



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: 2024-07-03

Revised: 2025-05-24

Accepted: 2025-06-10

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/10.22075/jme.2025.34648.2697>

© 2026 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:

V. Modanloo and E. Elyasi, "Statistical modeling of friction stir processing of Al/Al₂O₃ composite," Journal of Modeling in Engineering, 24 84 (2026): 185-195, doi: 10.22075/jme.2025.34648.2697

مدل سازی آماری فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی کامپوزیت آلومینیوم/آلومینا

وحید مدانلو^۱، مجید الیاسی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰	
واژگان کلیدی:	
کامپوزیت سطحی، فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم، پودر آلومینا.	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.
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.34648.2697	

© 2026 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

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات افزودنی به دلیل برخورداری از خواص مطلوبی مانند استحکام بالا، سبکی، مقاومت در برابر سایش و خوردگی کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا، نظامی، حمل و نقل و پزشکی دارند. روش‌های مختلفی برای ساخت این نوع کامپوزیت‌ها وجود دارد که هر یک مزایا و معایب خود را دارند. یکی از روش‌ها، فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی می باشد که بسیار پرکاربرد است [۱]. در این روش با دوران یک ابزار 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 گیره‌های 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 سرعت دوران، سرعت حرکت خطی، فشار وارده به ابزار و زاویه شیب ابزار می توان خواص کامپوزیت را کنترل کرد [۲]. خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات آلومینا به روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی بستگی زیادی به ریزساختار منطقه جوش دارد [۳]. ریزساختار منطقه جوش تحت تأثیر عوامل

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

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

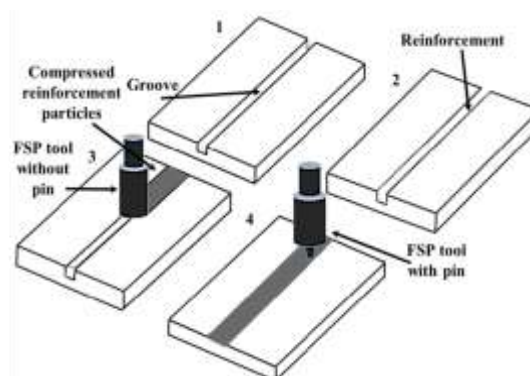
۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استناد به این مقاله:

آلومینیومی با ذرات تقویت کننده تیتانیوم کارباید (TiC) با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی پرداختند. آن‌ها با استفاده از یک فرآیند تک پاسه به بررسی اثر درصد وزنی TiC بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش سطح کامپوزیت تولید شده 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 تقویت کننده 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 تقویت کننده 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 تقویت شده 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 تولید شده 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 اصطکاکی-اغتشاشی کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تحقیق جامعی در خصوص استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به منظور 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 تولید شده با استفاده از فرآوری

مختلفی مانند نوع و مقدار ذرات تقویت کننده، پارامترهای فرآیند، نوع و شکل ابزار، نحوه توزیع ذرات در زمینه و مکانیزم‌های تقویت است [۴]. برای بررسی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های ساخته شده به روش فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، معمولاً از آزمایش‌های سختی‌سنجی، کشش، خمش، خستگی، سایش و خوردگی استفاده می‌شود [۵]. فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی یک روش مناسب برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده 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 چند پاسه 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 دانه درشت، تخلخل، ریزحفره‌ها و ترک خوردگی انجماد را از بین برده و اندازه دانه اتصال جوش داده شده کاهش می‌یابد. به علاوه، با افزایش تعداد پاس، همگن‌سازی اولیه جوش بهبود می‌یابد. مهدی و میسرا [۸] به بررسی تأثیر ذرات تقویت کننده سیلیکون کارباید (SiC) بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی چند پاسه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی عیوب جوشکاری TIG مانند ریزساختار درشت، تخلخل و ترک‌های جامد شدن را برطرف کرده و اندازه دانه‌های جوش را کاهش می‌دهد. تانگراسو و همکاران [۹] به ساخت کامپوزیت سطحی زمینه

جهت اندازه گیری نرخ سایش نمونه ها، نمونه ای به قطر ۲۵ میلی متر از منطقه فرآوری شده بریده شده و به عنوان 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 اندازه گیری و میزان نرخ سایش آن تحت آزمون سایش با نیروی وارده ۱۰ نیوتن تحت سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه اندازه گیری شد. به منظور بررسی ریزساختار، ورق های فرآوری شده در جهت عمود بر راستای فرآیند بریده، مانع و پرداخت شدند. برای بررسی اندازه ها در منطقه جوش از میکروسکوپ نوری و جهت بررسی سطح ساییده شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمایش های 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 اضافه شده 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 می باشد. پس از انجام آزمایش ها، خواص مورد نظر اندازه گیری شده و با ورق اولیه مقایسه شد. پس از انجام آزمایش های مرحله اول و مقایسه خواص مورد نظر در قبل و بعد از فرآیند، آزمایش های 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 آلومینا می باشند. سپس، هر یک از آزمایش های طراحی شده انجام و مقادیر استحکام و نرخ سایش اندازه گیری شد. آزمایش های طراحی شده مرحله دوم به روش طرح مرکب مرکزی به همراه خروجی های مورد نظر در جدول ۲ نشان داده شده است. در ادامه، نتایج حاصل با استفاده از نرم افزار مینی تب [۱۲] تحلیل شده و اثرات پارامترها مورد بررسی قرار گرفت.

اصطکاکی-اغتشاشی معمولاً بر پایه آزمون و خطا بوده که منجر به افزایش زمان و هزینه می گردد. امروزه محققان با توسعه روش های محاسباتی نظیر طراحی آزمایش و رگرسیون توانسته اند از هزینه های فرآیند به میزان قابل توجهی بکاهند. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا استفاده شده بر روی خروجی های 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 بهینه سازی همزمان استحکام کششی و نرخ سایش کامپوزیت زمینه آلومینیومی ۱۱۰۰ تقویت شده با پودر آلومینا مشخص شده است.

۲- مواد و روش ها

ورق استفاده شده در این پژوهش از جنس آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ می باشد. جهت تعیین خواص مکانیکی ماده از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 استفاده شده است. نمونه استاندارد با استفاده از دستگاه وایرکات برش داده شده و سپس با دستگاه SANTAM با ظرفیت ۳۰ تن و سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفت. جدول ۱ خواص مکانیکی ماده استفاده شده در آزمایش ها را نشان می دهد. همچنین، از آزمون سختی ویکرز برای تعیین سختی ماده استفاده شد. جهت انجام آزمون های فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی، ورق های اولیه در ابعاد $۱۵۰ \times ۱۰۰ \times ۲$ میلی متر آماده شده 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 گیربندی قطعات و همچنین موقعیت دهی صحیح از فیکسچر استفاده شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰

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

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

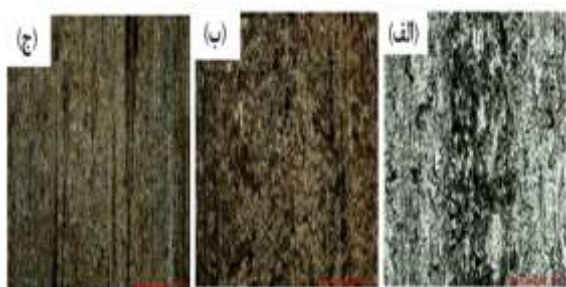
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

به منظور بررسی افزودن پودر آلومینا بر خواص مکانیکی نمونه شامل استحکام کششی و استحکام تسلیم، نمونه‌های پایه، فرآوری شده بدون افزودن آلومینا و کامپوزیت شده 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

تصاویر سطح ساییده شده نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق شکل، برای نمونه‌های پایه و فرآوری شده 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 چسبیده است که نشان‌دهنده نرخ سایش بالا (مقاومت به سایش پایین) است. البته ملاحظه می‌گردد که میزان تغییر شکل پلاستیک و سایش چسبیده در شکل (۴-ب) (نمونه فرآوری شده 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 پلاستیک شدید سطح و مد سایش چسبیده محو و به صورت الگوهای سایش لغزان و شیارهای موازی درمی‌آید که نشان‌دهنده 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.

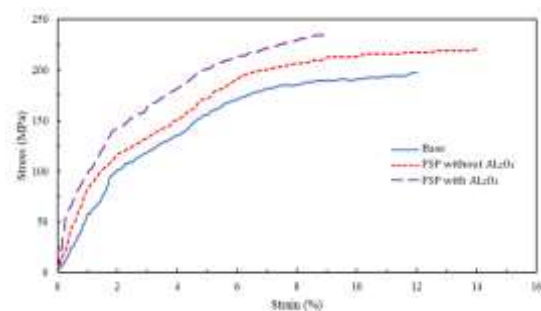


شکل ۴- تصویر سطح سایش: الف) فلز پایه ب) فرآوری شده ج) کامپوزیت شده با پودر آلومینا

۳-۲- استحکام کششی

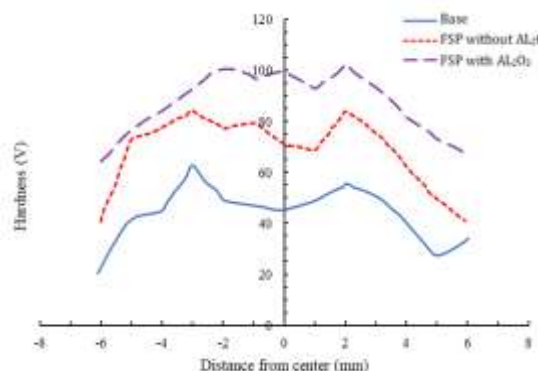
پس از انجام تحلیل واریانس، نتایج طبق جدول ۳ به دست آمد. همانطور که مشخص است، عبارت خطی معادله رگرسیون تاثیر گذاری بیش تری نسبت به عبارت‌های درجه دوم و متقابل دارد زیرا مقدار P-value آن از ۰/۰۵ کمتر

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، فرآوری شده و کامپوزیت شده با پودر آلومینا

به منظور 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 به دست آمد که در شکل (۳) نشان داده شده است. طبق شکل، با انجام فرآیند بدون افزودن آلومینا، میزان سختی افزایش یافته که دلیل آن 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 ناهنجاری‌ها 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 کامپوزیت شده با افزودن آلومینا اندازه‌گیری شده و مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۳- پروفایل سختی برای نمونه‌های مختلف: فلز پایه، فرآوری شده و کامپوزیت شده با پودر آلومینا

عمل می‌کنند افزایش می‌یابد. با افزایش دانسیته نابیجایی‌ها در حین آزمون کشش، نیروی بیشتری برای رسیدن به شکست نیاز است و این عامل بهبود استحکام را به همراه دارد. بعلاوه در 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 می‌گردد که جهت رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، باید سرعت دوران ابزار در بیشترین سطح، پیشروی در کمترین سطح و میزان پودر آلومینا اضافه‌شده 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

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

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 می‌باشد. در نتیجه می‌توان دریافت که میزان پودر اضافه‌شده دارای بیشترین تاثیر و سرعت دوران ابزار دارای کمترین تاثیر بر روی استحکام کششی می‌باشند. همچنین مقدار کفایت مدل (R^2) نیز حدود ۸۰٪ حاصل شد که مطلوب است. به‌علاوه یک مدل تجربی از استحکام کششی بر اساس متغیرهای فرآیند مطابق با رابطه (۱) به دست آمد. در شکل (۵)، مقایسه بین نتایج تجربی و مدل رگرسیون برای استحکام کششی ارائه شده است. بیشترین میزان خطا در حدود ۱۵٪ می‌باشد که قابل قبول است. شکل (۶) منحنی اثرات اصلی پارامترهای فرآیند را بر میزان استحکام کششی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت دورانی ابزار (از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه) استحکام کششی افزایش پیدا می‌کند. در فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی سرعت دوران ابزار نقش تولید حرارت را بر عهده دارد، به‌طوری‌که با افزایش سرعت دوران میزان حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک سطح بهتر صورت گرفته و جریان مواد بهبود می‌یابد. 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 می‌یابد. 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 می‌یابد، ابزار زمان کمتری را با سطح قطعه‌کار درگیر بوده و میزان حرارت تولیدی کاهش می‌یابد. در اثر این کاهش حرارت مواد به‌خوبی تغییر شکل پلاستیک نداده و این عامل سبب شده تا به‌جای عمل اغتشاشی، عمل شخم‌زنی غالب گردد که سبب بروز پلیسه در اطراف کار شده و پخش ذرات آلومینا در منطقه اغتشاشی بسیار کم می‌باشد. در چنین حالتی استحکام کاهش پیدا می‌کند (از ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور بر دقیقه). در نتیجه با افزایش میزان وزن آلومینا از صفر تا ۰/۶ گرم، میزان استحکام افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که وزن آلومینا در ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد، تعداد ذرات آن افزایش پیدا کرده و میزان ناخالصی‌هایی که به‌عنوان نابیجایی

جدول ۶، سرعت دورانی با ۰/۰۵٪ بیشترین مشارکت و سرعت پیشروی با ۰/۳۳٪ کمترین مشارکت را بر روی نرخ سایش دارند. پارامتر وزن نیز دارای میزان مشارکت ۰/۳۱٪ می باشد. مقدار کفایت مدل (R²) نیز حدود ۰/۹۶ حاصل شد که بسیار مطلوب است [۱۶].

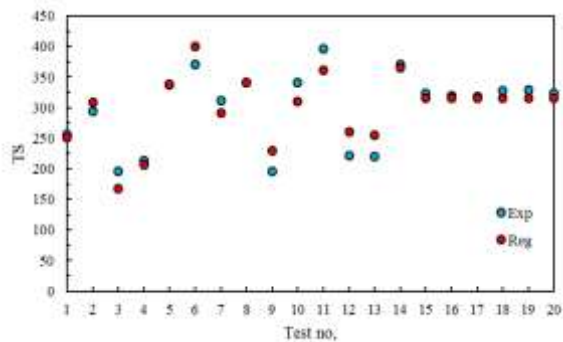
جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس برای نرخ سایش

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	-	-

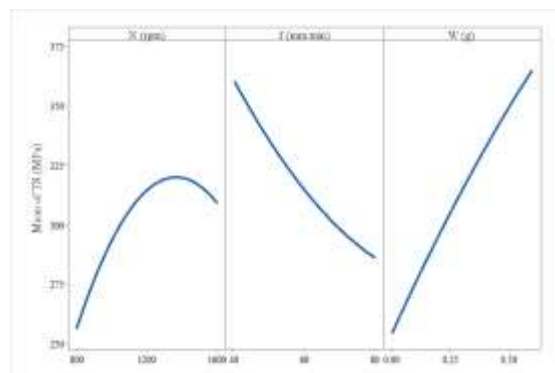
جدول ۶- مشارکت پارامترها در نرخ سایش

پارامتر	میزان مشارکت (%)
سرعت دوران ابزار	۰/۰۵
سرعت پیشروی ابزار	۰/۳۳
میزان پودر آلومینا	۰/۳۱

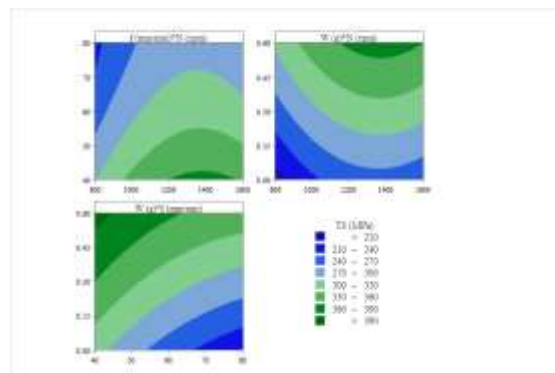
$$\begin{aligned}
 TS \text{ (MPa)} = & 85 + 0.565 N - 4.51f \\
 & + 99W - 0.000199N^2 \\
 & + 0.0216f^2 - 54W^2 \\
 & - 0.00039N \times f \\
 & + 0.009N \times W \\
 & + 1.77f \times W
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



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



شکل ۶- اثر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی

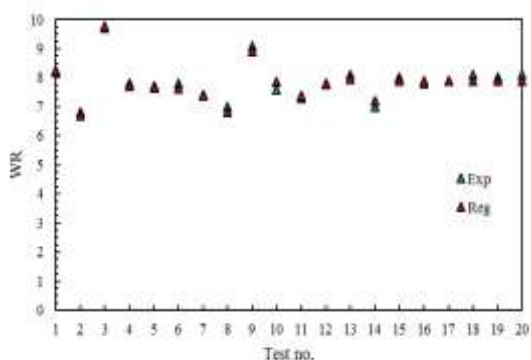


شکل ۷- نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی بر استحکام کششی

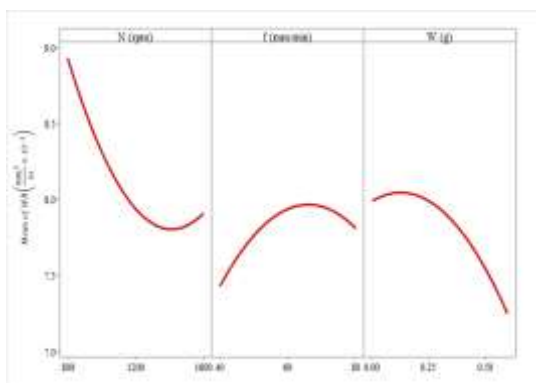
۳-۳- نرخ سایش

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

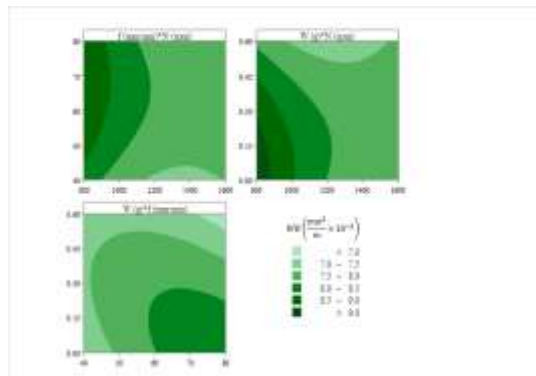
$$WR \left(\frac{mm^3}{m} \times 10^{-3} \right) = 9.07 - 0.00850 N + 0.1462f + 1.64W + 0.000003N^2 - 0.000795f^2 - 3.54W^2 - 0.000016N \times f + 0.003125N \times W - 0.0750f \times W \quad (2)$$



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



شکل ۹- اثرات پارامترهای فرآیند بر نرخ سایش



شکل ۱۰- نمودار کانتوری اثر پارامترهای ورودی بر نرخ سایش

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 خشن شده که منجر به شکل‌گیری پلیسه در اطراف این خط و عیوب متالورژیکی می‌شود. در چنین حالتی پخش ذرات آلومینا در خط اغتشاشی به خوبی صورت نگرفته و این عامل سبب می‌شود که در حین تست سایش ماده تغییرشکل 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 تغییرشکل پلاستیک سطح در حین آزمون سایش کم می‌شود. در چنین شرایطی مد 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.

۳-۴- بهینه سازی

در این پژوهش جهت بهینه کردن استحکام کششی و کمینه کردن نرخ سایش به طور 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 به عنوان رشته جواب بهینه شناخته می شوند. شکل (۱۱) مقادیر بهینه برای حالت های تک هدفه و چندهدفه را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد که با انتخاب سرعت دوران ابزار ۱۲۰۴ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی متر بر دقیقه، و میزان ۰/۶ گرم اکسید آلومینیوم می توان به طور 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 صحت سنجی 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 پیش بینی کمتر از ۱۰٪ برای هر دو خروجی (استحکام و نرخ سایش) می باشد که حاکی از دقت قابل قبول مدل تجربی و روش بهینه سازی ارائه شده می باشد.

کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده 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 مدل های رگرسیون برای پیش بینی خروجی ها استخراج گردید. پارامترهای سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و میزان پودر آلومینا به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش بهینه سازی 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 چسبنده (برای ماده پایه و نمونه فرآوری شده) به حالت لغزان و ساییده شده تغییر می یابد. همچنین با افزودن ۰/۶ گرم پودر آلومینا و اعمال سرعت دوران ۱۲۰۴ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلی متر بر دقیقه، می توان به استحکام ۴۰۰ مگاپاسکال و نرخ سایش ۷/۱۹ میلی متر مکعب بر دقیقه رسید.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانند.

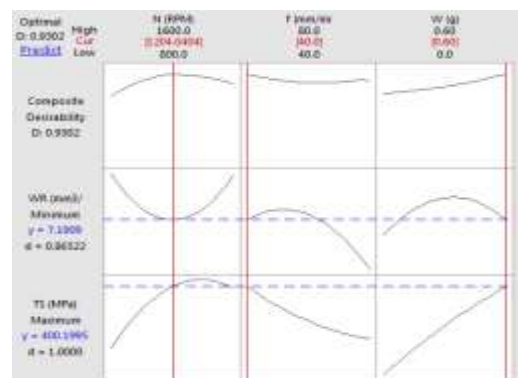
مشارکت های نویسندگان

وحید مدانلو: تحلیل نتایج و نگارش.

مجید الباسی: هدایت پروژه و گردآوری داده ها.

منابع مالی

در این تحقیق، کمک مالی خاصی از هیچ سازمانی دریافت نشده است.



شکل ۱۱- نتایج بهینه سازی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از فرآوری اصطکاکی-اغتشاشی برای تولید

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 Adep. "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 Akhondi. "Prediction of large deflection of chromium nanobeams using a hybrid meta-heuristic algorithm." *Journal of Engineering Research* (2023).