



مطالعه ساخت کامپوزیت فلزی زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات SiC به روش متالورژی پودر

یاسر نجفی‌راد^۱، سجاد رسائی^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

چکیده

در این پژوهش، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات کاربید سیلیسیوم SiC به روش متالورژی پودر تولید شد و اثر سه پارامتر کلیدی شامل درصد وزنی تقویت‌کننده (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی)، فشار فشرده‌سازی (۱۲۷، ۱۴۰، ۱۵۵، ۱۷۰ و ۱۸۳ مگاپاسکال) و دمای تفجوشی (۴۷۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر ریزساختار و استحکام کششی بررسی گردید. طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش تاگوچی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش درصد SiC تا مقدار بهینه (حدود ۱ درصد وزنی) موجب بهبود استحکام و کاهش تخلخل می‌شود، اما افزایش بیش از حد آن (به ویژه ۴ درصد وزنی) با ایجاد تمرکز تنش و تجمع ذرات، سبب رشد حفره‌ها و افت شدید خواص مکانیکی می‌گردد. همچنین افزایش دمای تفجوشی در محدوده بررسی‌شده (از ۴۷۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس) باعث کاهش تعداد حفره‌ها و لی افزایش اندازه آنها و در نتیجه افزایش تخلخل کل شد. بهترین عملکرد مکانیکی مربوط به نمونه‌ای با ترکیب بهینه پارامترها (۱ درصد وزنی SiC، فشار ۱۵۵ مگاپاسکال و دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) بود که استحکام کششی بالاتر (حدود ۷۷ مگاپاسکال) و تغییر طول قابل قبول نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد. تحلیل ریزساختار تأیید کرد که کنترل همزمان درصد تقویت‌کننده، فشار تراکم و شرایط تفجوشی، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به چگالی بالا و ساختار یکنواخت دارد.

کلمات کلیدی: متالورژی پودر؛ کامپوزیت فلزی؛ آلومینیوم؛ کاربید سیلیسیوم.

Study of Aluminum Matrix Metal Composite Reinforced with SiC Particles Fabricated by Powder Metallurgy Method

Y. NajafiRad¹, S. Rasaei^{2,*}¹ MSc. Student, Mech. Eng., Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.² Assist. Prof., Mech. Eng., Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.

Abstract

In this study, an aluminum matrix composite reinforced with silicon carbide (SiC) particles was fabricated via the powder metallurgy route, and the effects of three key parameters namely reinforcement content (0, 0.5, 1, 2, and 4 wt.%), compaction pressure (127, 140, 155, and 183 MPa), and sintering temperature (470, 500, 550, and 600 °C) on the microstructure and tensile strength were systematically evaluated. The experimental design was established using the Taguchi method. The results revealed that increasing the SiC content up to an optimum level (approximately 1 wt.%) enhanced strength and reduced porosity; however, excessive SiC content (especially 4 wt.%) led to particle agglomeration and stress concentration, which promoted pore growth and significantly deteriorated the mechanical properties. Moreover, raising the sintering temperature within the studied range (from 470 to 600 °C) decreased the number of pores but increased their size, resulting in a higher overall porosity. The optimal combination of processing parameters (1 wt.% SiC, 155MPa compaction pressure, and 600 °C sintering temperature) yielded the best mechanical performance, exhibiting higher tensile strength (approximately 77 MPa) while maintaining acceptable ductility compared with other samples. Microstructural analyses confirmed that precise control of reinforcement fraction, compaction pressure, and sintering temperature is crucial for achieving high densification and a uniform microstructure.

Keywords: Powder Metallurgy; Metal Matrix Composite; Aluminum; SiC.

۱- مقدمه

فرآیند متالورژی پودر^۱ مجموعه‌ای از تکنیک‌ها شامل تولید، اختلاط، فشردن و تف جوشی پودرها برای تولید قطعات فلزی یا کامپوزیتی با خواص موردنظر می‌باشد. توانایی تولید ساختارهای با توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده، کنترل بالای ترکیب شیمیایی و ریزساختار، صرفه‌جویی در مواد و انرژی (به‌ویژه برای آلیاژهایی که ماشین‌کاری آنها دشوار یا پرهزینه است)، و امکان تولید قطعات با شکل‌های پیچیده بدون روش‌های ریخته‌گری یا ماشین‌کاری گسترده از مزیت‌های کلیدی این فرآیند هستند. این مزایا، روش متالورژی پودر را به‌ویژه برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی جذاب کرده است، زیرا آلومینیوم به‌خاطر چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا و هدایت حرارتی مناسب، در صنایع هوافضا، خودروسازی و الکترونیک کاربرد فراوان دارد. استفاده از تقویت‌کننده‌های سرامیکی مانند کاربید سیلیسیوم (SiC) به‌طور چشمگیری سختی، مقاومت به سایش و پایداری دمایی آلومینیوم را بهبود می‌بخشد و در عین حال وزن کمی به سیستم اضافه می‌کند؛ در نتیجه ترکیب Al-SiC از منظر طراحی قطعات ساختاری و قطعات اصطکاکی بسیار مورد توجه است. شایان ذکر است که فرآیندهای PM می‌توانند با تکنیک‌های مکمل (مثلاً آسیاب گلوله‌ای مکانیکی، پوشش‌دهی ذرات، پرس گرم، انجماد سریع و تف جوش تحت خلأ یا گاز محافظ) ترکیب شوند تا توزیع ذرات، چسبندگی بین‌فازی و چگالی نهایی را بهینه کنند. با این حال، ساخت کامپوزیت‌های Al-SiC به روش متالورژی پودر با چالش‌های اساسی نظیر ترشوندگی پایین بین SiC و آلومینیوم مذاب در طی تف‌جوشی، وجود لایه اکسیدی طبیعی Al_2O_3 روی ذرات آلومینیوم که مانع ایجاد پیوندهای مستقیم متالورژیکی می‌شود، و همچنین احتمال تشکیل فاز شکننده Al_4C_3 در فصل مشترک در دماهای بالا، مواجهه است که همگی لزوم کنترل دقیق پارامترهای فرآیند را دوجندان می‌کنند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای بر توسعه و بهینه‌سازی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، به‌ویژه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تولیدشده به روش متالورژی پودر متمرکز شده‌است. دیلشاد و همکاران [۱] نشان دادند که پارامترهایی نظیر دما و زمان تف‌جوشی، فشار فشردن و ترکیب پودرها

نقش تعیین‌کننده‌ای در چگالی، سختی و مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم دارند. نایاک و همکاران [۲] گزارش کردند که افزودن تقویت‌کننده موجب افزایش مقاومت فشاری و سختی می‌شود، اما مقادیر بیش از حد آن به پخت ناقص و افزایش تخلخل منجر شده و ضرورت بهینه‌سازی هم‌زمان ترکیب و پارامترهای فرآیند را نشان می‌دهد. مانونندرا و همکاران [۳] بیان کردند که علاوه بر مقدار تقویت‌کننده، شرایط برخورد و زاویه سایش نیز بر عملکرد سایشی اثرگذار است و طراحی کامپوزیت باید متناسب با شرایط کاری انجام گیرد. پالاب و همکاران [۴] نشان دادند که استفاده از تقویت‌کننده‌های هیبریدی می‌تواند موجب بهبود میکروسختی و امکان پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص از طریق مدل‌سازی شود. کومار و همکاران [۵] با مرور مطالعات مربوط به نانوفازهای کربنی نظیر گرافن، افزایش سختی، مدول الاستیسیته و هدایت حرارتی-الکتریکی را گزارش کردند، هرچند چالش توزیع یکنواخت و پیوند بین‌فازی همچنان پابرجاست. بینالی و همکاران [۶] نیز نشان دادند که افزودن تقویت‌کننده از طریق متالورژی پودر به بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی در آلیاژهای آلومینیومی منجر می‌شود و قابلیت تعمیم این رویکرد به سایر سیستم‌های فلزی وجود دارد. لیو و همکاران [۷، ۸] با مقایسه روش‌های تولید نتیجه گرفتند که متالورژی پودر به دلیل هزینه مناسب، تکرارپذیری بالا و کنترل دقیق پارامترها همچنان روشی کلیدی برای کاربردهای صنعتی است. وانی و همکاران [۹] نشان دادند که پارامترهایی نظیر اندازه پودر، درصد و اندازه تقویت‌کننده، شرایط آسیاب‌کاری و تف‌جوشی بر توزیع ذرات و خواص نهایی مؤثرند و تعیین درصد بهینه تقویت‌کننده برای حفظ تعادل سختی و چقرمگی ضروری است. المتیری و همکاران [۱۰] نیز بیان کردند که کنترل مورفولوژی پودر و ایجاد ذرات ورقه‌ای می‌تواند با افزایش سطح تماس ماتریس و ذره، هم‌زمان استحکام و شکل‌پذیری را بهبود دهد. کار و همکاران [۱۱] نشان دادند که افزودن تقویت‌کننده علاوه بر خواص مکانیکی، رفتار میرایی کامپوزیت‌های تولیدشده به روش PM را نیز به‌طور معناداری تغییر می‌دهد. سالم و همکاران [۱۲] گزارش کردند که استفاده از ذرات ریزتر موجب پراکندگی بهتر و افزایش مقاومت می‌شود، هرچند احتمال توده‌ای شدن ذرات

^۱ Powder Metallurgy, PM

گرفته‌است. همچنین چالش‌هایی نظیر توزیع یکنواخت تقویت‌کننده‌ها، پیوند بین‌فازی و کنترل تخلخل همچنان باقی است و نیاز به رویکردی تلفیقی برای ارتباط فرآیند با ریزساختار و خواص احساس می‌شود.

با وجود این تلاش‌ها، مرور نظام‌مند پیشینه نشان می‌دهد که اغلب مطالعات موجود به بررسی تک‌عاملی یا حداکثر دو عاملی پارامترها بسنده کرده‌اند و خلأ پژوهشی قابل توجهی در ارزیابی جامع و هم‌زمان سه پارامتر کلیدی درصد تقویت‌کننده، فشار فشرده‌سازی و دمای پخت بر ریزساختار (به‌ویژه ویژگی‌های کمی تخلخل شامل تعداد، اندازه و چگالی حفره‌ها) و پاسخ‌های مکانیکی (استحکام کششی و درصد ازدیاد طول تا شکست) وجود دارد. به عبارت دیگر، مشخص نیست که این سه پارامتر چگونه بر هم کنش متقابل داشته و کدام یک سهم غالب در کنترل ریزساختار نهایی ایفا می‌کند. از آنجا که درصد SiC به طور مستقیم بر میزان باربری و تمرکز تنش تأثیر می‌گذارد، فشار فشرده‌سازی چگالی اولیه و قابلیت حذف تخلخل را تعیین می‌کند، و دمای پخت نیز با تأثیر بر نفوذ اتمی، رشد گردنه‌های تفجوشی و رفتار ترشوندگی نقش محوری دارد، بررسی هم‌زمان این سه پارامتر در یک طرح آزمایش نظام‌مند ضروری به نظر می‌رسد. از این رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش تاگوچی و آنالیز واریانس، به دنبال تعیین شرایط بهینه فرآیند به گونه‌ای است که ضمن دستیابی به حداکثر استحکام کششی، تخلخل در پایین‌ترین سطح ممکن کنترل شده و از تشکیل عیوب ناشی از تجمع ذرات یا رشد حفره‌ها جلوگیری گردد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، پودر آلومینیوم خالص با خلوص ۹۹/۵ درصد، میانگین اندازه ذرات ۴۵ میکرومتر و مورفولوژی کروی به عنوان ماده زمینه استفاده شد. ذرات تقویت‌کننده SiC با خلوص ۹۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۲۰ میکرومتر در درصدهای وزنی ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد به ترکیب افزوده شدند. به منظور بهبود ترشوندگی بین ذرات SiC و زمینه آلومینیومی و همچنین کاهش لایه اکسیدی سطح ذرات آلومینیوم، پودر منیزیم (Mg) با خلوص ۹۹ درصد و میانگین اندازه ذرات ۵۰ میکرومتر به مقدار ثابت ۱ درصد وزنی به تمامی نمونه‌ها اضافه گردید. Mg به عنوان یک عامل احیاکننده، لایه اکسیدی

نیز افزایش می‌یابد و انتخاب بهینه اندازه ذرات اهمیت دارد. کندان و همکاران [۱۳] نیز نشان دادند که ترشوندگی بین ماتریس و تقویت‌کننده به ترکیب آلیاژ و دما وابسته بوده و بهبود آن موجب افزایش چسبندگی بین‌فازی و ارتقای خواص مکانیکی می‌شود. رضائی و همکاران [۱۴] بیان کردند که تقویت هیبریدی به ریزدانه‌سازی ساختار و افزایش سختی و استحکام تسلیم منجر می‌شود، هرچند تمرکز ذرات در مرز دانه‌ها می‌تواند بر رفتار تغییر شکل پلاستیک اثرگذار باشد. سده‌بی و همکاران [۱۵] با مقایسه PM متداول و SPS نشان دادند که SPS با ایجاد تراکم بالاتر و تخلخل کمتر موجب بهبود سختی، مقاومت سایشی و خوردگی می‌شود، هرچند PM متداول نیز با بهینه‌سازی پارامترها خواص قابل قبولی ارائه می‌دهد. عدنان و همکاران [۱۶] گزارش کردند که افزودن نانوذرات به سیستم‌های تقویت‌شده موجب بهبود هم‌زمان سختی، استحکام فشاری و رفتار پساکمانشی می‌شود. کائو و همکاران [۱۷] نیز نشان دادند که طراحی هدفمند سیستم پودری و افزودن پودر آلومینیوم خالص می‌تواند با بهبود پراکندگی ذرات و کاهش تخلخل، تراکم و خواص مکانیکی نهایی را ارتقا دهد. سینگ [۱۸] در یک مطالعه مروری جامع به بررسی ویژگی‌های ساخت و رفتار اصطکاکی کامپوزیت‌های هیبریدی Al-Gr-SiC پرداخته است که نشان می‌دهد روش ساخت (متالورژی پودر یا ریخته‌گری) نقش اساسی در دستیابی به ساختاری همگن دارد؛ در متالورژی پودر انتخاب اندازه ذرات زمینه و تقویت‌کننده حیاتی است، در حالی که در ریخته‌گری، چالش اصلی ترشوندگی ضعیف ذرات است.

کومار و همکاران [۱۹] در مطالعه مروری خود به بازبینی اثر پارامترهای متالورژی پودر بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی پرداختند. نتایج نشان داد که فشار فشرده‌سازی مؤثرترین پارامتر در کنترل چگالی و تخلخل است. محدوده بهینه فشار فشرده‌سازی، دمای پخت و زمان پخت به ترتیب ۶۰۰-۷۰۰ مگاپاسکال، ۵۲۰-۶۰۰ درجه سلسیوس و ۳-۴ ساعت تعیین گردید. همچنین نوع و کسر وزنی تقویت‌کننده‌ها نیز نقش بسزایی در خواص نهایی دارند. به‌طور کلی، مطالعات پیشین بر اثر نوع و درصد تقویت‌کننده، پارامترهای فرآیند PM و ریزساختار بر خواص مکانیکی و سایشی تمرکز داشته‌اند، اما ارزیابی جامع تعادل خواص و برهم‌کنش هم‌زمان پارامترهای فرآیندی کمتر مورد توجه قرار

Al₂O₃ را شکسته و با تشکیل فازهای MgO و MgAl₂O₄ سطح تماس پاکی برای پیوند متالورژیکی فراهم می‌کند [۱۷، ۱۳]. همچنین، وجود Mg باعث کاهش زاویه تماس (زاویه ترشوندگی) بین آلومینیوم مذاب (در طی فاز مایع تفجوشی) و SiC شده و در نتیجه چسبندگی بین‌فازی و انتقال بار از زمینه به تقویت‌کننده را بهبود می‌بخشد.

در مرحله مقدماتی، نمونه‌هایی با شرایط دمایی پخت کمتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد و بیشتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد، درصد SiC بیش از ۵ درصدوزنی و فشار فشردده‌سازی کمتر از ۱۴۰ مگاپاسکال تهیه شدند که به دلیل بروز نواقصی نظیر تخلخل بالا و عدم استحکام کافی، از کیفیت قابل قبول برخوردار نبودند. بنابراین، این مشاهدات به عنوان مبنای تعیین بازه بهینه پارامترهای فرآیند در نظر گرفته شد و محدوده‌های مناسب برای ساخت نمونه‌های اصلی بر همان اساس انتخاب گردید. تصاویر تعدادی از نمونه‌های نامناسب حاصل از شرایط اولیه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- تصاویر نمونه‌های اولیه ساخته‌شده با کیفیت غیرقابل قبول.

به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و امکان تعیین سهم مشارکت هر یک از پارامترها در تغییرات خواص نهایی، از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده گردید. سه پارامتر اصلی فرآیندی به شرح زیر انتخاب شدند:

- درصد وزنی تقویت‌کننده SiC با ۵ سطح: ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی
- فشار فشردده‌سازی با ۵ سطح: ۱۲۷، ۱۴۰، ۱۵۵، ۱۷۰ و ۱۸۳ مگاپاسکال
- دمای تفجوشی (تفجوشی) با ۴ سطح: ۴۷۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس.

با توجه به تعداد سطوح نابرابر (یک عامل ۵ سطحی، یک عامل ۵ سطحی و یک عامل ۴ سطحی)، ماتریس آزمایشی بر اساس آرایه متعامد L16 اصلاح‌شده طراحی شد. در مجموع

۱۷ آزمایش تعریف گردید که هر ترکیب پارامتری با یک نمونه مشخص مطابقت دارد (جدول ۱). به منظور بررسی اثر درصد بالای SiC، (۴ درصدوزنی) در دمای تفجوشی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین اثر فشار ۱۸۳ مگاپاسکال، یک آزمایش اضافی (شماره ۱۷) به آرایه الحاق گردید. این آزمایش در تحلیل اصلی ANOVA به عنوان داده تکمیلی لحاظ شد و برای محاسبات اثرات اصلی، ۴ درصدوزنی به عنوان سطح پنجم در نظر گرفته شد. در صورت حذف این آزمایش، آرایه به حالت کاملاً متعامد L16 بازمی‌گردد که نتایج مشابهی برای سطوح مشترک ارائه می‌دهد. زمان تفجوشی برای تمامی نمونه‌ها ۶۰ دقیقه و ثابت در نظر گرفته شد. پاسخ‌های مورد اندازه‌گیری شامل استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول تا شکست بود. تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار Minitab انجام شد.

انتخاب درصد SiC به عنوان اولین پارامتر کلیدی از آنجا نشأت می‌گیرد که مقدار تقویت‌کننده به طور مستقیم بر سهم باربری ذرات در کامپوزیت، میزان تمرکز تنش در فصل مشترک، و آستانه تشکیل توده‌های سرامیکی^۱ مؤثر است. انتخاب فشار فشردده‌سازی به این دلیل است که چگالی اولیه^۲ پیش از تفجوشی تعیین‌کننده میزان تخلخل باقی‌مانده و تعداد و اندازه حفره‌های داخلی پس از تفجوشی می‌باشد. انتخاب دمای تفجوشی نیز به دلیل نقش مستقیم آن در نفوذ اتمی، رشد گردنه‌های تفجوشی، فعال شدن مکانیزم‌های چگالش، و همچنین تشکیل احتمالی فاز شکننده در دماهای بالای حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفته است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده

شماره نمونه	دمای پخت (°C)	SiC %wt	فشار فشردگی (MPa)
۱	۴۷۰	۰	۱۲۷
۲	۴۷۰	۲	۱۷۰
۳	۵۰۰	۰	۱۲۷
۴	۵۰۰	۰/۵	۱۴۰
۵	۵۰۰	۱	۱۵۵
۶	۵۰۰	۲	۱۷۰
۷	۵۰۰	۴	۱۸۳
۸	۵۵۰	۰	۱۲۷
۹	۵۵۰	۰/۵	۱۴۰
۱۰	۵۵۰	۱	۱۵۵

^۲ Green Density

^۱ Agglomeration

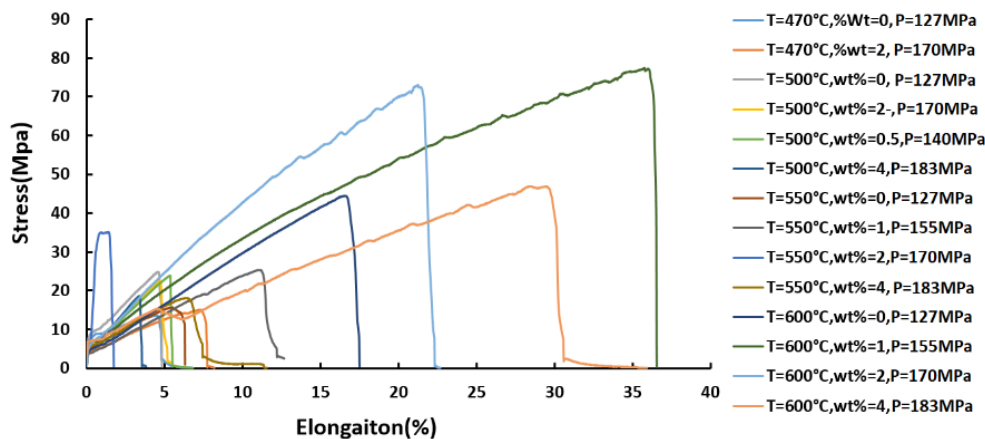
در نهایت، قطعات استوانه‌ای با قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر تولید و نمونه‌های مینیاتوری آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 به روش وایرکات تهیه شدند. همچنین بررسی ریزساختار و متالوگرافی بر اساس استاندارد ASTM E7 بر روی نمونه‌ها انجام شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش نمونه‌های ساخته‌شده در شکل ۲ ارائه شده و مقادیر استحکام کششی در شکل‌های ۳(الف) و ۳(ب) نمایش داده شده‌اند. بر اساس این نتایج، بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه شماره ۱۵ با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱ درصد وزنی SiC و فشار ۱۵۵ مگاپاسکال بوده که مقدار آن در حدود ۷۷/۴ مگاپاسکال به‌دست آمده است. نتایج تحلیل آماری داده‌ها بر مبنای روش تاگوچی در جدول ۲ آورده شده است. تحلیل واریانس نشان می‌دهد که درصد وزنی SiC مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر استحکام کششی است؛ به‌طوری‌که مقدار F-value برابر ۲۴/۱۵ و سطح معنی‌داری $P\text{-value} < 0/001$ بیانگر نقش غالب این پارامتر در تعیین رفتار مکانیکی کامپوزیت می‌باشد. دما نیز با F-value برابر ۲۸/۴۱ و $0/001$ $P\text{-value} <$ تأثیر بسیار معناداری دارد، اما سهم مشارکت آن ($3/8/5$) اندکی کمتر از درصد وزنی SiC ($43/2$) است. همچنین نتایج نشان داد که درصد وزنی SiC تأثیری غیرخطی بر خواص مکانیکی دارد. تحلیل مبتنی بر روش تاگوچی نشان داد که مقدار بهینه تقویت‌کننده در حدود ۱ درصد وزنی قرار دارد. به‌طور کلی، افزودن تقویت‌کننده تا مقدار بهینه موجب افزایش استحکام شده، اما افزایش بیش از آن منجر به کاهش شدید استحکام می‌شود.

۱۷۰	۲	۵۵۰	۱۱
۱۸۳	۴	۵۵۰	۱۲
۱۸۳	۰	۶۰۰	۱۳
۱۴۰	۰/۵	۶۰۰	۱۴
۱۵۵	۱	۶۰۰	۱۵
۱۷۰	۲	۶۰۰	۱۶
۱۸۳	۴	۶۰۰	۱۷

آسیاب‌کاری و اختلاط پودرهای آلومینیوم، SiC (با درصدهای تعیین‌شده) و منیزیم (۱ درصد وزنی ثابت) به مدت ۶۰ دقیقه در آسیاب گلوله‌ای با سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه، نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ همگن‌سازی شدند. هدف از این مرحله دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات SiC در زمینه آلومینیومی و جلوگیری از تجمع ذرات سرامیکی بود. سپس مخلوط پودر همگن‌شده در یک قالب فولادی سخت‌کاری‌شده ریخته شد و با استفاده از پرس هیدرولیک تک‌محوره با قابلیت اعمال فشار تا ۲۱۵ مگاپاسکال، تحت فشارهای تعیین‌شده (۱۲۷ تا ۱۸۳ مگاپاسکال) فشرده‌سازی سرد گردید. نرخ بارگذاری و زمان نگهداری در حداکثر فشار (۳۰ ثانیه) برای تمامی نمونه‌ها ثابت بود. نمونه‌های فشرده‌شده در کوره الکتریکی با کنترل دقیق دما و تحت جریان پیوسته گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد و با نرخ جریان ۱ لیتر بر دقیقه حرارت داده شدند. برنامه حرارتی به صورت گرمایش از دمای محیط تا دمای تعیین‌شده (۴۷۰، ۵۰۰، ۵۵۰ یا ۶۰۰ درجه سلسیوس) با نرخ ۱۰ درجه بر دقیقه، نگهداری به مدت ۶۰ دقیقه در دمای پخت، و سپس سرمایش کنترل‌شده در کوره با نرخ ۵ درجه بر دقیقه تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و پس از آن سرمایش آزاد در اتمسفر آرگون تا دمای محیط، بود.

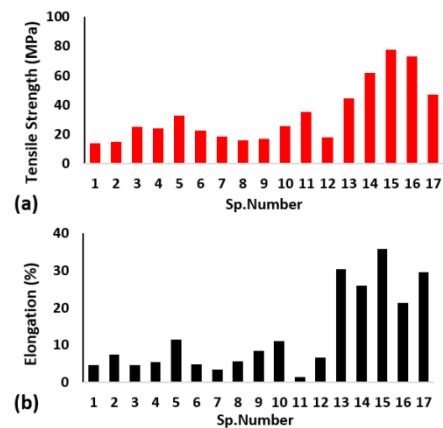


شکل ۲- نتایج آزمون کشش نمونه‌ها.

شده است. تحلیل این داده‌ها امکان ارزیابی اثر هم‌زمان دما، درصد ذرات و فشار اعمالی بر ویژگی‌های تخلخل را فراهم می‌سازد. نتایج تحلیل تاگوشی و آنالیز واریانس نشان داد که دمای پخت مهم‌ترین عامل مؤثر بر شاخص‌های تخلخل است و در هر سه شاخص تعداد، اندازه متوسط و چگالی حفرات بیشترین سهم مشارکت (بیش از ۶۰ درصد) را به خود اختصاص داده است. افزایش دمای پخت با بهبود نفوذ اتمی و رشد گرده‌های سینترشده، موجب کاهش معنی‌دار تخلخل و بسته‌شدن حفرات باز شده است. در دماهای پایین‌تر، حفره‌ها عموماً کوچک اما پرتعداد بوده و چگالی آن‌ها قابل توجه است، در حالی‌که با افزایش دما، تعداد حفرات به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. با این حال، افزایش بیش از حد دما اگرچه تعداد حفرات را کاهش می‌دهد، اما موجب رشد اندازه حفرات باقی‌مانده و هم‌جوشی آن‌ها می‌شود.

از نظر اثر درصد وزنی، رفتار غیرخطی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که افزایش آن تا حدود ۰/۵ تا ۱ درصد وزنی موجب بهبود ریزساختار، کاهش تعداد و اندازه حفرات و در نتیجه کاهش چگالی تخلخل گردید. در مقابل، افزایش بیشتر تقویت کننده باعث افزایش مجدد تخلخل شد که به تجمع ذرات تقویت‌کننده، توزیع غیریکنواخت و کاهش پیوستگی زمینه آلومینیومی نسبت داده می‌شود.

نیروی فشرده‌سازی نیز اثر مثبت و یکنواختی بر کاهش تعداد و چگالی حفرات داشته که ناشی از افزایش تراکم اولیه پیش از تفجوشی است، هرچند شدت اثر آن نسبت به دمای پخت کمتر بوده و در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد.

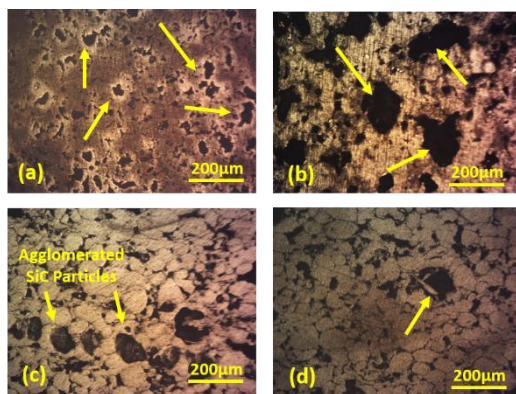


شکل ۳- نمودار نتایج آزمون کشش: الف) استحکام کششی نمونه‌ها، ب) درصد افزایش طول نمونه‌ها.

جدول ۲- نتایج تحلیل واریانس

درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-value	P-value	درصد مشارکت
۳	۳۷۵۰/۲	۱۲۵۰/۰۷	۲۸/۴۱	< ۰/۰۰۱	۳۸/۵
۴	۴۲۵۰/۶	۱۰۶۲/۶۵	۲۴/۱۵	< ۰/۰۰۱	۴۳/۲
۴	۶۸۰/۳	۱۷۰/۰۸	۳/۸۶	۰/۰۳۹۵	۶/۸
۵	۲۲۰	۴۴	-	-	۱۱/۵
۱۶	۸۹۰۱/۱	-	-	-	۱۰۰
Total					

به‌منظور بررسی ریزساختار، تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها تحلیل و پارامترهایی شامل تعداد حفره‌ها، مساحت کل حفرات، اندازه متوسط حفره‌ها (بر اساس رابطه ۱) و چگالی حفرات (بر اساس رابطه ۲) استخراج شد که نتایج آن‌ها در شکل ۴ ارائه



شکل ۵- ریزساختار دو نمونه از قطعات ساخته شده و حفرات تشکیل شده که در شکل مشخص شده‌اند:
 الف) ۴۷۰ درجه سانتیگراد، ۱۷۰ مگاپاسکال و ۲ درصد وزنی
 ب) ۶۰۰ درجه سانتیگراد، ۱۵۵ مگاپاسکال و ۱ درصد وزنی
 ج) ۵۵۰ درجه سانتیگراد، ۱۸۳ مگاپاسکال و ۴ درصد وزنی
 د) ۵۵۰ درجه سانتیگراد، ۱۵۵ مگاپاسکال و ۱ درصد وزنی

بررسی ریزساختاری نشان داد که چگالی حفره‌ها (تعداد حفره در واحد سطح) همبستگی منفی قوی‌تری با استحکام کششی دارد نسبت به اندازه متوسط حفره. با کاهش چگالی حفره از ۲۲۹ به ۲۵ حفره بر میلی‌متر مربع، استحکام از ۱۳/۶ به ۴۴/۵ مگاپاسکال افزایش یافت. اندازه متوسط حفره به تنهایی اثر مستقیم معناداری نداشت، اما با دما همبستگی بالایی نشان داد. بهینه‌ترین نمونه (استحکام ۷۷/۴ مگاپاسکال) دارای چگالی حفره ۷۹ حفره بر میلی‌متر مربع و اندازه حفره ۱/۷۳ میکرومتر مربع بود. این نتایج تأیید می‌کند که دستیابی به ریزساختاری با حفره‌های کمتر، نقش کلیدی و مؤثرترین راهکار در بهبود خواص مکانیکی است.

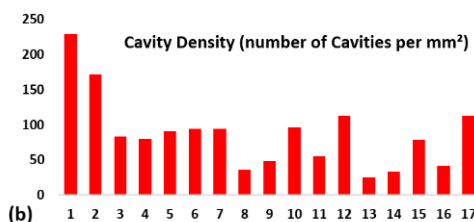
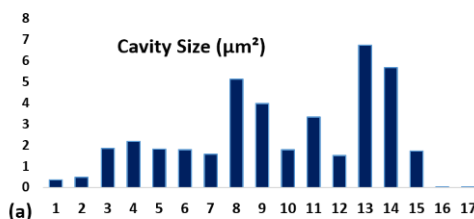
۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات SiC به روش متالورژی پودر ساخته شدند و اثر سه پارامتر درصد وزنی تقویت‌کننده، فشار فشردن و دمای تفجوشی بر خواص مکانیکی و ریزساختار ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که:

- بهترین عملکرد مکانیکی مربوط به نمونه با ترکیب ۱ درصد وزنی SiC، فشار ۱۵۵ مگاپاسکال و دمای ۶۰۰ درجه

$$(۱) \quad \text{اندازه متوسط حفره} = \frac{\text{مساحت کل حفره‌ها}}{\text{تعداد حفره‌ها}}$$

$$(۲) \quad \text{چگالی حفره‌ها} = \frac{\text{تعداد حفره‌ها}}{\text{مساحت کل تصویر}}$$



شکل ۴- نتایج مطالعه متالوگرافی نمونه‌ها: الف) اندازه متوسط حفره‌ها، ب) چگالی حفره‌ها.

نتایج تحلیل آماری نشان داد که مقدار P-value مربوط به دمای پخت در هر سه پاسخ تخلخل کمتر از ۰/۰۵ بوده و بیانگر معنی‌داری آماری بالای این پارامتر است. به‌طور کلی، دمای پخت با کنترل مکانیزم‌های نفوذ، رشد گردنه و چگالش نقش غالبی در تعیین ویژگی‌های تخلخل ایفا می‌کند، در حالی که نقش دوگانه داشته و در مقادیر کم موجب بهبود ریزساختار و در مقادیر زیاد سبب افزایش ناپیوستگی و تخلخل می‌شود. بر این اساس، شرایط بهینه فرآیند شامل دمای پخت بالا، درصد وزنی SiC در محدوده ۰/۵ تا ۱ درصد و نیروی فشردن نسبتاً بالا تعیین شد. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل هم‌زمان پارامترهای فرآیندی می‌تواند به بهینه‌سازی ریزساختار و در نتیجه بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی کامپوزیت منجر شود.

- [4] P. Sarmah, S. Pawanr, K. Gupta, (2025) Fabrication of Novel Hybrid Al-SiC-ZrO₂ Composites via Powder Metallurgy Route and Intelligent Modeling for Their Microhardness, in: *Ceramics, Journal*, pp. 91.
- [5] K.K. Sadhu, N. Mandal, R.R. Sahoo, (2023) SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 91, 10-43.
- [6] R. Binali, H. Kaçan, K. Asgarov, T. Çetin, (2022) Use Of Powder Metallurgy Method in The Production of SiC Reinforced Cu-Al-Ni Composites and Characterization of The Production Result, *Doğu Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 30-40.
- [7] G. Liu, Z. Wang, C. Yan, Y. Shi, (2025) Advances in additive manufacturing of SiC/Al composites: A review, *Review of Materials Research*, 1(2), 100041.
- [8] G. Liu, S. Zhou, C. Wang, S. Chen, D. Sun, A. Chen, Z. Li, C. Yan, Y. Shi, (2023) Fabrication and characterization of SiC/Al composites prepared by laser powder bed fusion (LPBF) combined with vacuum pressure infiltration, *Materials & Design*, 236, 112495.
- [9] V.V. Vani, S.K. Chak, (2018) The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy, *Manufacturing Rev.*, 5.
- [10] S.M. Almotairy, N.H. Alharthi, H.F. Alharbi, H.S. Abdo, (2020) Superior Mechanical Performance of Inductively Sintered Al/SiC Nanocomposites Processed by Novel Milling Route, *Scientific Reports*, 10(1), 10368.
- [11] A. Kar, A. Sharma, S. Kumar, (2024) A Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites, in: *Crystals, Journal*, pp. 412.
- [12] M.A. Salem, I.G. El-Batanony, M. Ghanem, M.I. Abd ElAal, (2016) Effect of the Matrix and Reinforcement Sizes on the Microstructure, the Physical and Mechanical Properties of Al-SiC Composites, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139(1).
- [13] E. Candan, H.V. Atkinson, Y. Turen, I. Salaoru, S. Candan, (2011) Wettability of Aluminum-Magnesium Alloys on Silicon Carbide Substrates, *Journal of the American Ceramic Society*, 94(3), 867-874.
- [۱۴] رضائی، ب. آل، شایسته‌فر، شیرآقایی، (۲۰۲۰) بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت هیبریدی زمینه آلومینیومی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*.
- [۱۵] سده‌یی، خسروی، یعقوبی‌نژاد، (۲۰۲۲) مقایسه تجربی ریزساختار و خواص سطحی نمونه Al/Al₂O₃ تولیدشده با

سلسیوس بود که استحکام کششی نهایی ۷۷/۴ مگاپاسکال را نشان داد.

• با افزایش درصد SiC از ۱ به ۴ درصد وزنی، استحکام کششی به طور میانگین ۳۹ درصد کاهش یافت که به تجمع ذرات تقویت‌کننده، تمرکز تنش و افزایش تخلخل نسبت داده می‌شود.

• افزایش دمای تفجوشی از ۴۷۰ به ۵۵۰ درجه سلسیوس باعث کاهش تعداد حفره‌ها به میزان ۴۵ درصد شد، اما افزایش بیشتر دما تا ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب رشد اندازه متوسط حفره‌ها (افزایش حدود ۹۳ درصدی) و در نتیجه افزایش تخلخل کل از ۳/۱ به ۲/۸ درصد گردید.

• افزایش فشار فشردده‌سازی از ۱۲۷ به ۱۸۳ مگاپاسکال باعث کاهش تخلخل کل به میزان ۲۷ درصد شد، اما اثر آن در دماهای بالاتر (۶۰۰ درجه سلسیوس) به دلیل نرم‌شدگی زمینه و رشد حفره‌ها، کمرنگ‌تر گردید.

• تحلیل واریانس بر اساس روش تاگوچی نشان داد که درصد وزنی SiC با اختلاف زیاد، تأثیرگذارترین پارامتر بر استحکام کششی است. سهم مشارکت هر یک از عوامل به صورت کمی به شرح زیر محاسبه گردید:

✓ درصد وزنی SiC: ۴۳/۲ درصد در تغییرات استحکام کششی.

✓ دمای تفجوشی: ۳۸/۵ درصد در تغییرات استحکام کششی.

✓ فشار فشردده‌سازی: ۶/۸ درصد در تغییرات استحکام کششی.

• مقدار P-Value برای درصد وزنی SiC کمتر از ۰/۰۰۱

به دست آمد که بیانگر اهمیت آماری بسیار بالا و نقش غالب این پارامتر است.

مراجع

- [1] D. Akgümüş Gök, C. Bayraktar, M. Hoşkun, (2024) A review on processing, mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with Al₂O₃, SiC, B₄C and MgO by powder metallurgy method, *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 1132-1150.
- [2] K.C. Nayak, K.K. Rane, P.P. Date, T.S. Srivatsan, (2022) Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters, in: *Applied Sciences, Journal*, pp. 8843.
- [3] M. Yadav, L.A. Kumaraswamidhas, A. Kumar, T.M.Y. Khan, U. Baig, (2024) Erosion behavior of Al-SiC and Al-WC MMCs via powder metallurgy under solid particle impingement, *Scientific Reports*, 14(1), 29533.

- [18] J. Singh, (2016) Fabrication characteristics and tribological behavior of Al/SiC/Gr hybrid aluminum matrix composites: A review, Friction, 4(3),191-207.
- [19] N. Kumar, A. Bharti, K.K. Saxena, (2021) A re-investigation: Effect of powder metallurgy parameters on the physical and mechanical properties of aluminium matrix composites, Materials Today: Proceedings, 44, 2188-2193.
- متالورژی پودر و SPS مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها.
- [16] A. Khan, M.W. Abdelrazeq, M.R. Mattli, M.M. Yusuf, A. Alashraf, P.R. Matli, R.A. Shakoor, (2020) Structural and Mechanical Properties of Al-SiC-ZrO₂ Nanocomposites Fabricated by Microwave Sintering Technique, in: Crystals, Journal, pp. 904.
- [17] L. Cao, Q. Dai, Q. Liang, X. Zhang, (2025) The Influence of Process Conditions and Reinforcement Characteristics on the Densification and Mechanical Properties of Powder Metallurgy SiC(p)/Al Composites, Materials (Basel, Switzerland), 18(21).