

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی بر تخلخل و استحکام کششی کامپوزیت زمینه آلومینیوم AA1050 تقویت شده با ذرات سرامیکی SiC

مقاله پژوهشی

مجتبی سلیمانی پور^۱، رضا عابدین زاده^{۲*}، سید علی افتخاری^۲، علی حیدری^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران.

abedinzadeh@iaukhsh.ac.ir*

چکیده

در این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند بر تخلخل و استحکام کششی سیم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیوم AA1050/SiC تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی صورت پذیرفت. در این راستا، نمونه‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیوم AA1050 تقویت شده با ذرات سرامیکی SiC، با استفاده از فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی تولید شدند. همچنین به منظور طراحی آزمایش، از روش سطح پاسخ استفاده شد. سرعت دورانی ابزار، نیروی اکستروژن و ذرات تقویت‌کننده به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و درصد تخلخل و استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به عنوان متغیرهای پاسخ تعیین شدند. به منظور آنالیز داده‌های حاصله از آنالیز واریانس و تحلیل رگرسیون استفاده گردید. نتایج نشان داد که سرعت دورانی، نیروی اکستروژن با تأثیرات مرتبه دوم و در صد تقویت‌کننده با تأثیرات خطی بر استحکام کششی و تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی مؤثر بودند. همچنین بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند FSE به منظور رسیدن به حداقل درصد تخلخل و حداکثر استحکام کششی نهایی به کمک روش مطلوبیت انجام گرفت. در انتها، با اجرای آزمون صحه‌گذاری، نتایج بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. با دستیابی به مقدار بیشینه تابع مطلوبیت (۰/۹۸۵۲)، شرایط بهینه متغیرهای ورودی فرآیند با سرعت دورانی برابر با ۷۸۷ rpm، نیروی اکستروژن برابر با ۱۱/۷ kN و درصد تقویت‌کننده برابر با ۳/۸۶٪ جهت دستیابی هم‌زمان به مقادیر بیشینه استحکام کششی نهایی (۱۵۵/۴ MPa) و کمینه درصد تخلخل (۰/۴۵٪) انجام پذیرفت. همچنین مقادیر حاصل از بهینه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه شده و صحت نتایج در استحکام کششی و تخلخل به ترتیب با ۲/۵۷٪ و ۶/۷۸٪ خطا مورد تأیید قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

کلید واژگان:

اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

کامپوزیت AA1050/SiC

تخلخل

استحکام کششی نهایی

بهینه‌سازی

Optimization of Effective Parameters in the Stir Friction Extrusion Process on Porosity and Tensile Strength of SiC Ceramic Particles Reinforced AA1050 Aluminum Matrix Composite

Mojtaba Soleimanipour¹, Reza Abedinzadeh^{2*}, Seyed Ali Eftekhari², Ali Heidari²

1- Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

* abedinzadeh@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Friction Stir Extrusion

AA1050/SiC Composite

Porosity

Ultimate Tensile Strength

Optimization

Abstract

This research, involved dynamic optimization of process parameters on the porosity and tensile strength of AA1050/SiC aluminum composite wires produced by friction stir extrusion (FSE) was carried out. In this regard, SiC ceramic particles reinforced AA1050 aluminum composite samples were produced using the FSE process. Also, response surface methodology (RSM) was used to design of experiment. The rotational speed of the punch, extrusion force, and reinforcement percentage weight were determined as input variables of the process. The porosity and tensile strength of the produced composite samples were determined as response variables. Analysis of variance (ANOVA) and regression analysis were used to analyze the obtained data. The results showed that rotational speed, extrusion force with second-order effects, and reinforcement percentage with linear effects were effective on the tensile strength and porosity of composite samples. Also, the optimization of FSE process parameters to reach the minimum percentage of the porosity and maximum tensile strength was performed using the desirability method. Finally, the optimization results were evaluated based on the validation test. Also, by achieving the maximum value of the desirability function (0.9852), the optimal conditions of the process input variables were a rotational speed of 787 rpm, an extrusion force of 11.7 kN, and a reinforcement percentage of 3.86% to simultaneously achieve the maximum ultimate tensile strength (155.4 MPa) and minimum porosity percentage (0.45%). Also, the values obtained from the optimization were compared with the experimental values and the accuracy of the results in tensile strength and porosity were confirmed with 2.57% and 6.78% errors, respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mojtaba Soleimanipour, Reza Abedinzadeh, Seyed Ali Eftekhari, Ali Heidari, Optimization of Effective Parameters in the Stir Friction Extrusion Process on Porosity and Tensile Strength of SiC Ceramic Particles Reinforced AA1050 Aluminum Matrix Composite, New Process in Material Engineering, 2024, 17(4), 29-42.

۱- مقدمه

روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSE) به‌عنوان یک فرآیند نوین جهت تولید سیم و لوله از براده، پودر و یا مواد حجیم معرفی شده است. اساس کار این فرآیند شبیه اکستروژن معکوس است که به‌منظور سهولت در ایجاد سیلان فلزی از حرارت حاصل از اصطکاک استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۲ (FSW) ریشه گرفته است. در مسیر گسترش این روش جوشکاری حالت جامد، فرایندهای اصطکاکی دیگری نظیر (FSP)^۳ توسعه یافته‌اند که اساس آن بهبود خواص مکانیکی در سطح فلزات می‌باشد. با استفاده از این فرآیند، خواص سطحی فلز پایه همچون سایش، مقاومت خوردگی، سختی، استحکام، انعطاف‌پذیری، عمر خستگی و قابلیت شکل‌پذیری، بهبود می‌یابد [۱].

از این روش‌ها در کاربردهایی مانند بهبود خواص مکانیکی [۲]، عملیات حرارتی [۳]، ساخت کامپوزیت‌های سطحی [۳-۴]، حذف عیوب موجود در ریزساختار آلیاژها [۵]، آلیاژسازی مکانیکی [۴ و ۶] و همگن کردن ساختار نانو کامپوزیت‌ها استفاده شده است [۷-۸]. فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی فرایندی نوین جهت بازیافت مواد فلزی است که توانایی تولید مواد نانو مهندسی با خواص مکانیکی مطلوب را دارد. نوآوری این روش استفاده از حرارت اصطکاک به‌منظور تغییر شکل پلاستیک شدید و سیلان مواد و آلیاژسازی مکانیکی و در نهایت تبدیل پودر و براده به قطعات قابل استفاده است. از سوی دیگر، کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیم، گروه جدیدی از مواد هستند که در مقایسه با آلیاژ آلومینیم از خواص مطلوبی همچون: مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی، سفتی و سختی بالاتر برخوردار هستند.

در این گروه از کامپوزیت‌ها، افزودن مواد پرکننده به‌ویژه ذرات تقویت‌کننده سرامیکی موجب بهبود مقاومت سایشی و فرسایشی آلیاژ آلومینیم می‌شود. یوواراج و آراویندان^۴ [۹] میکروساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی را بر روی AI5083/B4C مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که

افزایش تعداد پاس فرآیند FSP موجب توزیع بهتر ذرات و افزایش سختی و استحکام ماده می‌شود. کورت و همکاران^۵ [۱۰] نشان دادند که افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی ابزار منتج به توزیع یکنواختی از ذرات سیلیکون کاربید در کامپوزیت سطحی آلومینیوم ۱۰۵۰ می‌شود. احمدی فرد و همکاران [۱۱] کامپوزیت سطحی زمینه فلزی AI5083/SiC را با استفاده از فرآیند FSP تولید کردند. آنها دریافتند که میکرو سختی و استحکام کششی نمونه کامپوزیتی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. لی و همکاران^۶ [۱۲] جهت بررسی کرنش عرضی و طولی در فرآیند اکستروژن اصطکاکی، از آلیاژ AI2195 به‌عنوان نشانگر در زمینه AI6061 استفاده کردند. بحق و همکاران^۷ [۱۳] از فرآیند اکستروژن اصطکاکی جهت تولید سیم از براده‌های آلیاژ AI7277 استفاده کردند. بافاری و همکاران^۸ [۱۴] به بررسی فرآیند FSE برای تولید کامپوزیت AI2024/SiC پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر بالای ذرات تقویت‌کننده موجب بروز ترک و کاهش خواص مکانیکی گردید. پاندارا جان و ماریموتو^۹ [۱۵] بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را با در نظر گرفتن چهار متغیر مؤثر و دو تابع هدف انجام دادند. بهینه‌سازی با استفاده از رویکرد تابع مطلوبیت و بررسی متغیرهای مؤثرتر در فرآیند انجام گرفته است. جانگرا و همکاران^{۱۰} [۱۶] چهار متغیر مؤثر بر استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم بررسی نمودند. ورما و همکاران^{۱۱} [۱۷] با بررسی چهار متغیر مؤثر، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم، با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک ترکیبی بهینه‌سازی کردند. کویلراج و همکاران^{۱۲} [۱۸] استحکام کششی و سختی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم غیرهمجنس AI2219 و AI5083 را بررسی کردند.

در این پژوهش نیز به بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس پرداخته شد.

با توجه به تحقیقات انجام شده، مطالعات کمی در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند FSE در تولید نمونه‌های کامپوزیتی صورت گرفته است. به همین منظور در این مطالعه، نمونه‌ها به روش FSE تولید شد و همچنین طراحی آزمون به روش سطح پاسخ^{۱۳} (RSM) انجام شد و نتایج حاصله با استفاده از روش آنالیز واریانس^{۱۴} (ANOVA) مورد تحلیل گرفت. به منظور بررسی صحت نتایج، مدل رگرسیون تعیین شده و مقادیر معنی‌دار P برای هر یک از نتایج خروجی مورد بحث قرار گرفت. سپس اثر بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند FSE با هدف کاهش میزان تخلخل و افزایش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیکون کاربید (AA1050/SiC) انجام پذیرفت در نهایت با بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند (روش مطلوبیت)، مقادیر مناسب پارامترهای ورودی تعیین گردید و صحت‌گذاری با نتایج تجربی انجام پذیرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

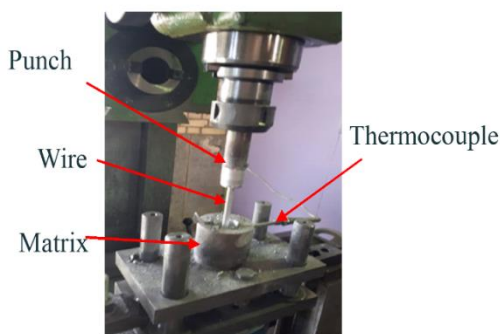
در جدول ۱ مشخصات شیمیایی پودرهای آلومینیوم ۱۰۵۰ و سیلیکون کاربید آورده شده است. اندازه دانه پودرهای آلومینیوم و سیلیکون کاربید به ترتیب برابر با ۱۰ و ۵ میکرون می‌باشد. نتایج آزمایش XRD توسط برنامه Xpert highscore plus مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج آزمون XRD پودر آلومینیوم در شکل ۱- الف با الگوی استاندارد آلومینیوم خالص با شماره pdf No 00-004-0787 مطابقت دارد. همچنین استاندارد شماره Ref.Code 01-089-2226 صحت آزمون XRD در مورد سیلیکون کاربید را تأیید می‌نماید (شکل ۱-ب).

غفارپور و همکاران [۱۹] تأثیر متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم Al5083 و Al6061 بررسی کردند. آنها با استفاده از روش طراحی آزمایش متدولوژی سطح پاسخ به بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر فرآیند جوشکاری و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از آزمون تجربی پرداختند. سخایی و همکاران [۲۰] اثر ۳ متغیر سرعت دورانی، عمق نفوذ ابزار و سرعت پیشروی ابزار را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی AI7075، جهت دستیابی به بیشترین نیروی شکست و مطالعه حالت شکست در اتصالات، با استفاده از روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی سطح پاسخ بررسی کرد. جمالی و همکاران [۲۱-۲۲] جهت بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. آنها در تحقیقی دیگر به تولید سیم کامپوزیتی AA6063/SiC در فرآیند معکوس اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. بهزادی نژاد و همکاران [۲۳] قطعات آلیاژی AM60 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی را تحت تأثیر تعداد پاس اختلاط و حضور نانو ذرات آلومینا بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت دورانی موجب افزایش دما و افزایش کرنش و در نتیجه موجب تبلور مجدد و ریزدانه شدن ساختار شده و افزایش بیشتر دما ناشی از افزایش بیشتر سرعت دورانی باعث رشد دانه می‌شود. کفایی و همکاران [۲۴] در تحقیقی اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلز آلومینیوم را با استفاده از لایه واسط و بدون لایه واسط مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از آلومینیوم ۵۵۵۶ و ۲۰۲۴ به عنوان لایه واسط باعث بهبود خواص مکانیکی ناحیه اتصال گردیده است.

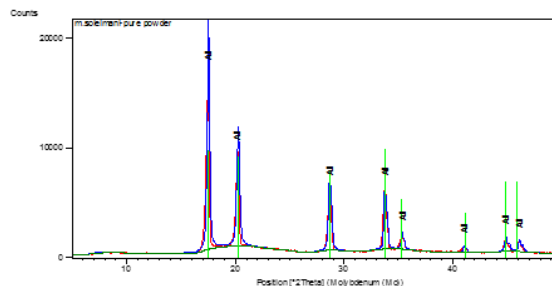
جدول (۱): ترکیب شیمیایی AA1050 و SiC مورد استفاده در تحقیق (AA1050).

عناصر	آلومینیوم	سیلیس	آهن	مس	منگنز	منیزیم	کرم
درصد وزنی	۹۹/۸۱	۰/۰۴۵۸	۰/۰۰۴۶	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳	۰/۱۰۸
(SiC)							
عناصر	SiC	Free C	Free SiO2	Total Fe	Total Al		
درصد وزنی	۹۸/۶	۰/۷۹	۰/۴۴	۰/۰۱۸	۰/۰۸		

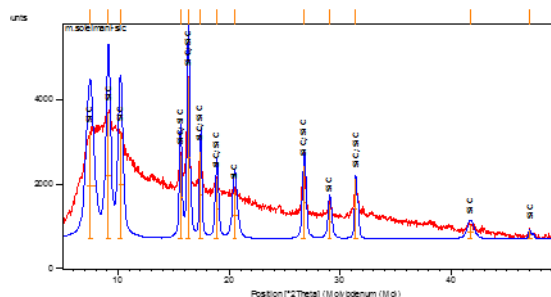
که به یونیت هیدرولیک متصل است استفاده شد. همچنین برای کنترل حرکت پیشروی ماتریس به سمت سنبه از یک ساعت اندازه‌گیری استفاده گردید که می‌توان از این طریق با توجه به تفاوت مساحت مقطع بیلت ورودی و سیم خروجی، طول سیم تولید شده را محاسبه کرد. جهت اندازه‌گیری دمای فرایند از یک ترموکوپل نوع K و یک صفحه نمایشگر دیجیتال استفاده شد.



شکل (۲): نمایی از تجهیزات مورد استفاده در فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی.



(الف)



(ب)

شکل (۱): XRD از: (الف) پودر آلومینیوم ۱۰۵۰ و (ب) پودر سیلیکون کاربرد.

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- انتخاب عوامل آزمایش و متغیرهای پاسخ
با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه فرآیندهای FSP و FSE، سه متغیر: سرعت دورانی ابزار^{۱۵} (RS)، نیروی اکستروژن^{۱۶} (EF) و درصد وزنی تقویت‌کننده^{۱۷} (RF%wt) به‌عنوان متغیرهای ورودی آزمایش انتخاب شدند و هر یک از آنها در سه سطح پایین (-۱)، میانه (۰) و بالا (+۱) مورد بررسی قرار گرفتند. دامنه تغییر هر یک از این عوامل بر اساس آزمون‌های اولیه که منتج به تولید سالم نمونه کامپوزیتی شد، تعیین گردید. جدول ۲ سطح‌بندی پارامترها را نشان می‌دهد. همچنین، تخلخل و استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه‌های کامپوزیتی به‌عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند.

جدول (۲): پارامترهای فرآیند و سطح‌بندی آنها برای طراحی آزمایش

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰
۲	نیروی اکستروژن (کیلو نیوتن)	۵/۵	۱۰/۵	۱۵/۵
۳	درصد وزنی تقویت‌کننده (%)	۱	۳	۵

از یک ماشین فرز (ماشین‌سازی تبریز مدل fp4mk) با حداکثر ۲۵۰۰ rpm و توان موتور ۴/۴ kW به‌منظور انجام فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی استفاده گردید. قالب مورد استفاده شامل دو قسمت اصلی سنبه و ماتریس می‌باشد که موقعیت آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به طرح آزمایش، طول و قطر سنبه به ترتیب ۱۲۰ و ۲۳/۷ میلی‌متر و قطر روزنه ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای سهولت خروج سیم از سنبه، ۱۱۵ میلی‌متر از سوراخ سنبه تا قطر ۸ میلی‌متر بزرگ‌تر شد. ماتریس با قطر داخلی ۲۴ میلی‌متر و قطر خارجی ۴۴ میلی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۵۸ و ۴۵ میلی‌متر ساخته شد و روی کفشک فوقانی قالب نصب گردید. جنس سنبه و ماتریس از جنس فولاد گرم‌کار H۱۳ می‌باشد که تحت عملیات حرارتی سختکاری قرار گرفت. سنبه از طریق کلت و فشنگی روی محور اصلی ماشین فرز سوار شد و ماتریس با نصب بر روی کفشک متحرک قالب از طریق ۴ عدد میله راهنما و کفشک ثابت پایینی بر روی میز ماشین نصب شد. برای تأمین نیروی اکستروژن ثابت از یک جک هیدرولیکی

۲-۲-۲- طراحی آزمایش و آنالیز داده‌ها

در این پژوهش از روش سطح پاسخ (RSM) بر مبنای طراحی سه سطحی Box Behnken جهت ارزیابی اثر متغیرهای مستقل بر عملکرد پاسخ و همچنین پیشگویی بهترین مقدار پاسخ استفاده شد [۲۵-۲۶]. مجموع کل آزمایش‌ها در این روش برابر با ۱۵ آزمایش است. مدل مورد استفاده در RSM عموماً رابطه درجه دوم است. از داده‌های روش Box Behnken جهت تعیین تناسب معادلات رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم استفاده شد. در اکثر مسائل مربوط به روش RSM، 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 تقریب کننده به صورت مدل مرتبه دوم استفاده گشت که به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \beta_0 j_{iki} \quad (1)$$

در تابع فوق، β_0 مقدار ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر، k تعداد متغیرهای مستقل و ϵ مقدار خطای مشاهده شده در پاسخ است. نرم‌افزار مورد استفاده به منظور طراحی آزمایش و تحلیل آماری، Minitab 18 است. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش نیز با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) انجام گردید. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان متغیرهای پاسخ و پارامترهای مؤثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون به کار گرفته شد.

۲-۲-۳- اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ

برای محاسبه چگالی واقعی نمونه‌ها (ρ_a) از دستگاه چگالی متر و بر اساس روش ارشمیدس (استاندارد ISO2738) استفاده گردید (رابطه (۲)):

$$\rho_a = \frac{W_a \rho_l}{W_a - W_w} \quad (2)$$

که در آن، W_a وزن نمونه در هوا، W_w وزن نمونه در آب و ρ_l چگالی آب می‌باشد. برای محاسبه چگالی تئوری از قانون مخلوط‌ها (استاندارد ASTM D1556) استفاده شد. برای تعیین میزان تخلخل در نمونه‌های سیم اکستروژن شده از رابطه (۳) استفاده گردید:

$$p\% = \frac{\rho_{th} - \rho_r}{\rho_{th}} * 100 \quad (3)$$

که در آن، p مقدار تخلخل، ρ_r چگالی واقعی و ρ_{th} چگالی تئوری نمونه است. همچنین برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی (SEM) استفاده گردید. برای میکروسکوپ SEM، فاصله کاری برابر با ۱۰ میلی‌متر و نوع دکتور، الکترون ثانویه (SE) در نظر گرفته شد. در این راستا، ابتدا سیم‌های تولید شده در یک مقطع یکسان و در جهت عمود بر جهت اکستروژن برش خورده و سپس مانع سرد شدند. نمونه‌ها با کاغذ سنباده‌های ۸۰ تا ۳۰۰۰ تحت عملیات سنباده‌زنی قرار گرفتند و پس از آن با استفاده از پارچه و خمیر الماس یک میکرون، صیقل کاری شدند.

به منظور وضوح تصاویر، آشکارسازی نمونه‌ها با استفاده از محلول حکاکی پولاتن اصلاح شده به مدت ۱۲۰ ثانیه در دمای اتاق انجام شد. اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM E8 انجام شد. نمونه‌های کشش در راستای عمود بر مسیر اجرای فرآیند FSE، با استفاده از وایرکات آماده شدند. قطر دنباله و طول کل هر یک از نمونه‌های کشش به ترتیب برابر با ۷ و ۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس، هر یک از آنها با استفاده از دستگاه کشش Hounsfield و با نرخ پیشروی ۲ mm/min در دمای اتاق تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

۲-۲-۴- بهینه‌سازی

در این تحقیق، به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ورودی فرآیند FSE از روش مطلوبیت استفاده گردید [۲۷]. هدف تابع مطلوبیت، بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شد؛ بنابراین، مطلوبیت به صورت رابطه (۴) تعریف شد:

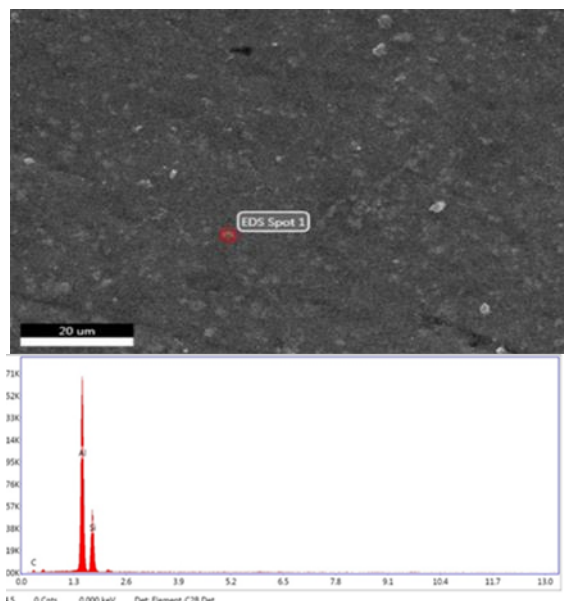
(۴)

$$di(y_i) = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ di(y_i) & \left(y_i - \frac{L_i}{U_i} - L_i \right)^2 \quad L_i \leq y_i \leq U_i \\ 1 & y_i > U_i \end{cases}$$

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 گردید و در نتیجه، تابع مطلوبیت در مود خطی تعریف شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۳ تصویر SEM به همراه آنالیز عنصری از نمونه کامپوزیت AA1050/SiC تولید شده به روش FSE را در kN $EF=15/5$ ، $RS=750$ rpm و $RF=5$ wt % نشان می‌دهد. حضور ذرات آلومینیوم و سیلیکون کاربرد در شکل مشاهده می‌شود.



شکل (۳): تصویر SEM به همراه آنالیز عنصری از نمونه کامپوزیت AA1050/SiC تولید شده به روش FSE.

جدول ۳ نتایج حاصله برای تخلخل و استحکام کششی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی را بر اساس طراحی آزمایش RSM نشان می‌دهد.

جدول (۳): خروجی‌های تخلخل و استحکام کششی نهایی مطابق با طراحی آزمایش

شماره آزمایش	سرعت دورانی (دور در دقیقه)	نیروی اکستروژن (کیلو نیوتن)	مقدار وزنی تقویت کننده (%)	استحکام کششی (MPa)	تخلخل (%)
۱	۷۵۰	۵/۵	۱	۱۲۵	۱/۲۷
۲	۷۵۰	۵/۵	۵	۱۳۳	۱/۲۳
۳	۷۵۰	۱۵/۵	۱	۱۳۶	۰/۸۹
۴	۷۵۰	۱۵/۵	۵	۱۴۳	۰/۸۰
۵	۵۰۰	۱۰/۵	۱	۱۰۳	۲/۲۰
۶	۵۰۰	۱۰/۵	۵	۱۱۸	۱/۹۲
۷	۱۰۰۰	۱۰/۵	۱	۱۱۲	۱/۶۷
۸	۱۰۰۰	۱۰/۵	۵	۱۲۷	۱/۵۸
۹	۵۰۰	۵/۵	۳	۱۰۹	۲/۱۰
۱۰	۵۰۰	۱۵/۵	۳	۸۵	۲/۷۲
۱۱	۱۰۰۰	۵/۵	۳	۹۶	۲/۳۹
۱۲	۱۰۰۰	۱۵/۵	۳	۱۳۶	۱/۳۵
۱۳	۷۵۰	۱۰/۵	۳	۱۴۸	۰/۵۷
۱۴	۷۵۰	۱۰/۵	۳	۱۵۷	۰/۴۸
۱۵	۷۵۰	۱۰/۵	۳	۱۵۳	۰/۴۴

تعیین مدل رگرسیونی ارائه شده برای تخلخل و استحکام کششی به ترتیب $98/63\%$ و $96/16\%$ است. ضریب تعیین، کیفیت برازش داده‌ها را با مدل مشخص می‌کند که هر چه

جداول ۴ و ۵ نیز نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون را به ترتیب برای تخلخل و استحکام کششی نهایی نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که میزان ضریب

مقدار آن به عدد ۱۰۰ نزدیک تر باشد، قدرت مدل برازش یافته بیشتر می باشد [۲۷]. لازم به ذکر است که حذف پارامترها بر اساس نمودار اثرات بهینه باعث کاهش در مقدار ضریب تعیین مدل شده است. میزان سطح ریسک α در فرآیند تحلیل، مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. با احتساب $\alpha = 0/05$ و بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، پارامتر سرعت دورانی (عبارت مرتبه دوم RS) مجذور نیروی اکستروژن (EF) و مجذور مقدار تقویت کننده (RF) به عنوان عبارات مؤثر بر تخلخل و استحکام کاشی نهایی نمونه‌های کامپوزیتی شناخته شدند.

برای بررسی صحت مدل رگرسیون، از آزمون عدم برازش استفاده گردید؛ بنابراین با تأیید عدم معنی داری آزمون عدم

برازش ($P \text{ Lack of fit} > 0.05$) می توان در یافت که مدل به خوبی می تواند بر داده های مورد بررسی، برازش شود. همان طور که در جداول مشاهده می شود، آزمون عدم برازش برای متغیرهای پاسخ، معنی دار نیست و در نتیجه مدل ارائه شده به خوبی روند داده ها را نشان می دهد. از سوی دیگر، بهترین تحلیل زمانی صورت می گیرد که هم زمان رگرسیون، مؤثر و عدم برازش، غیر مؤثر باشد [۲۷]. از این رو، با توجه به مقادیر P مندرج در جداول فوق الذکر ملاحظه می شود که عبارت رگرسیون، مؤثر و عبارت عدم برازش، غیر مؤثر است. از این رو، توانایی مدل برازش یافته در توصیف و پیش بینی تغییرات متغیرهای پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی، مورد تأیید قرار می گیرد.

جدول (۴): نتایج آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای تخلخل.

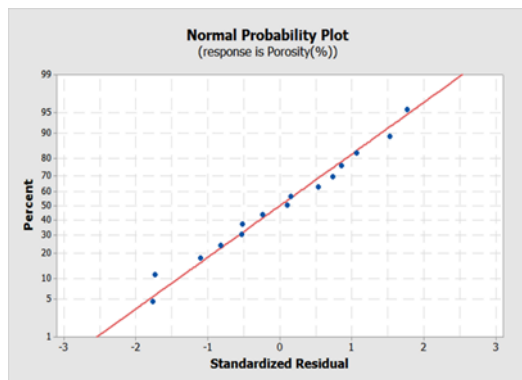
مقدار P-	مقدار F-	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	
۰/۰۰	۱۴۴/۸۷	۱/۰۳۹	۷/۲۸	۷	مدل رگرسیون
۰/۰۰	۳۲/۳۱	۰/۲۳۲	۰/۶۹۶	۳	خطی
۰/۰۰	۶۶/۲۲	۰/۴۷۵	۰/۴۷۵	۱	سرعت دورانی ابزار (RS)
۰/۰۰۱	۲۶/۳۵	۰/۱۸۹	۰/۱۸۹	۱	نیروی اکستروژن (EF)
۰/۰۷۵	۴/۳۵	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱۲	۱	درصد وزنی تقویت کننده (RF)
۰/۰۰	۲۷۳/۷۲	۱/۹۶۴	۵/۸۹۴	۳	درجه ۲
۰/۰۰	۲۶۴/۶۴	۵/۴۸۸	۵/۴۸۸	۱	(RS) ²
۰/۰۰	۹۲/۵۶	۰/۶۶۴	۰/۶۶۴	۱	(EF) ²
۰/۰۲۴	۸/۲۵	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۱	(RF) ²
۰/۰۰	۹۵/۹۸	۰/۶۸۸	۰/۶۸۸	۱	اثر متقابل
۰/۰۰	۹۵/۹۸	۰/۶۸۸	۰/۶۸۸	۱	(RS)*(EF)
۰/۰۰		۰/۰۰۷	۰/۰۵۰	۷	خطا
۰/۳۸۵	۱/۸۷	۰/۰۰۸	۰/۰۴۱	۵	عدم برازش
		۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۲	خطای خالص
			۷/۳۳۸	۱۴	مجموع

جدول (۵): نتایج آنالیز واریانس مدل اصلاح شده رگرسیون برای استحکام کششی نهایی.

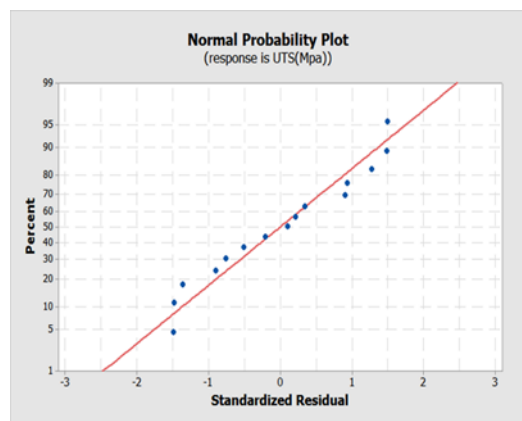
منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار-F	مقدار-P
مدل رگرسیون	۷	۶۳۴۵/۴۳	۸۹۲/۲۰	۵۱/۱۲	۰/۰۰۰
خطی	۳	۸۱۶/۲۵	۲۷۲/۰۸	۱۵/۵۹	۰/۰۰۲
سرعت دورانی ابزار (RS)	۱	۳۹۲	۳۹۲/۰۰	۲۲/۴۶	۰/۰۰۲
نیروی اکستروژن (EF)	۱	۱۷۱/۱۲	۱۷۱/۱۲	۹/۸۱	۰/۰۱۷
درصد وزنی تقویت کننده (RF)	۱	۲۵۳/۱۲	۲۵۳/۱۲	۱۴/۵۰	۰/۰۰۷
درجه ۲	۳	۴۴۰۵/۱۸	۱۴۶۸/۳۹	۸۴/۱۴	۰/۰۰۰
(RS) ²	۱	۳۹۵۰/۱۶	۳۹۵۰/۱۶	۲۲۶/۳۴	۰/۰۰۰
(EF) ²	۱	۶۶۸/۷۸	۶۶۸/۷۸	۳۸/۳۲	۰/۰۰۰
(RF) ²	۱	۹۰/۷۸	۹۰/۷۸	۵/۲۰	۰/۰۵۷
اثر متقابل	۱	۱۰۲۴	۱۰۲۴/۰۰	۵۸/۶۷	۰/۰۰۰
(RS)*(EF)	۱	۱۰۲۴/۰۰	۱۰۲۴/۰۰	۵۸/۶۷	۰/۰۰۰
خطا	۷	۱۲۲/۱۷	۱۷/۴۵		۰/۰۰۰
عدم برازش	۵	۸۱/۵۰	۱۶/۳۰	۰/۸۰	۰/۶۳۶
خطای خالص	۲	۴۰/۶۷	۲۰/۳۳		
مجموع	۱۴	۶۳۶۷/۶۰			

پیروی می کنند و هیچ گونه شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن، عدم تقارن و نقاط دورافتاده کمی وجود ندارد.

روابط ۵ و ۶ به ترتیب معادلات رگرسیون تخلخل و استحکام کششی نهایی نمونه های کامپوزیتی را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کد گذاری شده، ارائه می کنند:



(الف)



(ب)

شکل (۴): نمودار نرمال درصد خطاهای ایجاد شده برای پاسخ: (الف) تخلخل و (ب) استحکام کششی نهایی.

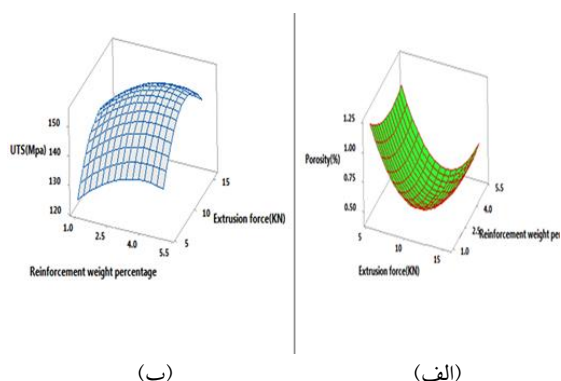
(۵)

$$\begin{aligned} \text{Porosity}(\%) &= 12.158 - 0.02675 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &- 0.1381 \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &- 0.2212 \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &+ 0.000020 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &* \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &+ 0.01697 \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &* \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &+ 0.0317 \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &* \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &- 0.000332 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &* \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \end{aligned}$$

(۶)

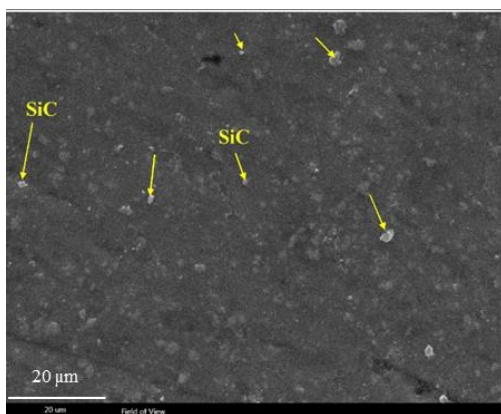
$$\begin{aligned} \text{UTS (MPa)} &= -150.6 + 0.6786 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &+ 2.63 \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &+ 10.25 \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &0.000523 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) * \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &- 0.5383 \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &* \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \\ &- 1.240 \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &* \text{ Reinforcement weight percentage} \\ &+ 0.01280 \text{ Rotational speed}(\text{rpm}) \\ &* \text{ Extrusion force}(\text{kN}) \end{aligned}$$

همچنین، برای آزمودن صحت توزیع نرمال مانده ها از نمودار احتمال نرمال استفاده گردید. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، مانده ها در هر دو نمودار، عموماً از یک خط راست



شکل (۵): تأثیر پارامترهای ورودی در سرعت دورانی (۷۵۰ rpm) بر: (الف) تخلخل و (ب) استحکام کششی نهایی.

در صورتی که سرعت دورانی ابزار در سطح میانه (۷۵۰ rpm) تنظیم شود، افزایش نیروی اکستروژن از ۱۰/۵kN به ۱۵/۵kN همراه با افزایش درصد وزنی تقویت کننده به ۵wt% و توزیع ناهمگن ذرات تقویت کننده باعث افزایش تخلخل و کاهش استحکام گردید (شکل ۶-الف و ب). همچنین تنظیم مقادیر سرعت دورانی و نیروی اکستروژن به ترتیب در مقادیر rpm ۷۵۰ و ۱۰/۵kN منتج به دستیابی حداقل تخلخل در نمونه کامپوزیتی گردید (شکل ۶-ج). توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه فلزی موجب تجمع نابجایی‌ها در همسایگی ذرات می‌شود که منجر به افزایش چگالی نابجایی‌ها در زمینه فلزی و فصل مشترک "زمینه - پودر" خواهد شد. از این رو، استحکام کششی نمونه کامپوزیتی بهبود می‌یابد [۳۰].



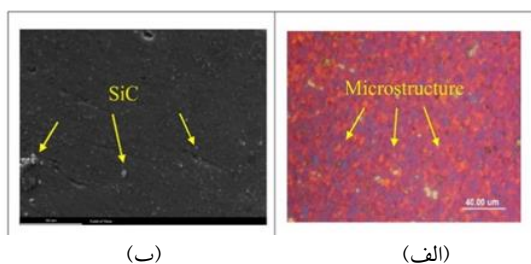
(الف)

با توجه به استخراج معادلات رگرسیون برای استحکام کششی نهایی و درصد تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی، می‌توان مقادیر متغیرهای پاسخ را پیش از اجرای فرآیند و برحسب متغیرهای ورودی، پیش‌بینی نمود. از این رو، امکان انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی فرآیند برای دستیابی به حداکثر پارامترهای پاسخ وجود دارد. چگونگی تغییرات متغیر پاسخ برحسب متغیرهای ورودی را می‌توان به صورت نمودارهای سه بُعدی منحنی سطح پاسخ نشان داد. در این نمودارها 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 شده‌اند. ارتباط استحکام کششی نهایی با دو پارامتر نیروی اکستروژن و درصد تقویت کننده در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در این وضعیت، در صورتی که سرعت دورانی ثابت در نظر گرفته شود، افزایش هم‌زمان نیروی اکستروژن و مقدار تقویت کننده به سطح میانی موجب افزایش استحکام کششی نمونه کامپوزیتی می‌شود. می‌توان گفت مقدار حرارت تولید شده در طول فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$dQ = \omega \cdot R \cdot \tau_{contact} \cdot dA \quad (7)$$

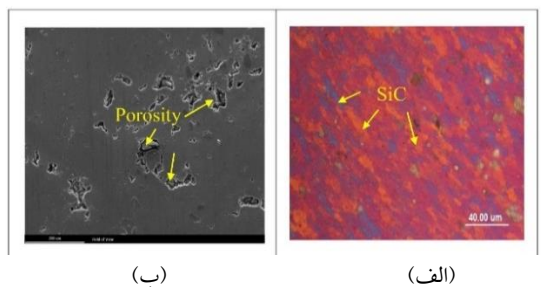
در این رابطه ω سرعت دورانی ابزار، سرعت زاویه‌ای است، R شعاع تماس، $\tau_{contact}$ تنش برشی در سطح تماس است و dA وابسته به سطح تماس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص حرارتی مستقیماً با سرعت دورانی ابزار متناسب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص حرارتی مستقیماً با سرعت دورانی ابزار متناسب است؛ بنابراین، در صورتی که سرعت دورانی ابزار در مقدار معینی تثبیت شود، افزایش نیرو منتج به افزایش نرخ پیشروی ابزار و تقلیل شاخص حرارتی خواهد شد و این امر موجب کاهش نرخ انحلال رسوبات تقویت کننده شده [۲۸] و خواص کششی نمونه بهبود می‌یابد [۲۹]. از سوی دیگر، ارتباط تخلخل با دو پارامتر نیروی اکستروژن و درصد تقویت کننده در شکل ۵-ب نشان داده شده است.

در فلز پایه اتفاق می‌افتد (شکل ۸). این نتایج با تحقیق کورت و همکاران [۱۰] تطابق خوبی دارد.



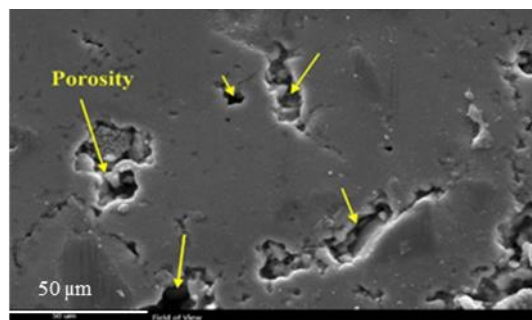
شکل (۸): تصاویر SEM و OM نمونه سیم کامپوزیتی در $RS=750$ rpm و $EF=10.5$ kN و $RF=3\%$ wt (الف) توزیع ذرات و (ب) تخلخل.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، افزایش سرعت دورانی از 750 rpm به 1000 rpm و افزایش درصد تقویت‌کننده به 5% wt افزایش تخلخل و کاهش استحکام کششی اتفاق افتاد. در این وضعیت، افزایش سرعت دورانی موجب افزایش بیش از حد حرارت اصطکاکی و دمای منطقه اغتشاشی شده و منجر به رشد دانه‌ها گردید. همچنین افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده متأثر از سایر پارامترها منجر به ایجاد ترک و افزایش تخلخل و کاهش استحکام گردید. اثر افزایش ذرات تقویت‌کننده با نتایج تحقیق بافاری و همکاران [۱۴] مقایسه و مورد تأیید قرار گرفت.

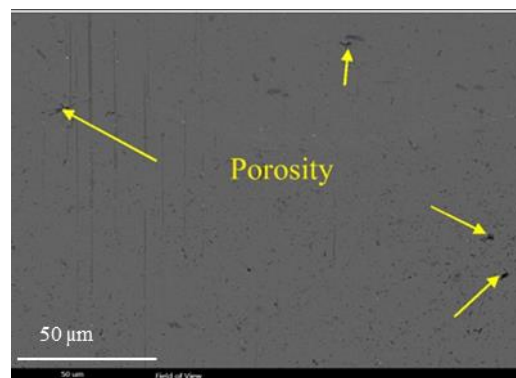


شکل (۹): تصاویر SEM و OM نمونه سیم کامپوزیتی 1000 rpm، 10 kN، $RS=10/5$ و $EF=5\%$ wt (الف) توزیع ذرات و (ب) تخلخل.

مطابق با شکل ۱۰ در صورتی که درصد تقویت‌کننده در سطح میانه (3% wt) تنظیم شود، افزایش سرعت دورانی از 500 rpm به 750 rpm و افزایش نیروی اکستروژن به $10/5$ kN باعث کاهش تخلخل و افزایش استحکام می‌گردد.



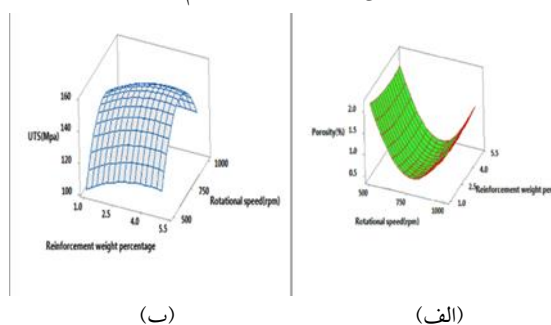
(ب)



(ج)

شکل (۶): (الف) و (ب): تصویر SEM از توزیع ذرات و تخلخل نمونه سیم کامپوزیتی در $RS=750$ rpm و $EF=15.5$ kN و (ج) تصویر SEM نمونه سیم کامپوزیتی در $RS=750$ rpm و $EF=10.5$ kN.

مطابق با شکل ۷ در صورتی که نیروی اکستروژن در سطح میانه ($10/5$ kN) تنظیم شود، افزایش سرعت دورانی از 500 rpm به 750 rpm و افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده به 5% wt باعث کاهش تخلخل و افزایش استحکام می‌شود.



(ب)

(الف)

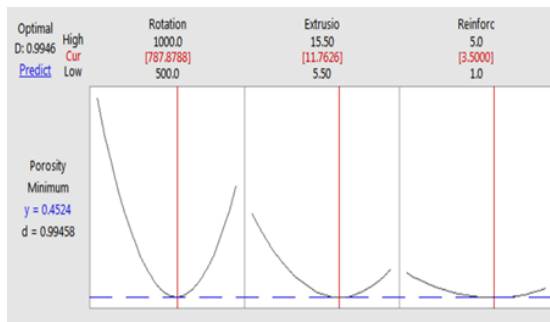
شکل (۷): تأثیر پارامترهای ورودی در نیروی اکستروژن سطح میانه ($10/5$ kN) بر: (الف) تخلخل و (ب) استحکام کششی نهایی.

در این شرایط، افزایش سرعت دورانی به 750 rpm موجب افزایش حرارت ورودی، نرم شدن ماده و افزایش نرخ سیلان آن می‌شود که در پی آن، توزیع بهتری از ذرات تقویت‌کننده

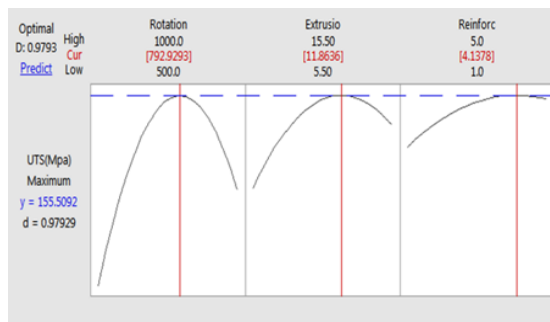
جدول (۶): مقادیر پارامترهای ورودی بهینه برای حداقل مقدار تخلخل، استحکام کششی نهایی.

مقادیر پارامترهای ورودی	مقادیر بهینه (تخلخل)	مقادیر بهینه (استحکام)	مقادیر ترکیب بهینه
سرعت دورانی (rpm)	۷۸۷	۷۹۲	۷۸۷
نیروی اکستروژن (kN)	۱۱/۷	۱۱/۸	۱۱/۷
تقویت کننده (wt%)	۳/۵	۴/۱	۳/۸

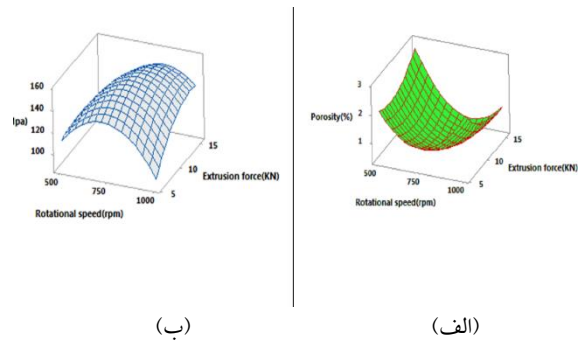
در این حالت مطابق با شکل ۱۲-الف و ب، مقادیر کمترین تخلخل ۰/۴۵٪ و بیشترین استحکام کششی (۱۵۵/۵۱MPa) به ترتیب با مقادیر تابع مطلوبیت (d=۰/۹۹۴۶) و (d=۰/۹۷۹۳) به دست آمد. همچنین مقادیر مرکب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند در بالاترین مقدار تابع مطلوبیت (D=۰/۹۸۸۵) در شکل ۱۲-ج آمده است.



(الف)

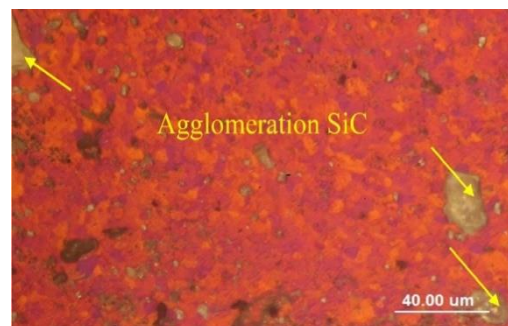


(ب)



شکل (۱۰): تأثیر پارامترهای ورودی در مقدار ذرات تقویت کننده سطح میانه (۳٪ بر: الف) تخلخل و ب) استحکام کششی نهایی.

در این وضعیت، افزایش سرعت دورانی موجب نرم شدن ماده و افزایش نرخ سیلان آن شده که در پی آن افزایش سرعت پیشروی نیز موجب ایجاد دمای تف جوش مناسب و توزیع بهتری از ذرات تقویت کننده در فلز پایه گردید. از سوی دیگر، افزایش نیروی اکستروژن به ۱۵/۵ kN باعث افزایش تخلخل و کاهش استحکام کششی می‌شود. در این وضعیت، افزایش نیرو موجب افزایش بیش از حد سرعت پیشروی و در نتیجه عدم فرصت کافی افزایش دما در منطقه اغتشاش شده و منجر به رشد دانه‌ها، عدم توزیع مناسب ذرات و در بعضی از موارد آگلومره شدن ذرات تقویت کننده خواهد شد (شکل ۱۱). این نتایج با تحقیق عزیزیه و همکاران [۳۱] همخوانی دارد.



شکل (۱۱): تصویر OM نمونه سیم کامپوزیتی در RS= 750 rpm، RF=3% wt, EF=15.5kN.

در جدول ۶، مقادیر بهینه متغیرهای ورودی فرآیند جهت دستیابی به مقادیر کمینه تخلخل و مقادیر بیشینه استحکام کششی نهایی و همچنین مقادیر ترکیب بهینه آمده است.

جدول (۷): مقایسه نتایج بهینه‌سازی و صحت‌گذاری تجربی.

اختلاف (%)	صحت‌گذاری (تجربی)	بهینه‌سازی	پاسخ خروجی
۲/۵۷	۱۵۹/۵	۱۵۵/۴	استحکام کششی نهایی (MPa)
۶/۷۸	۰/۴۹	۰/۴۵۶۸	تخلخل (%)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مطالعه تجربی و تحلیل آماری پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی سیم کامپوزیتی AA1050/SiC تولید شده به روش اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. سپس به روش مطلوبیت پارامترهای بهینه تعیین گردید. در پایان نتایج بهینه‌سازی با آزمون تجربی مقایسه شده و مورد صحت‌گذاری واقع شد. نتایج حاصل از تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

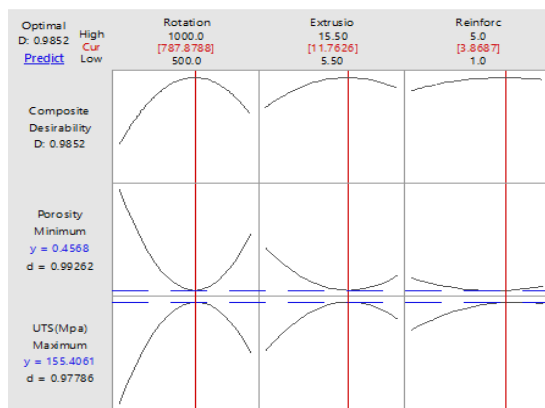
۱- سرعت دورانی و مجذور آن بیشترین تأثیر را بر تخلخل و استحکام کششی دارند.

۲- نیروی اکستروژن دومین عامل مؤثر بر تخلخل می‌باشد. همچنین اثر تقابل سرعت دورانی-نیروی اکستروژن تأثیر بالایی بر تخلخل و استحکام کششی دارد.

۳- کاهش نیروی اکستروژن و کاهش مقدار ذرات SiC نسبت به سطح میانه ($EF=10/5$ kN و $RF=3/3$ wt)، منتج به افزایش تخلخل (۶۵٪) در نمونه کامپوزیتی گردید. در این حالت، کاهش سرعت پیشروی ماتریس موجب افزایش مدت‌زمان تماس ابزار با فلز پایه شده که این امر منجر به افزایش بیش از اندازه حرارت اصطکاکی گردید. از این رو، افزایش دمای منطقه اغتشاشی منتج به رشد دانه‌ها و کاهش استحکام کششی نمونه می‌شود که در مقایسه با نتایج تحقیق بافاری و جمالی [۱۴ و ۲۲] مورد تأیید می‌باشد.

۴- هنگامی که تقویت‌کننده در سطح میانه ($3/3$ wt) تنظیم شد، افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰rpm به ۷۵۰rpm و افزایش نیروی اکستروژن به ۱۰/۵ kN باعث کاهش تخلخل (۷۹٪) و افزایش استحکام کششی (۳۱٪) گردید [۱۰ و ۲۸].

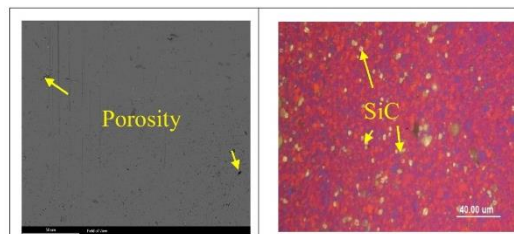
۵- افزایش سرعت دورانی از ۷۵۰rpm به ۱۰۰۰rpm و افزایش درصد تقویت‌کننده به ۵ wt٪ باعث افزایش تخلخل (۷۲٪) و کاهش استحکام کششی (۱۷٪) گردید [۲۱].



(ج)

شکل (۱۲): نمودار بهینه تأثیر پارامترهای ورودی بهینه بر: الف) تخلخل، ب) استحکام کششی نهایی و ج) ترکیب بهینه.

همچنین به منظور صحت‌گذاری بین نتایج بهینه‌سازی و نتایج تجربی، آزمون تجربی توسط سنبه‌ای به قطر سوراخ سنبه ۷ میلی‌متر، با استفاده از پودر کامپوزیت AA1050/4% wt SiC و با تنظیم سرعت دورانی و نیروی اکستروژن در مقادیر نزدیک به مقادیر بهینه متغیرهای ورودی، به انجام رسید. در شکل ۱۳ تصاویر OM و SEM از توزیع ذرات تقویت‌کننده و تخلخل در نمونه سیم کامپوزیتی تولیدی نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۱۳): تصاویر SEM و OM نمونه سیم کامپوزیتی در $RS=787$ rpm $EF=11.7$ kN، $EF=3.8\%$ (الف) توزیع ذرات و ب) تخلخل.

جدول ۷، نتایج حاصل از آزمون صحت‌گذاری و مقایسه آن با نتایج بهینه‌سازی را ارائه می‌کند. با توجه به اختلاف اندک میان نتایج، صحت و دقت فرآیند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند، مورد تأیید قرار گرفت. تحقیق وحدتی [۲۶] نیز با اختلاف اندک میان نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمون صحت‌گذاری (کمتر از ۸ درصد)، صحت و دقت روند بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند را تأیید نمود.

۷- مقادیر حاصل از بهینه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه شده و صحت نتایج در استحکام کششی و تخلخل به ترتیب با ۲/۵۷٪ و ۶/۷۸٪ خطا مورد تأیید می‌باشد.

۶- بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند با بالاترین مقدار تابع مطلوبیت ($D = 0.9852$) جهت دستیابی هم‌زمان به مقادیر بیشینه استحکام کششی نهایی (۱۵۵/۴ MPa) و کمینه درصد تخلخل (۰/۴۵٪) انجام پذیرفت.

۵- مراجع

- [10] A. Kurt, I. Uygur & E. Cete, "Surface modification of aluminium by friction stir processing", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 3, pp. 313-317, 2011.
- [11] S. Ahmadifard & et al., "Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization", *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 2, no. 4, pp. 31-36, 2016.
- [12] X. Li & et al., "Strain and texture in friction extrusion of aluminum wire", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 229, pp. 191-198, 2016.
- [13] R. A. Behnagh & et al., "Production of wire From AA7277 aluminum chips via friction-stir extrusion (FSE)", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 45, pp. 1484-1489, 2014.
- [14] D. Baffari & et al., "Al-SiC metal matrix composite production through friction stir extrusion of aluminum chips," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 419-424, 2017.
- [15] R. Pandiyarajan & S. Marimuthu, "Parametric optimization and tensile behaviour analysis of AA6061-ZrO₂-C FSW samples using Box-Behnken method", *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2644-2647, 2021.
- [16] K. K. Jangra & et al., "An experimental investigation and optimization of friction stir welding process for AA6082 T6 (cryogenic treated and untreated) using an integrated approach of Taguchi, grey relational analysis and entropy method", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 230, no. 2, pp. 454-469, 2016.
- [17] S. Verma & et al., "Multi-objective optimum design for FS welded 7039 aluminium alloy considering weld quality issues", *Materials Today Communications*, vol. 26, pp. 102010, 2021.
- [18] M. Koilraj & et al., "Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083– Optimization of process parameters using Taguchi technique", *Materials & Design*, vol. 42, pp. 1-7, 2012.
- [1] P. K. Sahu & et al., "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.
- [2] F. Nascimento & et al., "Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys", *Materials Science and Engineering A*, vol. 506, no. 1-2, pp. 16-22, 2009.
- [3] R. S. Mishra, Z. Ma & I. Charit, "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.
- [4] M. K. Besharati-Givi & P. Asadi, "Advances in friction-stir welding and processing", Elsevier, 2014.
- [5] L. Karthikeyan, V. Senthil Kumar & K. Padmanabhan, "Investigations on superplastic forming of friction stir-processed AA6063-T6 aluminum alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 3, pp. 294-298, 2013.
- [6] D. Ahmadkhaniha & P. Asadi, "Mechanical alloying by friction stir processing", in *Advances in Friction Stir Welding and Processing*, Woodhead Publishing London. pp. 387-425, 2014.
- [7] P. Asadi & et al., "Effects of SiC particle size and process parameters on the microstructure and hardness of AZ91/SiC composite layer fabricated by FSP", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 20, pp. 1554-1562, 2011.
- [8] P. Asadi, R. Mahdavinjad & S. Tutunchilar, "Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 21, pp. 6469-6477, 2011.
- [9] N. Yuvaraj & S. Aravindan, "Fabrication of Al5083/B4C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 398-410, 2015.

FSA via RSM", Journal of Science and Technology of Composites, vol. 7, no. 4, pp. 1207-1216, 2021.

[27] D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, 2017.

[28] S. Benavides & et al., "Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum", Scripta Materialia, vol. 41, no. 8, pp. 809-815, 1999.

[29] N. S. Sundaram & N. Murugan, "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys", Materials & Design, vol. 31, no. 9, pp. 4184-4193, 2010.

[30] A. Ahmadi, M. R. Toroghinejad & A. Najafzadeh, "Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al₂O₃/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process", Materials & Design, vol. 53, pp.13-19, 2014.

[31] M. Azizieh, A. H. Kokabi & P. Abachi, "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al₂O₃ nanocomposites fabricated by friction stir processing", Materials & Design, vol. 32, no. 4, pp. 2034-41, 2011.

۶- پی‌نوشت

- [1] Friction Stir Extrusion
- [2] Friction Stir Welding
- [3] Friction Stir Processing
- [4] Yuvaraj and Aravindan
- [5] Kurt et al
- [6] Li et al
- [7] Behnagh et al
- [8] Baffari et al
- [9] Pandiyarajan and Marimuthu
- [10] Jangra et al
- [11] Verma et al
- [12] Koilraj et al
- [13] Response Surface Methodology
- [14] Analysis of variance
- [15] Rotational Speed
- [16] Extrusion Force
- [17] Reinforcement percentage weight

[19] M. Ghaffarpour & et al., "Evaluation of dissimilar welds of 5083-H12 and 6061-T6 produced by friction stir welding", Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44, pp. 3697-3707, 2013.

[20] A. H. Sakhaie & et al., "Optimization of friction stir spot welding process parameters to achieve maximum failure load", Iranian Journal of Manufacturing Engineering, vol. 5, no. 1, pp. 13-27, 2018.

[21] G. Jamali, S. Nourouzi & R. Jamaati, "Microstructure and mechanical properties of AA6063 aluminum alloy wire fabricated by friction stir back extrusion (FSBE) process", International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, vol. 26, pp. 1005-1012, 2019.

[22] G. Jamali, S. Nourouzi & R. Jamaati, "Manufacturing of gradient Al/SiC composite wire by friction stir back extrusion", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 35, pp. 735-743, 2021.

[۲۳] آ. بهزادی نژاد، ع. محصل، ح. امیدوار و ن. ستوده، "تأثیر نانوذرات آلومینا، تعداد پاس اختلاط و سرعت دوران در رفتار مکانیکی آلیاژ منیزیم AM60 جوش شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۶، شماره ۴، صفحه ۱۵-۱۴، زمستان ۱۴۰۱.

[۲۴] س. ا. کفائی، ح. ثابت و م. قنبری حقیقی، "اثر نوع لایه واسط بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۴، شماره ۴، صفحه ۲۳-۱، زمستان ۱۳۹۹.

[25] A. Dean & et al., "Response surface methodology", Design and Analysis of Experiments, pp. 565-614, 2017.

[26] M. Vahdati, "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by