthening in carbon nanotube/aluminum composites fabricated by multi-pass friction stir processing." *Carbon* 69 (2014): 264-274.
- [14] Lu, Dehong, Yehua Jiang, and Rong Zhou. "Wear performance of nano-Al₂O₃ particles and CNTs reinforced magnesium matrix composites by friction stir processing." *Wear* 305, no. 1-2 (2013): 286-290.
- [15] Modanloo, Vahid, Mohammad Dashti Kahnouei, and Amin Safi Jahanshahi. "Statistical modeling of energy absorption of grooved aluminum tubes under axial compression loading." *Journal of Modeling in Engineering* (2025).
- [16] Modanloo, Vahid, Ahmad Mashayekhi, Yasser Taghipour Lahijani, and Behnam Akhoundi. "Prediction of large deflection of chromium nanobeams using a hybrid meta-heuristic algorithm." *Journal of Engineering Research* (2023).