

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی فرسایش ناشی از ذرات ساینده در ساختارهای متخلخل ورونوئی مورد مصرف در مسیر جریان گاز

مقاله پژوهشی

اکرم صالحی^۱، علیرضا کیانی رشید^{۲*}، مسعود گلستانی پور^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۳- استادیار، گروه پژوهشی مواد، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

kianirashid@um.ac.ir *

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰ | هدف از تحقیق حاضر بررسی فرسایش ایجاد شده در فوم‌های فلزی ورونوئی در اثر برخورد ذرات ساینده می‌باشد. فوم‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر با استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تولید شده‌اند و به‌عنوان کاهنده صدا در مسیر سیالات گازی استفاده می‌شوند. برای تولید نمونه‌های مورد آزمون، ابتدا فوم‌های ورونوئی در سه اندازه تخلخل متفاوت ۵ppi، ۷ppi و ۱۰ppi با استفاده از روش‌های نرم‌افزاری طراحی شدند و سپس با روش ساخت افزایشی و ریخته‌گری دقیق تبدیل به فوم‌های ورونوئی آلومینیومی شدند. آزمون‌های فرسایش با کمک جت گازی در اندازه ذرات ساینده ۱۸۰-۲۲۰ میکرون و ۲۸۰-۳۲۰ میکرون و در زاویه برخورد ۹۰° با سطح انجام گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های نرخ فرسایش، پروفیلومتری و میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داد که در نمونه‌های متخلخل و بالک، با افزایش اندازه ذرات ساینده زبری سطحی افزایش می‌یابد، اما نرخ فرسایش در نمونه‌های متخلخل، برخلاف نمونه بالک، با افزایش اندازه ذرات ساینده کمتر می‌شود. همچنین مشاهده شد در یک اندازه ذره ساینده مشخص، با کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش نسبت سطح به حجم در ساختارهای متخلخل، نرخ فرسایش افزایش خواهد یافت. |
| پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱ | |
| کلید واژگان: فرسایش، ذرات ساینده، فوم، ساختار ورونوئی، نرخ فرسایش. | |

Investigating the Erosion Caused By Abrasive Particles in Voronoi Porous Structures Used in the Gas Flow Path

Akram Salehi¹, AliReza Kiani-Rashid^{2*}, Masoud Golestanipour³

1. PhD Student, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Assistant Professor, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Iran.

* kianirashid@um.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi: 10.71753/ma.2025.1183507

Keywords:

Erosion,
Abrasive Particles,
Foam,
Voronoi Structure,
Erosion Rate.

Abstract

The aim of this study is investigating the erosion caused by abrasive particles in Voronoi metal foams. The foams under investigation in this study are made of aluminum alloy 7075 and are being used to reduce noise in the gas flow path. For the production of the foam samples, they were first designed using software methods in three different cell sizes of 5 ppi, 7 ppi and 10 ppi. Then the aluminum Voronoi foams were fabricated by additive manufacturing and investment casting methods. Erosion tests were performed with the help of air jet in the abrasive particles size of 180-220 microns and 280-320 microns, at a 90° angle with the surface. The results of erosion rate studies, profilometry and scanning electron microscopy showed that in the porous and bulk samples with an increase in abrasive particle size, the surface roughness increases, but in contrast to the bulk sample, the erosion rate in the porous samples decreases as the size of the abrasive particles increases. Furthermore, it was found that the erosion rate will increase for a particular abrasive particle size by reducing the metal foam cell sizes and increasing the surface-to-volume ratio.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Akram Salehi, AliReza Kiani-Rashid, Masoud Golestanipour, Investigating the Erosion Caused By Abrasive Particles in Voronoi Porous Structures Used in the Gas Flow Path, New Process in Material Engineering, 2025, 19(2), 1-14.

۱- مقدمه

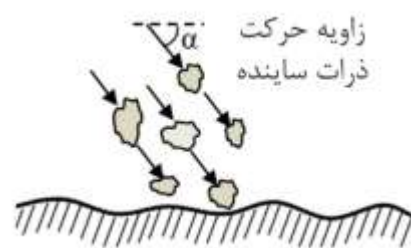
ساختارهای فلزی متخلخل جهت کاهش صوت در کاربردهای فراوانی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، صداخفه‌کن برای وسایل و تجهیزات پنوماتیک و پمپ‌ها اشاره کرد [۶-۷].

استفاده از ساختارهای متخلخل در تجهیزات به دلیل عدم تغییر هندسه قطعات، یک روش ارزان و ساده محسوب می‌شود. ژوو و مائو^۲ [۸] ساختارهای متخلخل را جایگزین زبانه صلب ورودی هوا به فن گریز از مرکز کردند. نتیجه این کار کاهش حداقل ۱۵ دسی‌بل شدت صوت، بدون تغییر در هندسه آن تجهیزات بود. در حضور ساختارهای متخلخل در مسیر جریان‌های اغتشاشی، مقاومت اصطکاکی بر فشاری غلبه کرده و در نتیجه ناپایداری‌ها و اغتشاشات جریان کاهش می‌یابد.

در مطالعات صورت گرفته جهت کاربرد ساختارهای متخلخل به‌عنوان کاهش‌دهنده جریان اغتشاشی، نشان داده شده است که هرچه بی‌نظمی و پیچیدگی هندسی در ساختارهای متخلخل بیشتر باشد، نرخ تبدیل جریان‌های اغتشاشی به آرام و نیز میزان جذب صوت بیشتر خواهد بود [۹]. در میان انواع ساختارهای متخلخل، ساختارهای ورونوئی بیشترین شباهت را به مواد متخلخل موجود در طبیعت و نیز بیشترین بی‌نظمی هندسی را دارند. چن و همکارانش^۳ [۱۰] نشان دادند که در ساختارهای ورونوئی، با کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش بی‌نظمی در ساختار، میزان کاهش صوت بیشتر خواهد بود.

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، بیشترین استحکام را در میان آلیاژهای آلومینیوم داراست. با توجه به‌سختی بالای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، برخی محققین نشان دادند که تولید فوم‌های فلزی بر پایه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با روش ریخته‌گری دقیق، از سایش ابزار جلوگیری خواهد کرد. تولید فوم‌های فلزی سلول باز با استفاده از آلیاژ آلومینیوم و با روش ریخته‌گری دقیق این مزیت را دارد که می‌توان ساختار هندسی موردنظر را پیش از فرآیند تولید، با روش‌های نرم‌افزاری کنترل نمود [۱۱-۱۲].
خواص مقاومت به فرسایش برای فوم‌های فلزی سلول باز با ساختار ورونوئی که به‌عنوان کنترل‌کننده جریان اغتشاشی در

گاز استخراج شده از چاه همواره با ناخالصی‌هایی از قبیل شن، ذرات جامد، آب و... همراه است که مشکلات عدیده‌ای در سیستم‌های بهره‌برداری ایجاد می‌کند. یکی از مشکلات مهم این مواد همراه، فرسایش است. فرسایش^۱ ایجاد شده توسط ذرات جامد، فرسایش دینامیکی ناشی از اثرات تکرار شده برخورد ذرات با سطح می‌باشد. امروزه، فرسایش به‌عنوان یکی از منابع اصلی تخریب قطعات در صنایع نفت و گاز شناخته شده است. پدیده فرسایش از نقطه‌نظر ماده‌ای که تحت فرسایش قرار می‌گیرد به نوع ماده هدف و سختی آن وابسته است. برای مواد نشکن و فلزات، با افزایش زاویه برخورد ذرات ساینده با سطح تا 90° ، میزان فرسایش کاهش می‌یابد (شکل ۱). در مقابل برای مواد ترد با افزایش زاویه برخورد، شدت فرسایش افزایش می‌یابد به نحوی که ذرات ریز با سرعت‌های پایین نیز باعث فرسایش در سطح ماده می‌شوند [۱-۳].



شکل (۱): پدیده فرسایش ناشی از برخورد ذرات ساینده با سطح [۱].

مشاهدات انجام شده در مورد مکانیسم‌های فرسایش نشان می‌دهد که در سیالات پایه گاز، فرسایش ناشی از ذرات جامد مانند شن و ماسه پدیده غالب می‌باشد. در سیالات گازی با هرگونه تغییر شکل در مسیر عبور جریان، جریان آرام تبدیل به جریان اغتشاشی می‌شود که وجود این جریان‌های اغتشاشی علاوه بر ایجاد صدا، فرسایش را نیز تسریع می‌کند [۴-۵].

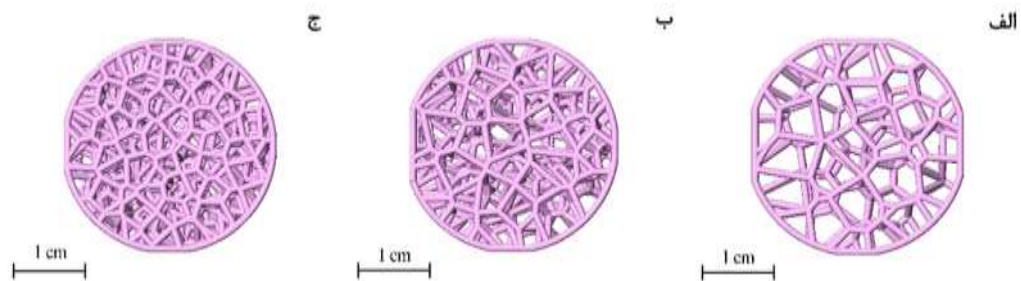
در سال‌های اخیر مطالعاتی برای استفاده از ساختارهای فلزی سلول باز برای کاهش اغتشاشات جریان و در نتیجه کاهش صدای ایجاد شده ناشی از آنها، انجام شده است. از

۲- مواد و روش تحقیق

۱-۱- طراحی، ساخت و عملیات حرارتی

در تحقیق حاضر نمونه‌های متخلخل ورونوئی با استفاده از نرم‌افزار راینو^۴ و افزونه گرس‌هاپر^۵، در ۳ اندازه حفره ۵ ppi، ۷ ppi و ۱۰ ppi و در اندازه‌های موردنظر برای انجام آزمون فرسایش طراحی شدند (شکل ۲). سپس فایل‌های نهایی با استفاده از نرم‌افزارهای زیربراش^۶ و مش‌میکسر^۷ برای ساخته شدن با روش ساخت افزایشی کنترل و در پایان توسط نرم‌افزار سیمپلیفای^۸، کدگذاری^۹ شدند.

خطوط تقلیل فشار گاز استفاده می‌شوند، تاکنون بررسی نشده است؛ لذا با توجه به نرخ سایش بالای قطعات مصرفی در خطوط انتقال گاز، در این پژوهش، به بررسی مقاومت به فرسایش در ساختارهای متخلخل ورونوئی در حضور ذرات ساینده با اندازه‌های مختلف پرداخته می‌شود. برای این منظور سه ساختار متخلخل با اندازه سلول‌های مختلف طراحی شد و با روش‌های ساخت افزایشی و ریخته‌گری دقیق تولید شدند و بررسی‌های پروفیلومتری، تصویربرداری اشعه ایکس و میکروسکوپی الکترونی روبشی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.



شکل (۲): ساختارهای متخلخل ورونوئی طراحی شده جهت آزمون‌های فرسایش: الف) نمونه ۵ ppi، ب) نمونه ۷ ppi و ج) نمونه ۱۰ ppi.

نمونه‌های آلومینیومی تولید شده جهت آزمون فرسایش (نمونه‌های متخلخل و نمونه‌های بالک) تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند به این صورت که به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۸۰°C آنیل و سپس در آب کوئنچ شدند. در ادامه، عملیات پیرسازی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰°C انجام گرفت.

تمامی نمونه‌های طراحی شده و کدگذاری شده، با روش ساخت افزایشی و توسط دستگاه چاپگر سه‌بعدی پلیمری CR-6 max (چین، شرکت Creality)، تبدیل به مدل‌های اولیه پلیمری شدند و سپس با استفاده از ماده اولیه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ (جدول ۱) و روش ریخته‌گری دقیق (تکنیک موم فداشونده^{۱۰}) تبدیل به نمونه‌های متخلخل آلومینیومی شدند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مذاب آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده جهت تولید نمونه‌های فوم فلزی.

| عنصر | Al | Co | Zr | V | Ti | Ni | Cr | Mn | Pb | Fe | Si | Cu | Mg | Zn |
|-----------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| درصد وزنی | باقی‌مانده | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۲۱ | ۰/۲۱ | ۰/۳۴ | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۱/۸۴ | ۲/۵۶ | ۵/۲۷ |

۲-۲- آزمون‌های مشخصه‌یابی

ایجاد رابطه بین سختی سطح و آسیب فرسایش در مواد فلزی و پلیمری استفاده کردند. در این رابطه K و n ثابت هستند و Hv نشان‌دهنده میزان سختی ویکرز در ماده تحت فرسایش می‌باشد. بر اساس این رابطه هرچه سختی سطحی ماده تحت فرسایش بیشتر باشد، آسیب‌های ایجاد شده در اثر پدیده فرسایش، زمانی که ذرات ساینده با زاویه 90° با سطح برخورد می‌کنند، کمتر است.

فوم‌های آلومینیومی تولید شده در تحقیق حاضر مطابق با روش ذکر شده در بخش (۲)، با استفاده از روش‌های ساخت افزایشی و ریخته‌گری دقیق در سه اندازه حفره 5 ppi ، 7 ppi و 10 ppi تولید شدند (شکل ۳). آلیاژ استفاده شده برای تولید نمونه‌های فومی و نمونه‌های بالک، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد (جدول ۱)، این دسته از آلیاژهای آلومینیوم در گروه آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر قرار می‌گیرند لذا این امکان وجود دارد که با انجام عملیات حرارتی، سختی آلیاژ افزایش یابد [۱۲]. برای این منظور نمونه‌های تولید شده، مطابق روش ذکر شده در بخش مواد و روش تحقیق، تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند. با انجام عملیات حرارتی T6، سختی سطحی نمونه‌های فومی از 145 Hv به $223/7\text{ Hv}$ ، افزایش یافت.



شکل (۳). نمونه‌های متخلخل آلومینیومی: الف) نمونه 5 ppi ، ب) نمونه 7 ppi ، ج) نمونه 10 ppi .

با انجام عملیات حرارتی T6، ساختارهای یوتکتیکی که به صورت پیوسته در زمینه وجود داشتند (شکل ۴ الف)، تبدیل به فازهای جدا از هم می‌شوند که ناشی از تجزیه بخشی از فازهای ثانویه به زمینه آلومینیوم بعد از عملیات آتیل در 480°C به مدت ۱ ساعت می‌باشد (شکل ۴ ب).

سختی‌سنجی سطوح نمونه‌های آلومینیومی با کمک دستگاه سختی‌سنج ویکرز مدل KOOPA انجام گرفت. تمامی نمونه‌های تولید شده در تحقیق حاضر (نمونه‌های بالک و نمونه‌های فومی در سه اندازه تخلخل متفاوت) بر اساس استاندارد ASTM G 76-04 تحت آزمون فرسایش با کمک جت گازی مدل erosion (ایران، شرکت تجهیز صنعت نصر)، قرار گرفتند.

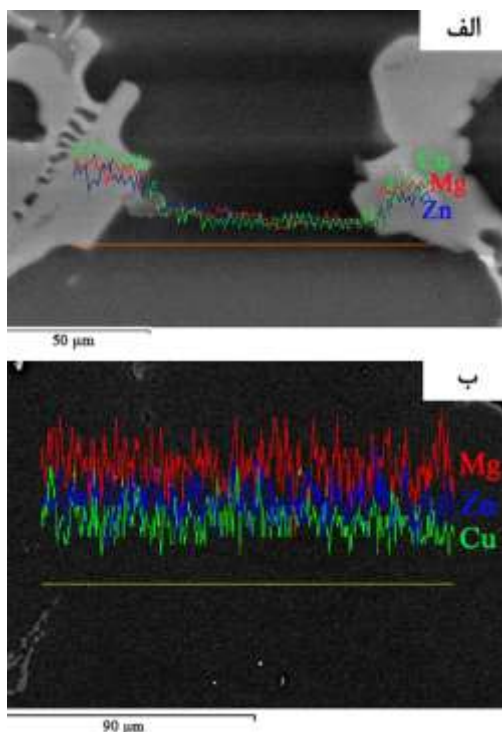
در پژوهش حاضر از دستگاه میکروسیتی CT Lotus-in vivo (ایران، شرکت تصویربرداری بهین نگاره) برای تهیه تصاویر از نمونه‌های متخلخل استفاده شد. اسکن تصاویر در تیوب اشعه ایکس با ولتاژ 80 kV و جریان $100\text{ }\mu\text{A}$ میکروآمپر انجام شد. در این دستگاه برای انجام اسکن، جسم بر روی صفحه چرخان بین یک چشمه پرتویی و یک صفحه آشکارساز حساس به مکان قرار می‌گیرد و در هر چرخش جسم، داده‌های تصویر آن بر روی صفحه آشکارساز ذخیره می‌شود.

توپوگرافی سطوح تحت سایش با استفاده از آزمون پروفیلومتری (رویه نگار لیزری سطوح) و با استفاده از دستگاه LPM-D1 (ایران، شرکت فناوری خلأ کهریا) انجام گرفت. برای انجام بررسی‌های ریزساختاری SEM و انجام آنالیز ترکیب EDS از میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1450VP(35kV) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

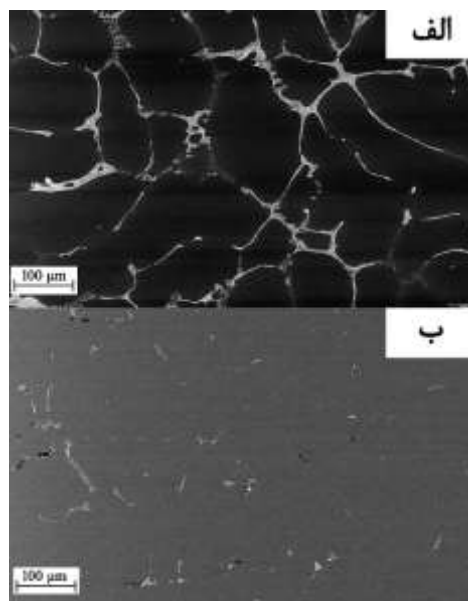
پورعلی و همکارش [۱۳] در بررسی کلوژرهای قرار گرفته در مسیر جریان گاز و همچنین در بررسی خطوط انتقال گاز نشان دادند، بیشترین تخریب ایجاد شده بر این قطعات ناشی از پدیده فرسایش در اثر برخورد ذرات ناخالصی موجود در مسیر گاز می‌باشد. از آنجایی که در پدیده فرسایش ناشی از برخورد ذرات ساینده، غالباً شکل و زاویه برخورد ذرات در طول فرآیند غیرقابل کنترل است، تنها راه برای کاهش اثرات ذرات ساینده، جایگزینی مواد تحت سایش با موادی است که سختی بالاتری دارند [۱۴]. اوکا و همکارانش [۱۵] از رابطه $K(Hv)^{-n}$ برای

مطالعات انجام شده، پیش‌بینی می‌شود ترکیب آن‌ها $MgZn_2$ باشد [۱۶].



شکل (۵). بررسی حضور عناصر آلیاژی منیزیم، روی و مس در نمونه‌های آلومینیوم تولید شده: الف) قبل از عملیات حرارتی، ب) بعد از عملیات حرارتی T6.

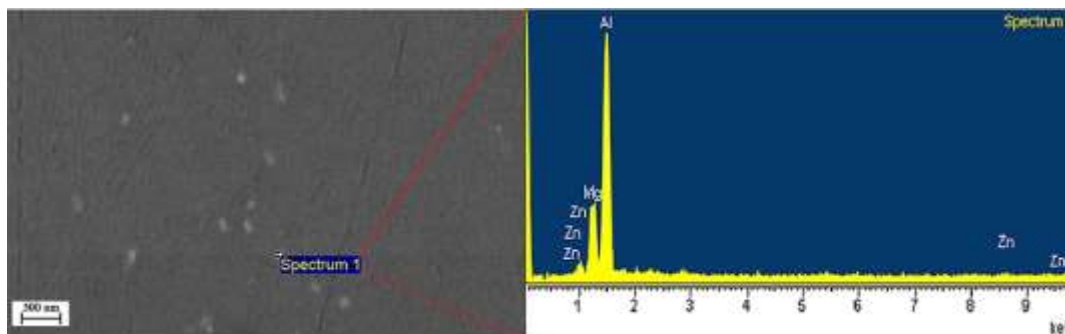
به ذرات جامدی که در صنعت گاز و در لوله‌های انتقال گاز وجود دارند، پودر سیاه^{۱۲} گفته می‌شود که از جنس سولفید آهن و اکسید آهن می‌باشند. مقدار این ذرات با استفاده از فیلترهای مخصوصی که در مسیر جریان گاز قرار دارد، کنترل می‌شود اما به دلیل فشار و سرعت بالای گاز، ریز بودن ذرات و همچنین این حقیقت که آلاینده‌های پودر سیاه در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی از جمله انجام واکنش‌های خوردگی و فرسایش لوله‌های انتقال گاز به طور پیوسته در حال تولید هستند، همیشه مقداری پودر سیاه در لوله‌ها وجود دارد که منجر به تشدید فرسایش خواهند شد [۱۷-۱۸].



شکل (۴). ریزساختار نمونه‌های آلومینیومی تولید شده: الف) قبل از عملیات حرارتی، ب) بعد از عملیات حرارتی T6.

نتایج آنالیز EDS خطی از نمونه‌های تولید شده نشان می‌دهد که ریزساختار نمونه ریخته‌گری شده، شامل جدایش محلولی در مرز دانه است به طوری که عناصر آلیاژی در فازهای مرز دانه‌ای متمرکز شده‌اند و میزان انحلال آن‌ها در مناطق بین دانه‌ای خیلی ضعیف است (شکل ۵ الف)، در حالی که پس از انجام عملیات حرارتی T6 با تجزیه فازهای یوتکتیک، میزان جدایش کاهش می‌یابد (شکل ۵ ب).

بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی همچنین نشان داد کسر حجمی فازهای مرز دانه‌ای پس از عملیات حرارتی کاهش می‌یابد اما در مقابل فازهای η در زمینه تشکیل می‌شوند (شکل ۶). فازهای η که به صورت کروی و پراکنده در ساختار وجود دارند، به عنوان مانعی قوی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و بنابراین باعث افزایش نرخ کار سختی و استحکام آن‌ها می‌گردد. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی به همراه آنالیز EDS نشان داد که این فازها از نوع Mg-Zn هستند که بر اساس

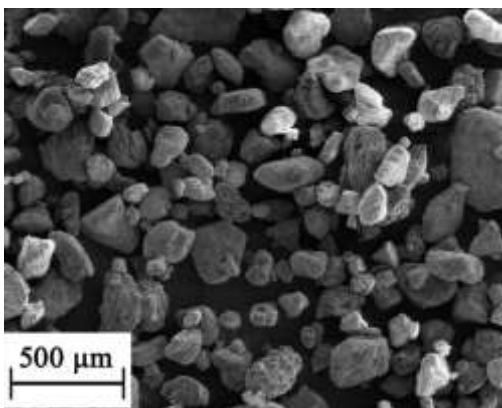


شکل (۶). تصویر SEM به همراه آنالیز EDS فازهای آ در نمونه‌های عملیات حرارتی شده.

فرسایش در نمونه‌های تحت آزمون، از رابطه (۱) استفاده شد [۲۰]:

$$E_R = \frac{W_{\text{before}} - W_{\text{after}}}{\text{Time}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، E_R نرخ فرسایش، W_{before} جرم نمونه قبل آزمون فرسایش و W_{after} جرم نمونه بعد آزمون فرسایش و Time نشان‌دهنده زمان انجام آزمون فرسایش می‌باشد.



شکل (۷). اندازه ذرات پودر سیاه موجود در مسیر توزیع گاز.

همان‌طور که در شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود با افزایش اندازه ذرات ساینده، شدت فرسایش در نمونه‌های فومی کاهش و در نمونه بالک، افزایش یافته است. کاهش فرسایش در فوم‌های فلزی با افزایش اندازه ذرات ساینده به عوامل متعددی بستگی دارد. یکی از پارامترهای مؤثر بر کاهش نرخ فرسایش با افزایش

از این رو با توجه به اینکه هدف از تولید نمونه‌های متخلخل در پژوهش حاضر، استفاده از آن‌ها در مسیر انتقال گاز می‌باشد، تمامی نمونه‌های متخلخل به همراه یک نمونه بالک (جهت مقایسه)، جهت بررسی میزان مقاومت به فرسایش، بر اساس استاندارد ASTM G 76-04 و طبق روش ذکر شده در بخش مواد و روش تحقیق، تحت آزمون فرسایش با کمک جت گازی قرار گرفتند [۱۹]. جهت بررسی اثر اندازه ذرات ساینده بر پدیده فرسایش، ابتدا از پودر سیاه انباشته شده در محل آخرین فیلتر موجود در مسیر توزیع گاز (قبل از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز) نمونه‌برداری شد و توزیع اندازه ذرات به دست آمد (شکل ۷). همان‌طور که دیده می‌شود اندازه ذرات کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرون می‌باشند. قبادی و همکارانش [۱۷] نیز نشان دادند که اندازه ذرات ساینده موجود در خطوط انتقال گاز عموماً بین ۵۰ تا ۵۰۰ میکرون متغیر است. لذا در پژوهش حاضر، آزمون‌های فرسایش جهت بررسی اثر اندازه ذرات در محدوده اندازه ذرات ۱۸۰-۳۲۰ میکرون انجام گرفت.

سرعت حرکت سیال در سیستم‌های گازی به مراتب بیشتر از سیستم‌های نفتی بوده و معمولاً بیشتر از ۱۰ m/s می‌باشد؛ لذا در کار حاضر، سرعت پاشش ذرات به سطح نمونه، در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر با ۳۰ m/s و زمان انجام آزمون نیز ۳۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده آزمون بررسی اثر اندازه ذرات ساینده بر میزان کاهش جرم و نرخ فرسایش در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. برای محاسبه نرخ

برای بررسی تغییرات اندازه حفرات در نمونه‌های فومی، تصاویر آن‌ها با استفاده از دستگاه میکروسیتی اسکن تهیه شد (شکل ۱۰). در دستگاه‌های میکروسیتی اسکن از الگوریتم‌های بازیابی مختلفی برای به دست آوردن مقدار هر وکسل^{۱۳} استفاده می‌شود. با استفاده از این الگوریتم‌ها می‌توان داده‌های تولید شده را به صورت تصاویر سه بعدی و دوبعدی ایجاد نمود. برای این منظور الگوریتم‌های مختلفی وجود دارند که می‌توان به BPCF^{۱۴}،^{۱۵}FBP،^{۱۶}ART،^{۱۷}MLEM و^{۱۸}SIRT اشاره کرد (۲۱).

در دستگاه استفاده شده در تحقیق حاضر، داده‌های سه بعدی توسط الگوریتم فلدکمپ (FDK)^{۱۹} آنالیز شدند. مزیت این الگوریتم نسبت به دیگر الگوریتم‌ها، سرعت بالاتر و قدرت بازسازی جسم با تعداد تصاویر بیشتر (زاویه تصویرگیری کوچک‌تر) و در نتیجه دقت بالای آن در مدت زمانی کمتر می‌باشد.



شکل (۱۰): تصاویر سه بعدی به دست آمده با روش میکروسیتی: الف) فوم

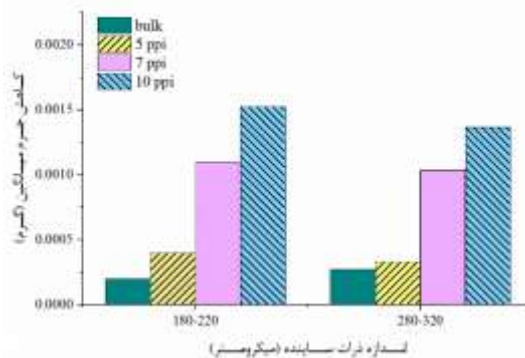
ب) فوم ۵ ppi، ج) فوم ۷ ppi، د) فوم ۱۰ ppi.

در فوم‌های فلزی سول باز، ساختار یک سلول از دیواره‌های^{۲۰} سلولی و حفرات^{۲۱} تشکیل شده است که به آن‌ها، پنجره^{۲۲} نیز گفته می‌شود. قطر سلول متناسب با قطر کره‌ای است که به طور کامل درون یک سلول جای می‌گیرد و قطر حفره، قطر پنجره‌هایی است که واسط بین سلول‌های مجاور هستند. به دیواره‌های جامدی که سلول‌ها و حفرات را از هم جدا می‌کنند نیز دیواره سلول گفته می‌شود [۲۲].

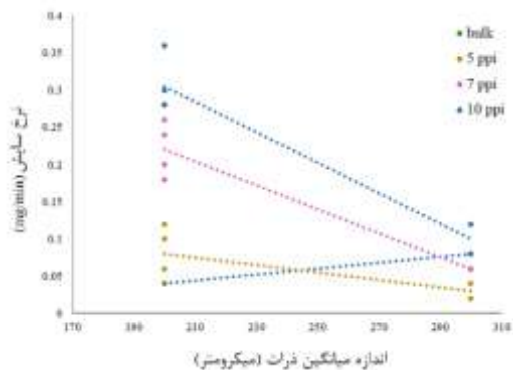
نتایج به دست آمده از آنالیز اندازه سلول‌ها با استفاده از الگوریتم فلدکمپ در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار کمینه اندازه حفرات در نمونه ۵ ppi، برابر با ۱۴۰

اندازه ذرات، نوع ساختار نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌باشد.

به طور کلی فوم‌های فلزی سلول باز، ساختاری متخلخل با حفرات به هم پیوسته دارند. همان‌طور که در بخش روش آزمایش گفته شد، نمونه‌های فومی مورد استفاده در پژوهش حاضر ساختار ورونوئی دارند. این فوم‌ها بیشترین بی‌نظمی هندسی را در بین دیگر فوم‌های سلول باز دارند و به همین دلیل در کاربردهای جاذب صوتی، می‌توانند امواج صوتی با فرکانس‌های مختلف را جذب کنند. بی‌نظمی هندسی و بالطبع متفاوت بودن اندازه سلول‌ها، منجر به تغییر رفتار نمونه‌های متخلخل ورونوئی نسبت به نمونه‌های بالک در آزمون فرسایش می‌شود، به طوری که با برخورد ذرات ساینده با اندازه بزرگ‌تر از اندازه حفرات در نمونه‌های فومی، تعدادی از آن‌ها در نمونه به دام می‌افتند که تأثیر مستقیم ذرات ساینده بر میزان فرسایش را کاهش می‌دهد.



شکل (۸): تأثیر تغییر اندازه ذرات ساینده بر میزان کاهش جرم.



شکل (۹): تأثیر تغییر اندازه ذرات ساینده بر نرخ سایش مواد فومی.

میکرون، در نمونه ۷ ppi برابر با ۹۳ میکرون و در نمونه ۱۰ ppi برابر با ۷۴ میکرون می‌باشد.

جدول (۲): نتایج آنالیز ساختاری به‌دست آمده با روش میکروسیستی اسکن.

| نمونه | تخلخل (%) | تعداد سلول | قطر سلول میانگین (میلی‌متر) | قطر حفره بیشینه (میلی‌متر) | قطر حفره کمینه (میلی‌متر) | طول میانگین دیواره سلول (میلی‌متر) | نسبت سطح به حجم (متر/۱) |
|--------|-----------|------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| ۵ ppi | ۹۰ | ۶۳ | ۴/۳۰ | ۵/۸۳ | ۰/۱۴۰ | ۶/۳۰ | ۱۷۳۰۰ |
| ۷ ppi | ۸۱ | ۱۲۳ | ۳/۴۹ | ۵/۷۴ | ۰/۰۹۳ | ۵/۵۴ | ۲۷۳۴۰ |
| ۱۰ ppi | ۶۲ | ۲۵۲ | ۲/۵۶ | ۳/۹۲ | ۰/۰۷۴ | ۳/۳۵ | ۴۳۴۵۰ |

شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که نمونه ۱۰ ppi تعداد سلول‌های بیشتری (۲۵۲) در مقایسه با نمونه‌های ۷ ppi و ۵ ppi (به ترتیب ۱۲۳ و ۶۳ سلول) دارد که باعث می‌شود در اثر انجام آزمون فرسایش در نمونه ۱۰ ppi، ذرات ساینده برخوردی بیشتری با دیواره‌های سلولی در مقایسه با دو نمونه دیگر داشته باشند.

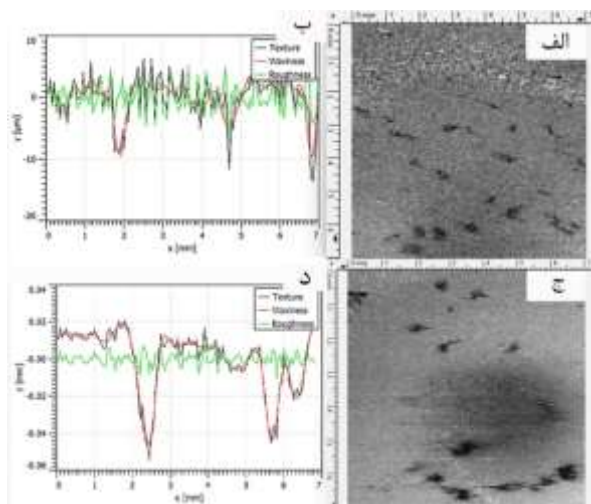
رفتار فرسایشی ایجاد شده برای نمونه‌های بالک در کار حاضر معکوس رفتار نمونه‌های فومی می‌باشد به گونه‌ای که هرچه اندازه ذرات ساینده بزرگ‌تر شده است، میزان کاهش وزن و نیز نرخ سایش در نمونه‌های بالک، افزایش یافته است (شکل‌های ۸ و ۹). کشاورزبان و همکارانش [۲] در کار مطالعاتی خود بر روی سطوح مسطح نشان دادند که مقدار کار و انرژی مورد نیاز برای برداشتن یا کندن مواد از سطح یک فلز با مقدار انرژی جنبشی منتقل شده به فلز توسط ذرات ساینده، نسبت مستقیم دارد و ذرات بزرگ‌تر به دلیل انرژی ضربه‌ای بیشتری که دارند آسیب‌های سطحی شدیدتری در سطح مواد بالک ایجاد می‌کنند؛ اما برای نمونه‌های فومی دیده می‌شود که به خاطر ماهیت خاص ماده زمینه (ساختار متخلخل)، ذرات کوچک‌تر به دلیل برخوردهای بیشتری که با دیواره‌های فومی دارند، انرژی بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر به نمونه وارد می‌کنند و بنابراین اثر اندازه ذرات بر میزان فرسایش به وجود آمده، متفاوت با نمونه‌های بالک خواهد بود.

با توجه در شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود که در یک محدوده اندازه ذرات ساینده مشخص، با کاهش اندازه سلول‌ها

از آنجا که اندازه ذرات ساینده در هر دو حالت (هم ذرات با اندازه ۱۸۰-۲۲۰ میکرون و هم ذرات با اندازه ۲۸۰-۳۲۰ میکرون) بیشتر از اندازه کمینه حفرات می‌باشد، لذا احتمال به دام افتادن ذرات ساینده در هر سه نمونه فومی وجود دارد؛ اما هرچه اندازه ذرات ساینده بزرگ‌تر است (محدوده ۲۸۰-۳۲۰ میکرون) و اندازه حفرات کوچک‌تر است (نمونه ۱۰ ppi)، شدت به دام افتادن ذرات در نمونه بیشتر و میزان برخورد آن‌ها با دیواره سلول‌ها کمتر خواهد بود، در نتیجه نرخ سایش در نمونه‌های فومی با افزایش اندازه ذرات ساینده کمتر خواهد بود (شکل ۹).

میسرا و فینی^{۲۳} [۲۳] مشاهده کردند که اثر اندازه ذرات بر فرسایش با خواص سطح هدف تغییر می‌کند. برخی ذرات ساینده هنگام برخورد با سطح فوم، تمایل دارند منحرف شوند و در لایه‌های بعدی فوم نفوذ نخواهند کرد. نگوین و همکارانش^{۲۴} [۴] نیز نشان دادند که با افزایش اندازه ذرات ساینده اثر برهمکنش آن‌ها بر یکدیگر بیشتر می‌شود که باعث کاهش سرعت برخورد ذرات خواهد شد؛ اما ذرات کوچک‌تر، راحت‌تر می‌توانند وارد سلول‌های فومی شوند و چون جت گازی به طور پیوسته در حال وارد نمودن نیرو می‌باشد، برخوردهای احتمالی و انتقال انرژی ذرات با سایز کوچک‌تر به سلول‌های متفاوت و متعدد موجود در یک نمونه فومی افزایش خواهد یافت که منجر به افزایش نرخ سایش و کاهش هرچه بیشتر جرم در نمونه‌های فومی تحت فرسایش با ذرات کوچک‌تر، خواهد شد (شکل ۸). به علاوه نتایج آنالیز انجام

فقط کمی از مسیر اصلی منحرف خواهند شد و به ناحیه متمرکزی در مسیر محور نازل ضربه خواهند زد که باعث افزایش میزان فرسایش در آن بخش می‌شوند. بررسی میزان زبری سطوح در نمونه‌های بالک نشان می‌دهد که میانگین زبری برای نمونه‌های بالک تحت فرسایش با ذرات ۲۸۰-۳۲۰ میکرون برابر با ۲/۴۴ میکرون و برای نمونه‌های تحت فرسایش با ذرات ۱۸۰-۲۲۰ میکرون، برابر با ۱/۸۳ میکرون است. به این معنی که با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات ساینده و بیشتر شدن نرخ سایش، میزان زبری سطحی در نمونه‌های بالک افزایش یافته است. اردوگان و همکارانش^{۲۶} [۲۵] در بررسی رفتار سایشی نمونه‌های آلومینیومی نشان داد که زبری سطح نمونه‌ها به طور چشمگیری تحت تأثیر برخورد ذرات ساینده تغییر خواهد کرد. طبق مطالعات آن‌ها بر روی مواد بالک، ذرات ساینده بزرگ (۶۰ مش) در مقایسه با ذرات کوچک (۱۲۰ مش) میانگین زبری بالاتری را سبب می‌شوند.



شکل (۱۱): نتایج حاصل آزمون پروفایلمتری نمونه بالک: الف و ب)

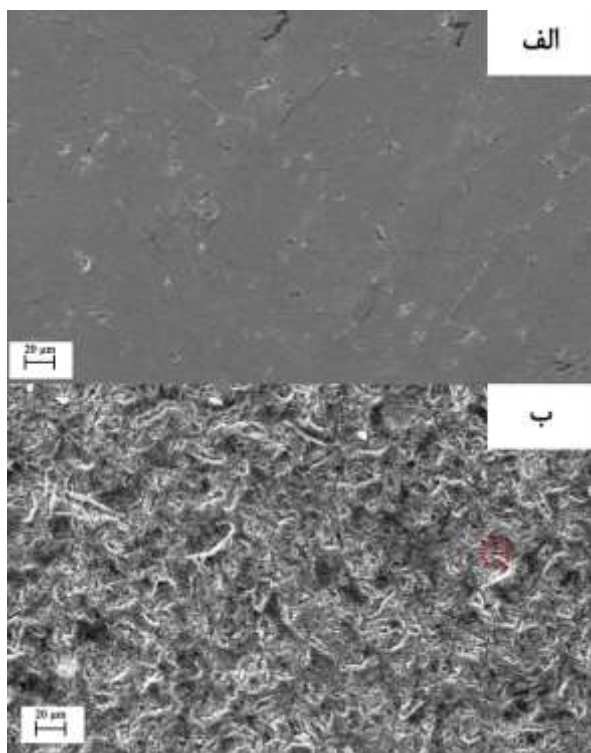
تصویر دو بعدی به همراه نمودار زبری سنجی سطح تحت سایش با ذرات ساینده ۲۲۰-۱۸۰ میکرون، ج و د) تصویر دو بعدی به همراه نمودار زبری سنجی سطح تحت سایش با ذرات ساینده ۳۲۰-۲۸۰ میکرون.

همان‌طور که در بررسی‌های زبری سنجی برای نمونه‌های فومی مشاهده می‌شود، میانگین زبری سطح در نمونه‌هایی که با ذرات

از نمونه ۵ ppi به نمونه ۱۰ ppi، میزان کاهش جرم و نرخ سایش افزایش یافته است. ایتان و نوآک^{۲۵} [۲۴] نشان دادند هرچه سطح مؤثر نمونه‌های متخلخل بیشتر باشد، نرخ سایش در آن نمونه بیشتر خواهد بود. با توجه به مقادیر به دست آمده از نسبت سطح به حجم در جدول (۲)، این عدد برای نمونه ۱۰، ۳/۷۶ برابر نمونه ۵ و ۲/۵ برابر نمونه ۷ می‌باشد. بیشتر بودن نسبت سطح به حجم در نمونه ۱۰ در مقایسه با سایر نمونه‌ها، شرایط را برای برخوردهای بیشتر ذرات ساینده فراهم خواهد کرد که منجر به افزایش نرخ فرسایش در مقایسه با سایر نمونه‌ها خواهد شد.

بسیاری از محققان از میانگین اندازه ذرات ساینده برای محاسبه نرخ فرسایش استفاده کردند. مطالعات آنها رابطه $\text{erosion rate} \propto (\text{particle size})^n$ با n در محدوده ۰/۳ تا ۰/۲ را نشان می‌دهند. این محدوده وسیع از مقدار n به عوامل متعددی بستگی دارد همچون: اندازه ذرات ساینده، تعداد ذرات برخوردکننده به سطح در واحد زمان، انرژی جنبشی ذرات (جرم و سرعت آن‌ها)، زاویه برخورد ذرات و تداخل بین ذرات برگشتی و ذرات برخوردکننده به سطح (۴). از این رو الگوی فرسایش تحت تأثیر چندین پارامتر خواهد بود و نمی‌توان برای مواد و نمونه‌های مختلف، مکانیسم فرسایش یکسانی به دست آورد لذا برای بررسی الگوی فرسایش و میزان زبری سطوح، یک نمونه بالک (شکل ۱۱) و یک نمونه متخلخل (شکل ۱۲) با استفاده آزمون پروفایلمتری مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که از مقایسه تصاویر دو بعدی برای نمونه بالک دیده می‌شود، در اندازه ذرات ساینده ۲۸۰-۳۲۰ میکرون، علاوه بر نقاط انفرادی ساییده شده در سطح، یک منطقه از سطح به طور مشخص تحت فرسایش قرار گرفته است که ناشی از برخورد بیشتر ذرات با سطح در آن منطقه می‌باشد. این نتایج با مشاهدات نگین و همکارانش [۴] در تطابق است که نشان دادند ذرات کوچک‌تر نسبت نیروی اینرسی و نیروی کشش کمتری در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر دارند، لذا احتمال منحرف شدن آن‌ها از محور اصلی نازل به سمت بیرون بیشتر است و لذا به ناحیه بزرگ‌تری از سطح نمونه برخورد می‌کنند، درحالی‌که ذرات ساینده بزرگ‌تر

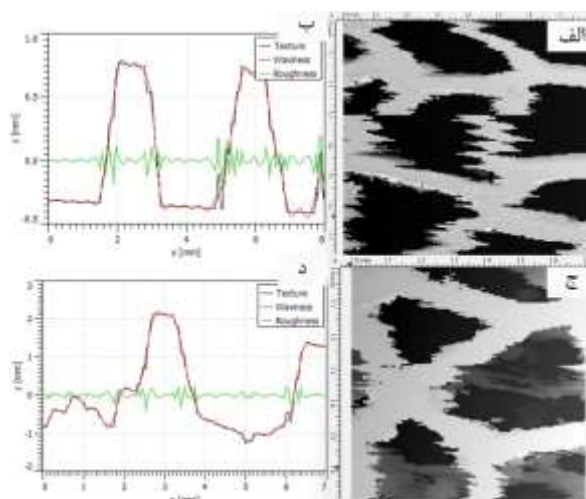
(سطح و دیواره‌های سلولی)، بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی روبشی برای آن‌ها انجام گرفت. تحقیقات انجام شده بر روی پدیده فرسایش نشان می‌دهد که در زوایای ضربه و اندازه ذرات ساینده بزرگ‌تر، انرژی کرنش الاستیک به اندازه کافی بالا است و از انرژی کرنش مواد هدف فراتر می‌رود که باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه‌های تحت آزمون می‌شود [۲۶].



شکل (۱۳): تصاویر SEM سطح نمونه بالک: الف) قبل آزمون فرسایش، ب) پس آزمون فرسایش.

تصاویر SEM به دست آمده از سطح نمونه‌ها در تحقیق حاضر، تغییر شکل پلاستیک را در سطح نمونه‌های بالک (شکل ۱۳) و متخلخل (شکل ۱۴)، پس آزمون فرسایش نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد زمانی که ذرات ساینده به هدف برخورد می‌کنند، نیروی ضربه را می‌توان به دو جزء تقسیم کرد: یکی موازی با سطح ماده (F_p) و دیگری عمود بر سطح ماده (F_v). با تغییر زاویه برخورد ذرات به سمت 90° ، اثرات F_p کمتر شده و

۲۸۰-۳۲۰ میکرون تحت فرسایش بوده‌اند (۴/۱۹ میکرون)، بیشتر از نمونه‌ای است که با ذرات ۱۸۰-۲۲۰ میکرون فرسایش یافته است (۲/۳۷ میکرون). تغییرات زبری سطح در نمونه‌های فومی و نمونه‌های بالک از روند یکسانی تبعیت می‌کنند به این معنا که در هر دو حالت (بالک و متخلخل) با افزایش اندازه ذرات ساینده، زبری سطحی افزایش یافته است؛ اما نتایج به دست آمده از میزان نرخ سایش (شکل ۹) برای نمونه‌های فومی معکوس نتایج زبری سنجی به دست آمده برای همان نمونه در شکل (۱۲) می‌باشد.



شکل (۱۲): نتایج به دست آمده آزمون پروفیلومتری نمونه متخلخل ۷ ppi الف و ب) تصویر دو بعدی به همراه نمودار زبری سنجی سطح تحت سایش با ذرات ساینده ۱۸۰-۲۲۰ میکرون، ج و د) تصویر دو بعدی به همراه نمودار زبری سنجی سطح تحت سایش با ذرات ساینده ۳۲۰-۲۸۰ میکرون.

مقایسه نتایج حاصل آزمون زبری سنجی با نمودارهای نرخ فرسایش (شکل ۹) برای نمونه‌های فومی، نشان‌دهنده اثر چشم‌گیر ساختار متخلخل در تغییر رفتار فرسایش می‌باشد. آزمون پروفیلومتری، تنها قادر به بررسی زبری سطحی در نمونه‌ها می‌باشد و نمی‌تواند اثرات فرسایشی ایجاد شده در لایه‌های زیرین را نشان دهند. از این رو روند مشابهی از نظر زبری سطحی، در نمونه‌های متخلخل با نمونه‌های بالک مشاهده می‌شود. به منظور بررسی اثرات ذرات ساینده بر کل حجم نمونه

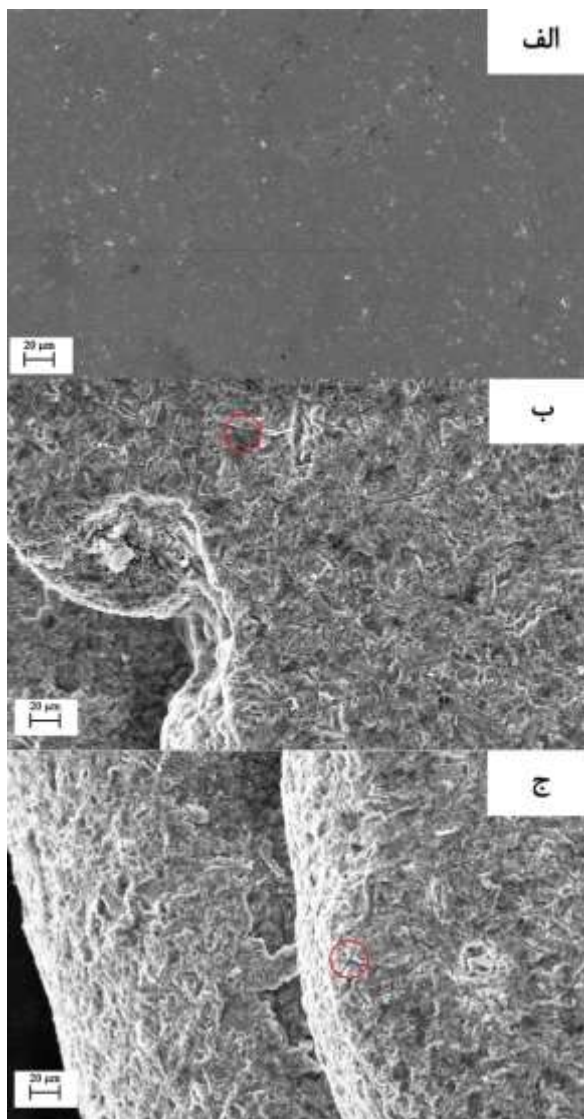
اثرات F_v که منجر به مکانیسم فرورفتگی^{۲۷} سطح می‌شود، افزایش می‌یابد [۲۷].

زاویه برخورد ذرات ساینده با سطح در نمونه‌های بالک 90° می‌باشد، اما اثرات مکانیسم ریزبرش^{۲۸} نیز به صورت محدودی در سطح نمونه‌های بالک مشاهده می‌شود (دایره قرمز در شکل ۱۳). در زاویه برخورد 90° ، در حالت ایده آل هیچ جزء افقی از نیروی ناشی از برخورد ذرات ساینده با سطح نباید وجود داشته باشد، بنابراین پیش‌بینی می‌شود ریزبرش‌های ایجاد شده یا ناشی از حرکت پراکنده برخی از ذرات ساینده و یا ناشی از برخورد ذرات برگشتی از سطح با ذرات ورودی می‌باشد که باعث انحراف آن‌ها از محور اصلی نازل و در نتیجه برخورد با سطح در زوایای کمتر از 90° بشود [۴، ۲۶].

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به دست آمده از نمونه‌های متخلخل نشان می‌دهد اثرات ضربه ناشی از برخورد ذرات ساینده علاوه بر سطح نمونه‌ها، در دیواره‌های سلولی نیز وجود دارد (شکل ۱۴ د)، همچنین در شکل (۱۴) دیده می‌شود که اثرات ریز برش در نمونه‌های متخلخل، چه در سطح و چه در دیواره‌های سلولی بسیار بیشتر از نمونه بالک می‌باشد (ریزبرش‌ها با دایره قرمز نشان داده شده‌اند). به دلیل هندسه نامنظمی که ساختارهای ورونئی در نمونه‌های فومی مورد بررسی در کار حاضر دارند، دیواره‌های سلولی در زوایای مختلفی در حجم نمونه‌های متخلخل قرار گرفته‌اند که باعث می‌شود ذرات ساینده با زوایای مختلفی (بین 0° تا 90°) با دیواره‌های سلولی برخورد کنند و چون با کمتر شدن زاویه برخورد ذرات ساینده با سطح، میزان فرسایش افزایش می‌یابد؛ لذا میزان کاهش جرم (شکل ۸) و نیز نرخ سایش (شکل ۹) در نمونه‌های متخلخل بیشتر از نمونه‌های بالک خواهد بود که این اثر با افزایش تعداد سلول‌ها و نسبت سطح به حجم در نمونه‌های متخلخل، شدت می‌گیرد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، فوم‌های سلول باز ورونئی توسط افزونه گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو و در سه اندازه سلول مختلف ۴/۳



شکل (۱۴). تصاویر SEM نمونه متخلخل: الف) سطح نمونه قبل آزمون فرسایش، ب) سطح نمونه بعد آزمون فرسایش، ج) دیواره سلول پس آزمون فرسایش.

با توجه به تصاویر SEM به دست آمده از سطح نمونه‌های بالک و متخلخل در کار حاضر، می‌توان ادعا کرد که بیشترین مکانیسم فرسایشی مشاهده شده در نمونه‌های تحت آزمون از نوع فرورفتگی می‌باشد که ناشی از نیروهای عمودی وارد شده به سطح در اثر برخورد ذرات ساینده است. به علاوه، با این که

می‌یابد که ناشی از فرسایش سطح در اثر مکانیسم فرورفتگی و مقدار کمی ریزبرش می‌باشد.

- در نمونه‌های متخلخل با افزایش اندازه ذرات ساینده میانگین زبری سطح از ۲/۳۷ میکرون به ۴/۱۹ میکرون افزایش می‌یابد که ناشی از فرسایش در اثر مکانیسم‌های فرورفتگی و ریزبرش می‌باشد.

۵- منابع

[1] R. Tarodiya & A. Levy, "Surface erosion due to particle-surface interactions-A review", Powder Technology, vol. 387, pp. 527-559, 2021

[۲] ح. کشاورزبان، م. جباری و م. سهیلی، "تأثیر پارامترهای دینامیکی و ناخالصی سیال در سایش پروانه‌های کمپرسورهای گریز از مرکز انتقال گاز با روش‌های تجربی و تحلیلی"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹، شماره ۱۱، صفحه ۲۶۴۵-۲۶۵۱، ۱۳۹۸.

[3] K. Alagarraja, B. Vijaya Ramnath, A. Rajendra Prasad, E. Naveen & N. Ramanan, "Wear behaviour of foam and fiber based sandwich composite-A review", Materials Today: Proceedings, Vol. 46, no. 9, pp. 3919-3923, 2021.

[4] V. B. Nguyen, Q. B. Nguyen, Y. W. Zhang, C. Y. H. Lim & B. C. Khoo, "Effect of particle size on erosion characteristics", Wear, vol. 348-349, pp. 126-137, 2016.

[5] P. G. Ranjith, Y. Liu, J. Wei & X. Liu, "Effect of abrasive mass flow on the abrasive acceleration and erosion rates of abrasive gas jets", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 52, no. 9, pp. 3085-3102, 2019.

[6] M. Patel, A. Kumar, B. Pardhi & M. Pal, "Abrasive, erosive and corrosive wear in slurry pumps-A review", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 7, no. 3, pp. 2188-2195, 2020.

[۷] م. محمدی سراسیا، ح. عجم و ا. مولودی، "بررسی تأثیر قرار دادن محیط متخلخل بر عملکرد رگلاتورهای تقلیل فشار گاز با رویکرد کاهش نوفه جریانی"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۲۱، شماره ۷، صفحه ۴۲۹-۴۳۹، ۱۴۰۰.

میلی‌متر (نمونه ۵ ppi)، ۳/۵ میلی‌متر (نمونه ۷ ppi) و ۲/۶ میلی‌متر (نمونه ۱۰ ppi) طراحی شدند. سپس فوم‌های پلیمری با تکنیک ساخت افزودنی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی و فوم‌های فلزی توسط روش ریخته‌گری دقیق با استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ساخته شدند. با توجه به کاربرد فوم‌های سلول باز به‌عنوان کاهش‌دهنده صدا در خطوط تقلیل فشار گاز و همچنین با در نظر داشتن اینکه تخریب ناشی از فرسایش با ذرات ساینده، یکی از عوامل اصلی تخریب قطعات به‌کاررفته در مسیر جریان گاز می‌باشد، آزمون‌های فرسایشی در دو محدوده اندازه ذره ساینده مختلف ۱۸۰-۲۲۰ میکرون و ۲۸۰-۳۲۰ میکرون بر روی نمونه‌های متخلخل و نمونه‌های بالک انجام گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- در اثر انجام عملیات حرارتی T6 فازهای یوتکتیک مرزخانه‌ای تبدیل به فازهای جدا از هم شده و فازهای کروی آن با ترکیب Mg-Zn در زمینه تشکیل می‌شوند که باعث افزایش سختی نمونه‌ها از ۱۴۵ Hv به ۲۲۳/۷ Hv می‌شود.

- با افزایش اندازه ذرات ساینده از ۱۸۰-۲۲۰ میکرون به ۳۲۰-۲۸۰ میکرون، شدت فرسایش در نمونه‌های فومی کاهش و در نمونه بالک، افزایش می‌یابد.

- به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه ذرات ساینده نسبت به مقدار کمینه اندازه حفرات در نمونه‌های متخلخل (۱۴۰ میکرون در نمونه ۵ ppi، ۹۳ میکرون در نمونه ۷ ppi و ۷۴ میکرون در نمونه ۱۰ ppi)، هرچه اندازه ذرات ساینده بزرگ‌تر می‌شود احتمال به دام افتادن آن‌ها در سلول‌ها بیشتر بوده و در نتیجه نرخ فرسایش کمتر است.

- با افزایش نسبت سطح به حجم در نمونه‌های متخلخل (نمونه ۱۰ ppi < نمونه ۷ ppi < نمونه ۵ ppi)، به دلیل برخورداری بیشتر ذرات ساینده با سطح و لذا انتقال بیشتر انرژی، نرخ فرسایش و نیز میزان کاهش جرم افزایش می‌یابد.

- با افزایش اندازه ذرات ساینده میانگین زبری سطح در نمونه‌های متخلخل از ۱/۸۳ میکرون به ۲/۴۴ میکرون افزایش

- [17] م. قبادی و م. آریانا، "بررسی پدیده سایش در خطوط لوله گاز توسط قطرات سیال و ذرات شن"، در اولین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در علوم پایه و فنی و مهندسی، ۱۳۹۵.
- [18] T. S. Khan & M. S. "Al-Shehhi, Review of black powder in gas pipelines—An industrial perspective", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 25, pp. 66-76, 2015.
- [19] A. International, "ASTM G76-04: Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets", ASTM International, 2004.
- [20] Chowdhury, M.A., et al., "Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 230, on, 12, pp. 1516-1541, 2016.
- [21] A. C. Kak & M. Slaney, "Principles of computerized tomographic imaging", *Classics in Applied Mathematics*, 2001.
- [22] K. Tong, Y. Kong, L. Yang & X. Du, "Boost of photodegradation performances by adoption of semi-transparent open cell foam substrates via numerical simulation", *Chemical Engineering Journal*, vol. 427, pp. 130920, 2022.
- [23] A. Misra & I. Finnie, "On the size effect in abrasive and erosive wear", *Wear*, vol. 65, no. 3, pp. 359-373, 1981.
- [24] H. Eaton & R. Novak, "Particulate erosion of plasma-sprayed porous ceramic", *Surface and Coatings Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 41-50, 1987.
- [25] A. A. Erdoğan, E. Feyzulloğlu, S. Fidan & T. Sinmazcelik, "Investigation of erosive wear behaviors of AA6082-T6 aluminum alloy", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 234, no. 3, pp. 520-530, 2020.
- [26] P. C. Okonkwo, M. H. Sliem, M. H. Sk, R. Abdul Shakoor, M. A. Mohamed, A. M. Abdullah & R. Kahraman, "Erosion behavior of API X120 Steel: Effect of particle speed and impact angle", *Coatings*, vol. 8, no. 10, pp. 343, 2018.
- [8] C. Xu & Y. Mao, "Passive control of centrifugal fan noise by employing open-cell metal foam", *Applied Acoustics*, vol. 103, pp. 10-19, 2016.
- [9] L. P. Lefebvre, J. Banhart & D. C. Dunand, "Porous metals and metallic foams: current status and recent developments", *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, no. 9, pp. 775-787, 2008.
- [10] D. Chen, S. Kitipornchai & J. Yang, "Dynamic response and energy absorption of functionally graded porous structures", *Materials & Design*, vol. 140, pp. 473-487, 2018.
- [11] S. E. Al-Lubani & A. I. Ateyat. "Double aging of heat-treated aluminum alloy of (7075) and (6061) to increase the hardness number", In *Advanced Problems in Mechanics: Proceedings of the XLVII International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics"*, June 24-29, 2019, St. Petersburg, Russia. 2020. Springer.
- [12] N. Mahathaninwong, T. Plookphol, J. Wannasin & S. Wisutmethangoon, "T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 532, pp. 91-99, 2012.
- [13] S. Pour-Ali & M. Etminanfar, "Metallurgical failure analysis of an axial gas flow valve: the erosion of valve cage closures", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 21, no. 4, pp. 1154-1163, 2021.
- [14] D. Han & T. Shen, "Research on Anti-erosion Performance and Application of Metal Foam", *Academic Journal of Materials & Chemistry*, vol. 4, no. 1, doi: 10.25236/AJMC.2023.040101. 2023.
- [15] Y. I. Oka, K. Okamura & T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation", *Wear*, vol. 259, no. 1-6, pp. 95-101, 2005.
- [16] X. I. Zou, Y. Hong & X. H. Chen, "Evolution of second phases and mechanical properties of 7075 Al alloy processed by solution heat treatment", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, no. 10, pp. 2146-2155, 2017.

[11] Oka et al
 [12] Black Powder
 [13] Voxel
 [14] Basic Programming for Computable Functions
 [15] Filtered Back Projection
 [16] Algebraic Reconstruction Technique
 [17] Maximum Likelihood Expectation Maximization
 [18] Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
 [19] Feldkamp-Davis-Kress
 [20] Strut
 [21] Pores
 [22] Window
 [23] Misra & Finnie
 [24] Nguyen et al
 [25] Eaton & Novak
 [26] Erdoğan et al
 [27] Indenting
 [28] Microcutting

[27] A. Harsha, U. Tewari & B. Venkatraman, "Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites", Wear, vol. 254, no. 7-8, pp. 693-712, 2003.

۶- پی نوشت

[1] Erosion
 [2] Xu & Mao
 [3] Chen et al
 [4] Rhino
 [5] Grasshopper Plugin
 [6] Zbrush
 [7] Mesh Mixer
 [8] Simplify 3D
 [۹] فایل ورودی دستگاه‌های چاپگر سه‌بعدی از نوع G-code است.
 [10] Lost Wax Casting