

Design and Characterization of SLM-Fabricated Graded Gyroid Ti-6Al-4V Porous Filters for Respiratory Applications

Amir Mohammad Babaei ^{a*}, Mehdi Safari ^b, Mohammad Reza Karafi ^c

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Babaei A M, Safari M, Karafi M. Design and Characterization of SLM-Fabricated Graded Gyroid Ti-6Al-4V Porous Filters for Respiratory Applications. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):383-402.

 <https://10.66224/masm.5.3.383>

KEYWORDS

Respiratory Filter,
Additive Manufacturing,
Gyroid Topology,
Density.

ABSTRACT

Airborne particulate matter, such as fine dust and aerosols, poses serious threats to respiratory health. Conventional polymer filters suffer from limited reusability and sterilization challenges. This study presents the design, fabrication via Selective Laser Melting (SLM), and characterization of a cylindrical porous filter made from Ti-6Al-4V alloy with a graded conformal Gyroid topology. The structure features graded channel spacings (inner wall: 206 μm , mid-region: 396 μm , outer wall: 463 μm ; weighted mean: 415 μm) and an effective open porosity of ~65%. The design was optimized in nTopology software to enhance cell overlap and particle trapping while maintaining airflow permeability. The sample (OD=15 mm, ID=9 mm, H=10 mm) was fabricated from Ti-6Al-4V powder (15–45 μm) and characterized after stress-relief annealing at 600°C. Results include optical metallography (acicular α phase in β matrix), metallographic measurements (mean layer spacing of 415 μm), Vickers microhardness (mean 327 HV), bulk density (4.18 g/cm³), and bulk porosity (~5.5%).

Extended Abstract

1. Introduction

Atmospheric particulate matter, viruses, and bacteria pose severe threats to respiratory health, particularly in urban environments and during infectious outbreaks. These factors underscore the need for efficient, reusable filters for masks and ventilators [1-3]. Conventional polymer filters, such as melt-blown polypropylene used in N95 masks, exhibit excellent particle trapping but suffer from moisture degradation, poor mechanical strength, and sterilization difficulties for multi-use applications [4, 5]. In contrast, porous metallic filters, specifically Ti-6Al-4V titanium alloys, offer superior biocompatibility, corrosion resistance, thermal stability, and inherent antibacterial properties due to surface TiO₂ layers [6, 7].

Selective Laser Melting (SLM), a prominent metal Additive Manufacturing (AM) technique, enables the fabrication of complex porous topologies—such as Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)—that are unattainable through traditional powder metallurgy [8, 9]. Previous studies on Gyroid structures in Ti-6Al-4V have primarily focused on orthopedic implants, reporting porosities of 50-80% and channel spacings of 200-600 μm with bone-like stiffness (2-10 GPa) [13, 14]. However, the adaptation for respiratory filtration—requiring graded

* Corresponding author. Tel.: +98 9187585035

E-mail address: a.babaei@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.383>

Received: September 23, 2025; Received in revised form: October 22, 2025; Accepted: October 24, 2025.

© Author



channel spacings ($\sim 200\text{--}479\text{ }\mu\text{m}$) and cell overlaps to create tortuous filtration paths—remains insufficiently explored.

2. Materials and Methods

2.1. Design and Fabrication

A hollow cylindrical porous filter was designed with a conformal Gyroid topology (15 mm OD, 9 mm ID, 10 mm height). The lattice was generated using nTopology software, where the cell size gradient was adjusted to yield specific graded channel spacings. This design ensures higher overlap in the inner regions to provide complex trapping paths while maintaining permeability in the outer regions 28. The target effective porosity was set at 65–70%.)

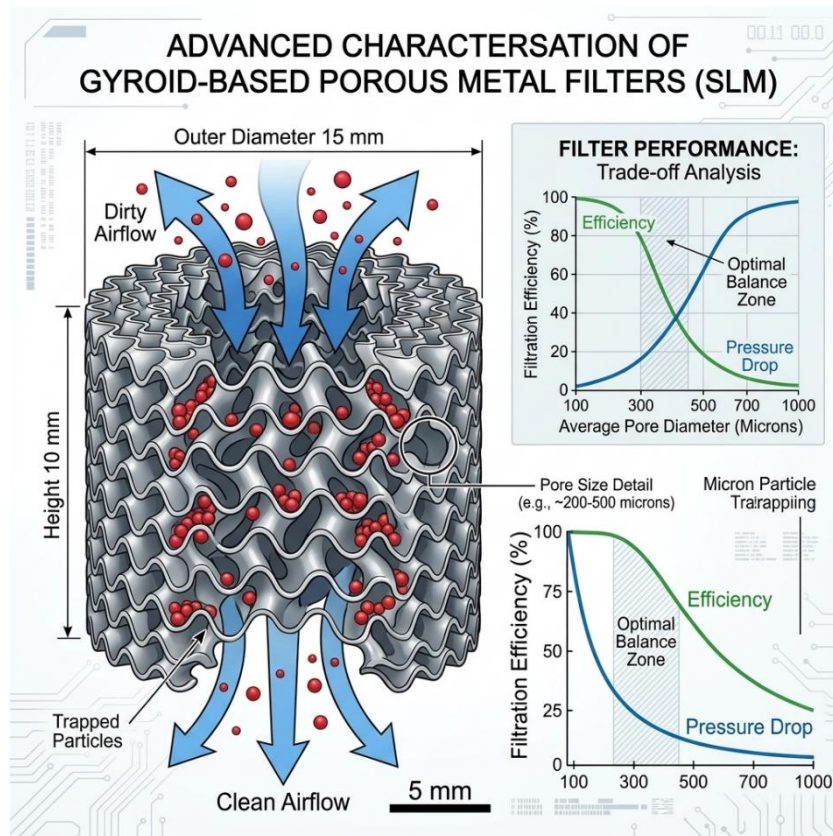


Figure 1. Schematic of the designed sample, airflow path, and geometric dimensions.

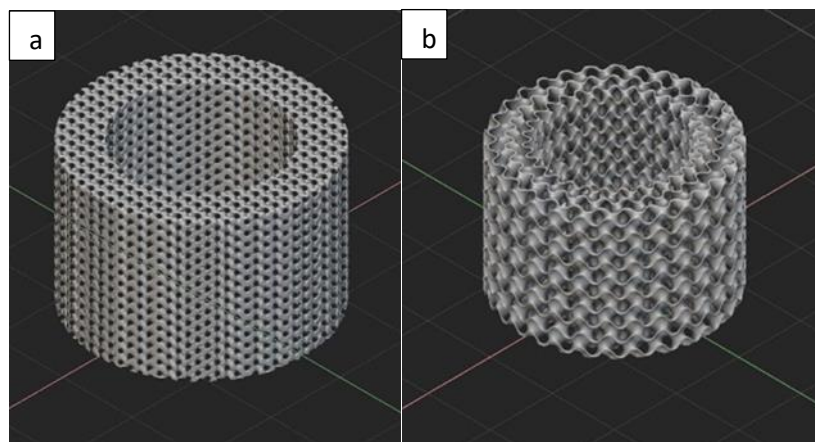


Figure 2. Comparison between (a) Non-uniform/Graded and (b) Uniform Gyroid lattice designs.

The SLM process utilized an Nd

laser system with parameters detailed in Table 1. Post-fabrication, samples underwent ultrasonic cleaning in isopropyl alcohol followed by vacuum stress relief at 600°C for 2 hours 30.

Table 1. SLM fabrication parameters for Ti-6Al-4V porous filters.

Build Plate Temperature	Hatch Distance	Layer Thickness	Scanning Speed	Laser Power
~80 °C	100 µm	30 µm	800mm/s	200W

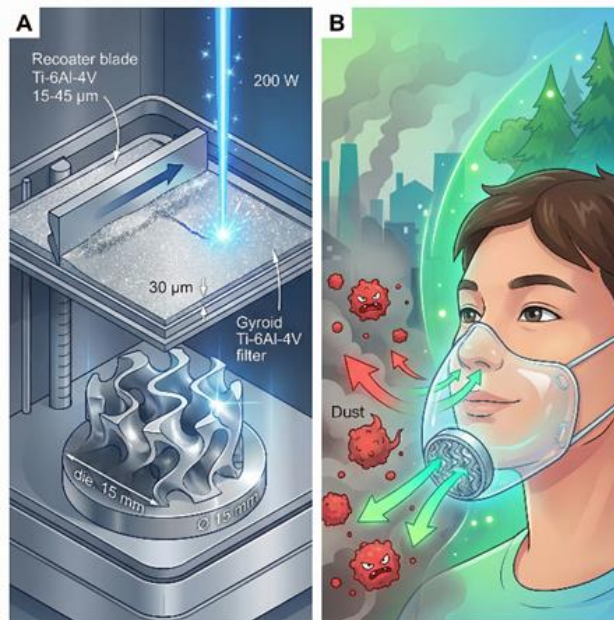


Figure 3. (a) Orientation of filters on the SLM build plate; (b) Integration of the designed filter onto a respiratory mask.

2.2. Powder Morphology

Spherical Ti-6Al-4V (Grade 5) powder with a particle size range of 15–45 µm was employed. SEM/OM analysis confirmed high sphericity and smooth surfaces, ensuring uniform melting and high density (~2.6 g/cm³ apparent).

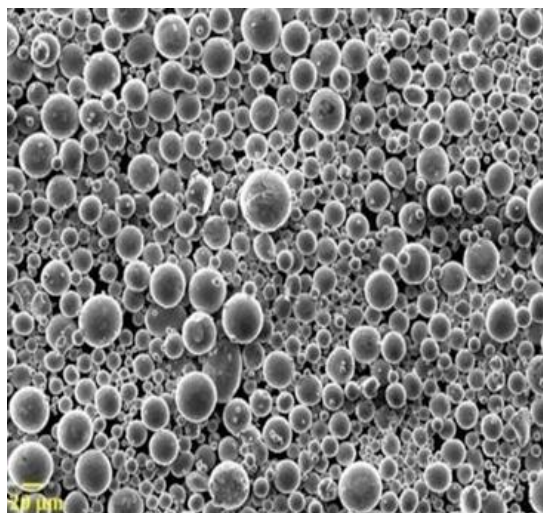


Figure 4. Spherical morphology of the Ti-6Al-4V powder particles [31]

2.3. Characterization and Metallography

Microstructural analysis was performed using an Olympus BX optical microscope (100–1000x). Samples were mechanically polished (320–2000 grit SiC) and chemically etched with 2% HF solution for 30–60 seconds 33. ImageJ software was utilized for pore segmentation and analysis of at least 10 fields of view.

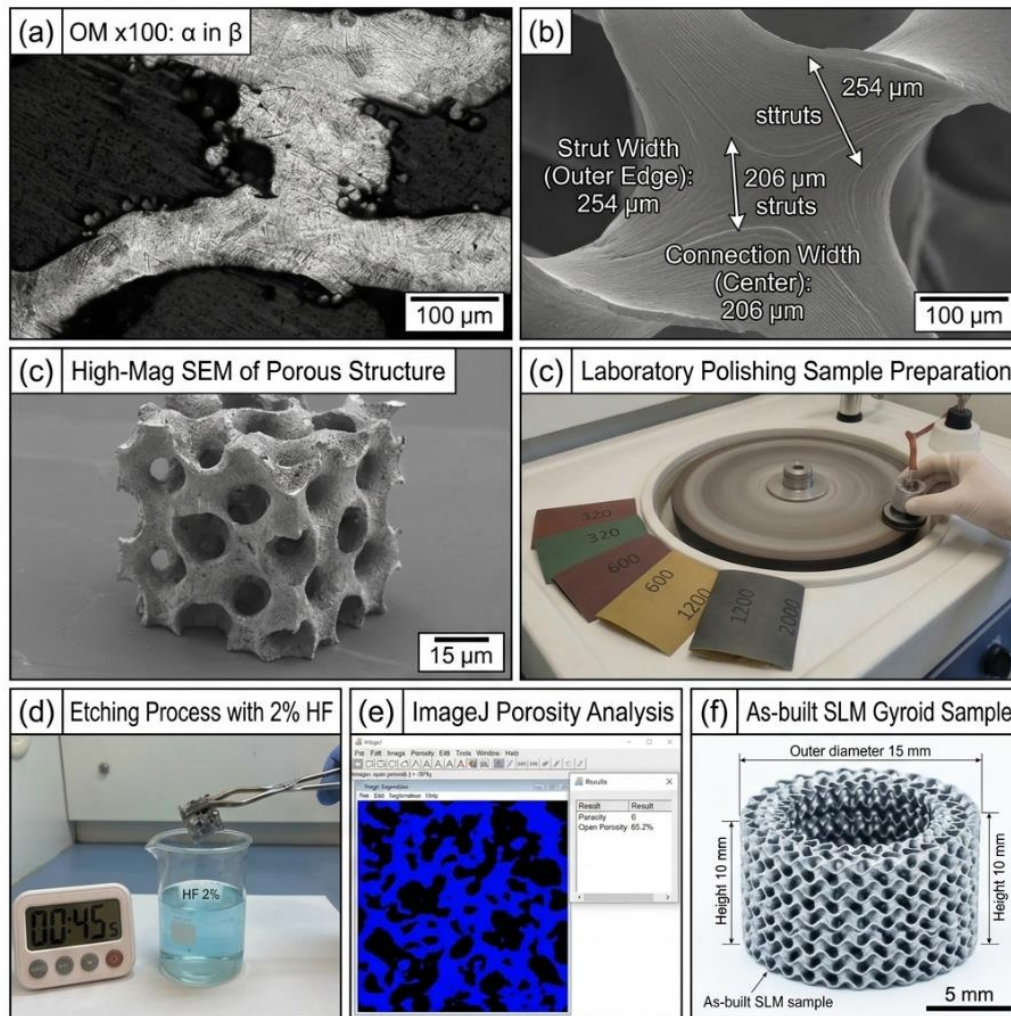


Figure 5. Metallographic preparation: (a) Etched microstructure; (b) Pore measurement; (c-f) Polishing and ImageJ segmentation stages.

2.4. Microhardness and Density

Vickers microhardness was measured using a Zwick/Roell system (100 gf load, 15 s) per ASTM E384. Bulk density and porosity were determined via the Archimedes method (ASTM B925) using isopropyl alcohol.

3. Results and Discussion

3.1. Microstructure and Metallography

Etched OM images revealed a typical SLM-induced $\alpha+\beta$ microstructure with acicular α needles ($\sim 1\text{--}5\ \mu\text{m}$ width) distributed within a β matrix. Metallographic measurements confirmed the graded spacing: $254.38\ \mu\text{m}$ at the inner wall, $254.48\ \mu\text{m}$ in the center, and $479\ \mu\text{m}$ at the outer wall (mean $\sim 415\ \mu\text{m}$).

3.2. Mechanical and Physical Properties

The average Vickers hardness was 327 HV, aligning with the acicular α phase and the density of the SLM structure. The strut overlap in the inner regions reinforces local hardness by minimizing lack-of-fusion defects. Archimedes density was recorded at $4.2\ \text{g/cm}^3$, with a bulk porosity of $\sim 5\%$, indicating a high degree of consolidation.

The results demonstrate that the graded Gyroid topology effectively balances permeability and filtration. While the current effective pore size ($\sim 50\text{--}100\ \mu\text{m}$) is suitable for coarse particulate matter, secondary coatings (e.g., TiO_2) are required to reach the sub- $5\ \mu\text{m}$ range necessary for virus-level filtration.

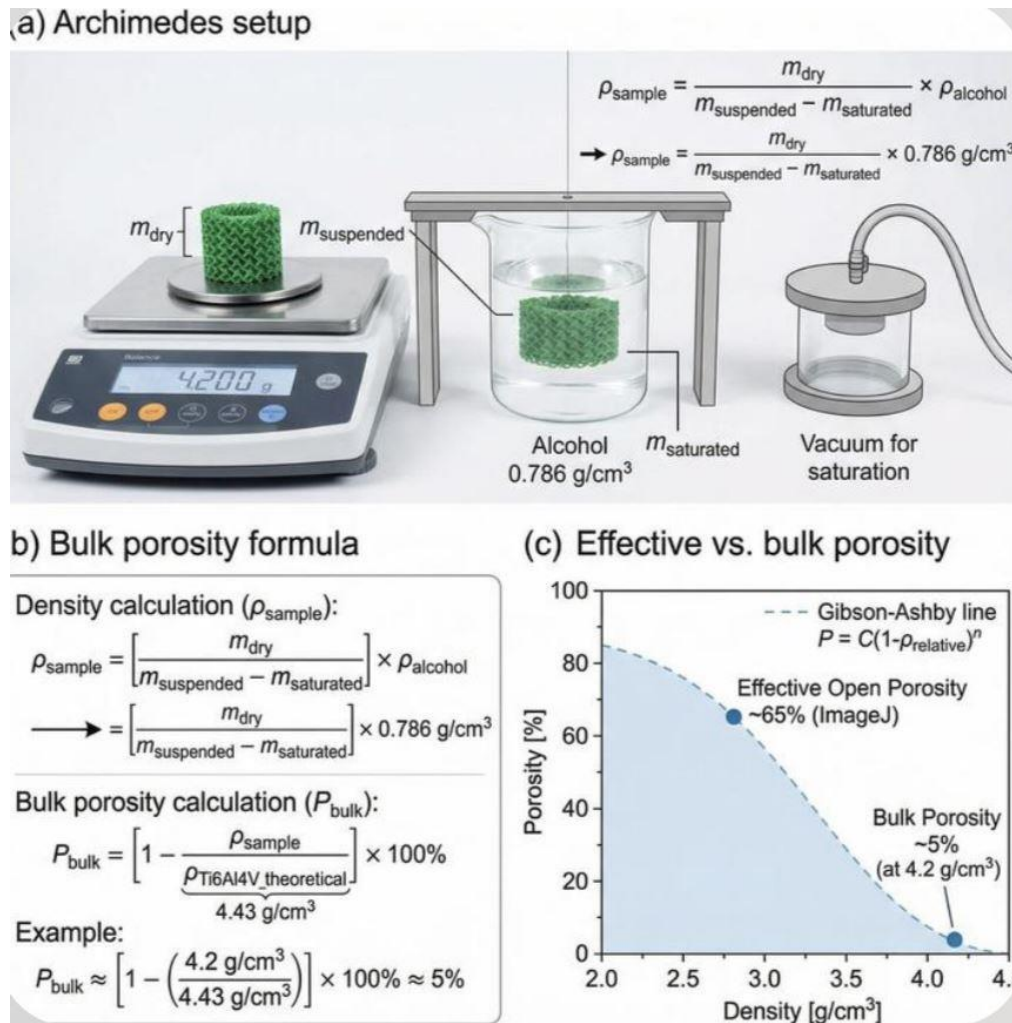


Figure 7. (a) Archimedes density test setup; (b) Porosity calculation formulas; (c) Effective vs. Bulk porosity correlation

4. Conclusion

This study presented the successful design and SLM fabrication of a graded Ti-6Al-4V Gyroid filter. Key findings include:

Conformal Gyroid design achieves graded spacings (200–479 μm) providing a tortuous path for enhanced trapping.

The microstructure consists of an acicular α phase with a robust hardness of 327 HV, ensuring durability under respiratory pressures.

An effective open porosity of ~65% was confirmed, while bulk porosity remained low (~5%), validating the SLM process quality.

The structural integrity and biocompatibility of the Ti-6Al-4V Gyroid lattice provide a practical framework for developing reusable PPE in resource-constrained environments



طراحی و ویژگی‌شناسی فیلتر تنفسی متخلخل جابروئیدی از آلیاژ Ti-6Al-4V ساخته‌شده به روش SLM

امیرمحمد بابائی^{الف*}، مهدی صفری^ب، محمدرضا کرفی^ج

^{الف} دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، a.babaei@arakut.ac.ir

^ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.safari@arakut.ac.ir

^ج دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، karafi@modares.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
فیلتر تنفسی، ساخت افزایشی، جابروئید، چگالی.	ذرات معلق هوایی، مانند ریزگردها، تهدید جدی برای سلامت تنفسی ایجاد می‌کنند. فیلترهای پلیمری متداول محدودیت‌هایی در قابلیت استفاده مجدد و استریل‌سازی دارند. در این پژوهش، طراحی، ساخت به روش ذوب انتخابی لیزر (SLM) و ویژگی‌شناسی یک فیلتر استوانه‌ای متخلخل از آلیاژ Ti-6Al-4V با توپولوژی جابروئید کانفورمال گرادیان دار انجام شد. ساختار شامل شبکه‌های جابروئید با فواصل کانال گرادیان دار (دیواره داخلی ۲۰۶ میکرومتر، مرکزی ۳۹۶ میکرومتر، خارجی ۴۶۳ میکرومتر؛ میانگین وزنی ۴۱۵ میکرومتر) و تخلخل مؤثر ۶۵٪ است. طراحی با نرم‌افزار nTopology بهینه‌سازی شد تا همپوشانی سلول‌ها و رهگیری ذرات را افزایش و نفوذپذیری جریان را حفظ کند. نمونه (قطر خارجی ۱۵ میلی‌متر، داخلی ۹ میلی‌متر، ارتفاع ۱۰ میلی‌متر) با پودر (Ti-6Al-4V) ساخته و پس از تنش‌زدایی (C ۶۰۰°) مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج شامل میکروسکوپ نوری (توزیع α سوزنی در زمینه β)، متالوگرافی (میانگین فاصله لایه‌ها ۴۱۵ میکرومتر)، سختی ویکرز (میانگین ۳۲۷ HV)، چگالی بدنه ($4/18 \text{ g/cm}^3$) و تخلخل بدنه (۵.۵٪) بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲	

۱- مقدمه

آلودگی ذرات معلق هوایی، ویروس‌ها و باکتری‌ها تهدیدهای جدی برای سلامت تنفسی ایجاد می‌کنند، به ویژه در محیط‌های شهری و دوران شیوع بیماری‌ها. این عوامل نیاز به فیلترهای کارآمد و قابل استفاده مجدد در ماسک‌ها و ونتیلاتورها را برجسته می‌سازد [۱-۳]. فیلترهای پلیمری متداول مانند پلی‌پروپیلن ذوب‌شده در ماسک‌های N95، در به‌دام‌انداختن ذرات عملکرد مناسبی دارند اما محدودیت‌هایی مانند تخریب در محیط مرطوب، مقاومت مکانیکی پایین و دشواری استریل‌سازی، استفاده مجدد از آن‌ها را با چالش مواجه ساخته است [۴، ۵]. در مقابل، فیلترهای فلزی متخلخل، به ویژه از آلیاژهای تیتانیوم مانند Ti-6Al-4V، زیست‌سازگاری برتر، مقاومت به خوردگی، پایداری حرارتی و خواص ذاتی آنتی‌باکتریال به دلیل لایه‌های سطحی TiO_2 را ارائه می‌دهند [۶، ۷]. این ویژگی‌ها Ti-6Al-4V را برای فیلتراسیون زیست‌پزشکی ایده‌آل می‌کند، جایی که دوام تحت بارهای چرخه‌ای و سهولت اتوکلاو حیاتی است. پیشرفت‌های ساخت فلزی افزایشی (AM^1)، به ویژه ذوب انتخابی با لیزر (SLM)، امکان ساخت توپولوژی‌های متخلخل پیچیده را فراهم می‌کند که با روش‌های سنتی مانند متالورژی پودر یا سینترینگ غیرقابل

¹ Additive Manufacturing

دستیابی اند [۸، ۹]. SLM با ذوب لایه به لایه پودرهای فلزی، کنترل دقیق بر تخلخل، توزیع فواصل کانال و هندسه شبکه را امکان پذیر می سازد [۱۰، ۱۲]. مطالعات بر روی TPMS^۱ جاپروئید در Ti-6Al-4V، عمدتاً برای ایمپلنت های ارتوپدی، تخلخل های ۸۰-۵۰٪ و فواصل کانال ۶۰۰-۲۰۰ μm را گزارش کرده اند. این ساختارها سختی شبیه به استخوان ۱۰-۲ GPa را دستیابی می کنند [۱۳، ۱۴]. فیلترهای متخلخل فلزی، به ویژه از آلیاژهای تیتانیوم، به عنوان جایگزین های دوام دار برای فیلترهای پلیمری در تجهیزات حفاظت فردی (PPE) مورد توجه قرار گرفته اند. کتان و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۰ روی ساختارهای جاپروئید در Ti-6Al-4V با SLM کار کردند و تخلخل ۶۵-۷۵ درصد با خواص مکانیکی ایزوتروپیک ۴-۶ GPa به دست آوردند، که برای ایمپلنت های ارتوپدی مناسب بود. یان و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۸ ساختارهای جاپروئید را در Ti-6Al-4V با SLM بررسی کردند و تخلخل ۵۰-۸۰٪ با سختی ۳۲۰~HV و فواصل ۲۰۰~۵۰۰ μm را گزارش دادند، اما چالش های پشتیبانی در چاپ را برجسته کردند. رحمتی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۱ ساختارهای جاپروئید و دیاموند^۲ را در Ti-6Al-4V برای داربست های استخوانی^۳ آزمایش کردند و جاپروئید را با ۷۰~٪ تخلخل و استحکام فشاری ۱۵-۱۰ MPa برتر یافتند، که استخوان سازی را بهبود می بخشد. لیو و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ سطح TiO₂ روی porous Ti-6Al-4V را برای خواص آنتی باکتریال بهینه کردند و کاهش ۹۰٪ رشد باکتری E. coli را با coating نازک ۱۰-۵۰ nm مشاهده کردند، که برای فیلترهای تنفسی ایده آل است. لیماها و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۲ Ti-6Al-4V را مرور سیستماتیک کردند و متوسط سختی ۳۰۰-۳۵۰ HV با تخلخل ظاهری ۵-۱۵ درصد را گزارش دادند، اما فاصله در منافذ درجه بندی شده برای فیلتراسیون را شناسایی کردند. منتزریان [۱۸] در سال ۲۰۲۱ جریان در محیط متخلخل جاپروئیدی را با CFD مدل کردند و تخلخل ۱/۵~۲ را برای فواصل ۵۰۰~۳۰۰ μm یافتند، که اندازه منافذ مؤثر را ۳۰-۵۰٪ کاهش می دهد. وانگ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۳ فیلترهای فلزی TPMS برای به دام انداختن ویروس را در آلیاژ تیتانیوم بررسی کردند و جاپروئید با تخلخل ۷۰~٪ را با به دام انداختن ۷۰~٪ ذرات ۵ μm < برتر دانستند، مطالعاتی که توسط جمعه و همکاران [۲۲] در سال (۲۰۲۴) انجام شده است، به بررسی تأثیر تخلخل بر رفتار مکانیکی ساختارهای متخلخل ساخته شده از آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از فرآیند ذوب لیزری انتخابی (SLM) پرداخته است. یک مدل عددی سه بعدی المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS توسعه داده شد تا تأثیر میزان تخلخل (۶۳/۸٪ تا ۷۶/۶٪) بر خواص مکانیکی این ساختارها ارزیابی شود. ژانگ و همکاران [۲۳] انجام شده است، به بررسی عملکرد ایمپلنت های فمور Ti-6Al-4V که با استفاده از بهینه سازی فرآیند ذوب لیزری انتخابی (SLM) تولید شده اند، پرداخته اند. پارک و همکاران [۲۴] پارامترهای SLM برای Ti-6Al-4V را با استفاده از یادگیری ماشین (شبکه عصبی) برای بهبود چگالی و زبری سطح بهینه سازی کردند.

مدل توسعه یافته دقت $R^2 = 99\%$ را نشان داد و پارامترهای بهینه را با خطای زیر ۴/۴٪ پیشنهاد داد، که می تواند ابزاری برای کاهش هزینه های تولید باشد. یو و همکاران [۲۵] داربست های متخلخل درجه بندی شده CP-Ti را با SLM ساختند (تخلخل ۵۴/۴٪-۷۸/۸٪). داربست P4 با مدول الاستیک ۹/۷ GPa (نزدیک به استخوان) و استحکام تسلیم ۲۵۰/۸ MPa برای بازسازی نقص استخوان مناسب یافت شد، که تعادلی بهینه بین خواص مکانیکی و نفوذپذیری ارائه می دهد. صفری و همکاران [۲۶] با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، اثر توان لیزر، سرعت اسکن و همپوشانی لایه ها بر زبری سطح قطعات Ti-6Al-4V تولید شده توسط SLM را بررسی کردند. کمترین زبری سطح (۱/۴۴ μm) با توان ۱۵۰ W، سرعت ۵۰۰ mm/s و همپوشانی ۶۷/۸ به دست آمد. با این حال، اقتباس ها برای فیلتراسیون - نیازمند فواصل کانال گرادین دار (۴۷۹-۲۰۰ μm) و همپوشانی سلول های جاپروئید برای ایجاد مسیرهای فیلتراسیون مؤثر - کمتر کاوش شده است. اقتباس ساختارهای جاپروئیدی برای فیلتراسیون تنفسی - نیازمند فواصل کانال گرادین دار و همپوشانی سلول ها برای ایجاد مسیرهای فیلتراسیون پرپیچ و خم - کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، هدف اولیه، شناسایی ویژگی های ساختاری و مکانیکی پایه فیلتر جاپروئیدی گرادین دار بود. محدودیت اصلی این مطالعه عدم وجود نمونه شاهد یکنواخت است که ادعای برتری گرادین بر اساس مقایسه کمی با مطالعات معتبر ارزیابی شده است.

^۱ Triply Periodic Minimal Surface

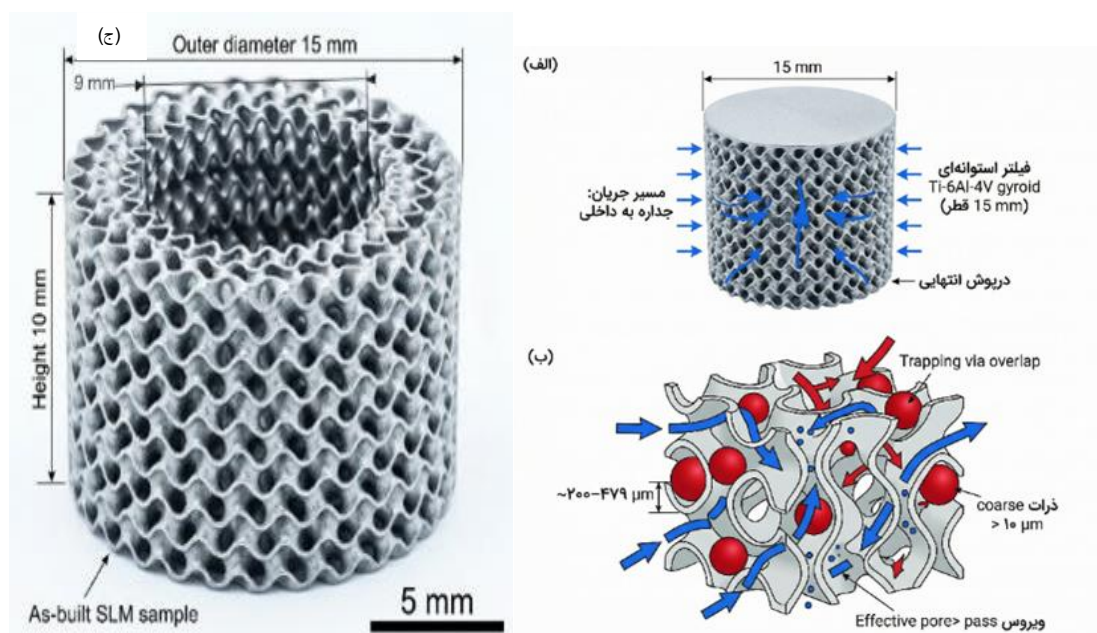
^۲ Diamond

^۳ Scaffolds

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی نمونه و پارامترهای ساخت

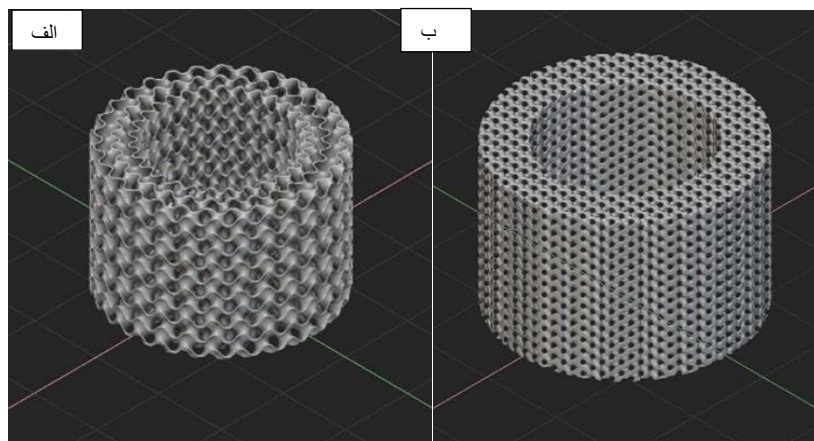
نمونه مورد مطالعه یک استوانه توخالی متخلخل از آلیاژ Ti-6Al-4V (گرید ۵) با توپولوژی جاپروئید کانفورمال است. این نمونه با فرآیند ذوب انتخابی با دستگاه لیزر SLM مدل M-۱۵۰ ساخت شرکت نورآی اصفهان تولید شده و ابعاد آن قطر خارجی ۱۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۹ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. این ابعاد نسبت سطح به حجم مناسب برای فیلتراسیون تنفسی را فراهم می‌کند و تست‌های آزمایشگاهی و ادغام در دستگاه‌ها را تسهیل می‌نماید [۲۵]. در شکل ۱ می‌توان ابعاد و هندسه نمونه طراحی شده و نحوه کار آن را مشاهده کرد. در این مرحله از پژوهش، هدف شناسایی ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی پایه ۱ فیلتر جاپروئیدی گرادیدار بود. پارامترهای SLM ثابت نگه داشته شدند و تمرکز بر ارزیابی تکنمونه‌ای خواص بود. ادعای برتری ساختار گرادیدار نسبت به یکنواخت، در بخش بحث بر اساس مقایسه کمی با مطالعات معتبر ارزیابی شده است. پارامترهای عملیاتی جدول ۱ بر اساس مطالعات پیشین نویسندگان [۲۶] و با هدف دستیابی به حداکثر چگالی و پایداری هندسی در ساختارهای جاپروئید تنظیم گردیدند.



شکل ۱ شماتیک فیلتر تنفسی طراحی شده: (الف) مسیر حرکت جریان هوا از جداره خارجی به سمت مرکز؛ (ب) نحوه فیلتراسیون ذرات در مسیرهای پرپیچ و خم جاپروئیدی؛ (پ) ابعاد هندسی نمونه (H=10 mm, ID=9 mm, OD=15 mm).

طراحی شبکه داخلی با نرم‌افزار nTopology نسخه ۴.۱ انجام شد. شدت گرادیدان اندازه سلول طوری تنظیم گردید تا فواصل کانال مؤثر گرادیدان حاصل شود. این گرادیدان از همپوشانی ساختارهای سلول‌های جاپروئید ناشی می‌شود. این طراحی به نحوی بوده که همپوشانی بیشتر در نواحی داخلی جداره فیلتر، مسیرهای فیلتراسیون پیچیده‌تری برای به دام انداختن ذرات فراهم می‌کند، درحالی‌که نواحی خارجی نفوذپذیری جریان را با ساختار بزرگ‌تر حفظ می‌نماید [۲۸]. تخلخل هدف ۶۵-۷۰ درصد بر اساس شبیه‌سازی‌های اولیه و محدودیت‌های SLM تعیین گردید تا تعادل بین گرفتاری ذرات و مقاومت جریان برقرار شود. در شکل ۲ به خوبی می‌توان نحوه شبکه بندی یکنواخت و غیر یک نواخت طراحی شده را مشاهده و مقایسه کرد.

¹ Baseline Characterization

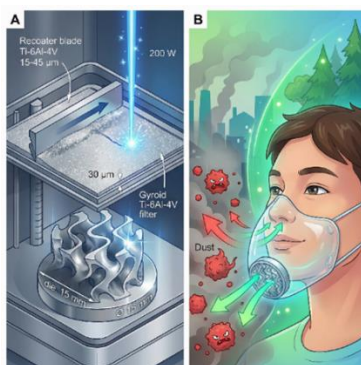


شکل ۲ مقایسه توپولوژی‌های طراحی شده در nTopology: (الف) ساختار جابروئید گرادین دار با فواصل سلولی متغیر از جداره داخلی به خارجی؛ (ب) ساختار جابروئید یکنواخت با فواصل سلولی ثابت.

پارامترهای فرآیند SLM مطابق با قابلیت‌های دستگاه لیزر Nd:YAG، در جدول ۱ آمده است [۲۶]. پس از چاپ، پاک‌سازی اولیه با هوای فشرده و برس نیتروژنی برای خروج پودر آزاد انجام گردید. برای پودرهای محبوس، از لرزش والکل ایزوپروپیل، به مدت ۱۰ دقیقه، استفاده شد تا ساختار جابروئیدی کامل پاک شود سپس نمونه تحت تنش‌زدایی در کوره خلأ در دمای 600°C ، به مدت ۲ ساعت قرار گرفت تا تنش‌های پسماند کاهش یابد [۲۷]. در شکل ۳ نحوه قرارگیری بر روی صفحه پرینت دستگاه ساخت افزایشی و همچنین نحوه طراحی قرارگیری فیلتر روی ماسک‌های تنفسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ پارامترهای دستگاه لیزر مورد استفاده [۲۶]

توان لیزر	مقدار سرعت اسکن لیزر	ضخامت هر لایه	همپوشانی	دمای بستر
۲۰۰ W	۸۰۰ mm/s	۳۰ μm	۱۰۰ μm	80°C

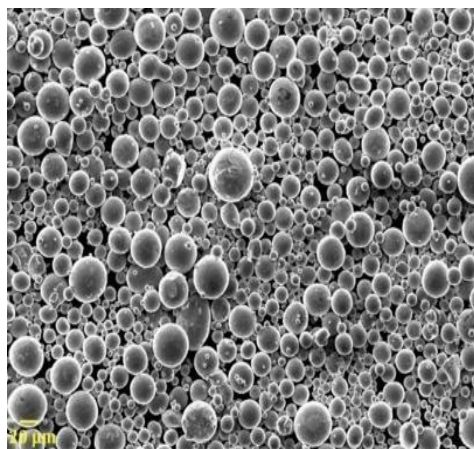


شکل ۳ (A) نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی صفحه ساخت (Build Plate) دستگاه SLM مدل M-۱۵۰ شرکت نورآی اصفهان؛ (B) نحوه ادغام فیلتر طراحی شده بر روی ماسک تنفسی.

۲-۲- مورفولوژی پودر و خواص آن

از پودر Ti-6Al-4V گرید ۵ تأمین شده از شرکت TLS Technik آلمان بامورفولوژی کروی با اندازه ذرات ($15-45\mu\text{m}$) استفاده شده است [۲۸]. تصاویر OM و SEM ذرات کروی با سطح صاف و زبری کمتر از ۱ میکرومتر و درصد کروی بودن بیش از ۹۵٪ را نشان داد. این ویژگی‌ها ذوب یکنواخت را تسهیل می‌کنند و به همپوشانی ساختارهای جابروئید در ساختار نهایی کمک می‌رسانند. خواص فیزیکی شامل چگالی ظاهری $2/6 \sim \text{g/cm}^3$ و چگالی توپولوژی $4/1 \sim \text{g/cm}^3$ بود، که خطر گلوله‌ای شدن

را کاهش می‌دهد. پودر قبل از استفاده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۴ ساعت کاملاً خشک شد تا رطوبت حذف شود و کیفیت ذوب بهبود یابد [۳۲]. شکل ۴ مورفولوژی کروی آلیاژ Ti-6Al-4V را نشان می‌دهد، همچنین در جدول ۲ می‌توان درصد عناصر شیمیایی این آلیاژ را مشاهده کرد.



شکل ۴ مورفولوژی کروی پودر Ti-6Al-4V گرید ۵ با اندازه ذرات ۴۵-۱۵ میکرومتر [۲۸]

جدول ۲ عناصر شیمیایی پودر Ti-6Al-4V

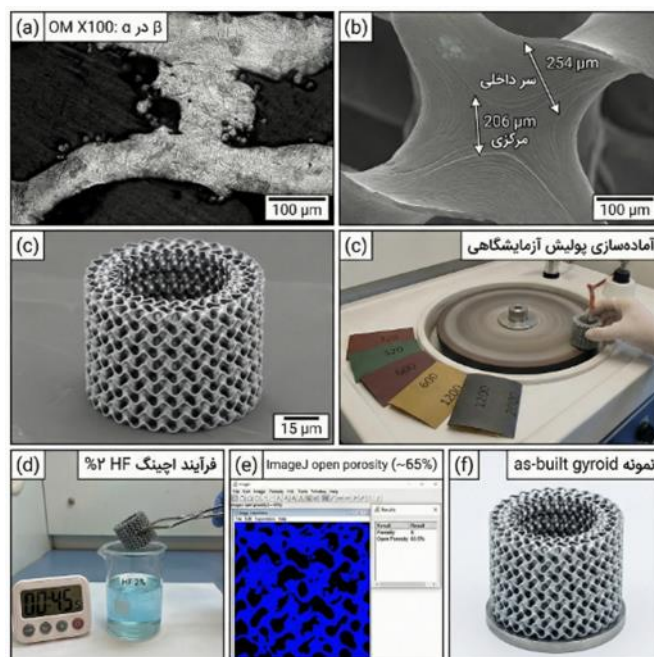
عنصر	حداقل	حداکثر
Al	۵/۵۰	۶/۵
V	۳/۵	۴/۵۰
Fe	-	۰/۲۵
O	-	۰/۱۳
C	-	۰/۰۸
N	-	۰/۰۵
H	-	۰/۰۱۲
Y	-	۰/۰۰۵
عناصر دیگر هر کدام	-	۰/۱۰
مجموع سایر عناصر	-	۰/۴۰
Ti	Bal.	

۲-۳- ویژگی‌شناسی میکروسکوپی و متالوگرافی

بررسی میکروسکوپی با میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX51 ساخت کشور ژاپن، بزرگنمایی ۱۰۰-۱۰۰۰x، مجهز به دوربین دیجیتال (برای ارزیابی توزیع تخلخل و عیوب ساخت) مانند تخلخل ناشی از عدم جوش خوردگی در نمونه فیلتر تنفسی متخلخل Ti-6Al-4V انجام شد. نمونه‌ها ابتدا با دستگاه پولیش مدل Polmet 2V ساخت شرکت Metkon و با سمباده‌های کاربید سیلیکون از گرید ۳۲۰ تا ۲۰۰۰، سرعت چرخش ۳۰۰ rpm با آب برای جلوگیری از حرارت آماده شدند تا سطح آینه‌ای حاصل شود. سپس، اچینگ شیمیایی با محلول هیدروفلوئوریک اسید (HF) ۲٪ در آب دیونیزه (غوطه‌وری ۳۰-۶۰ ثانیه در دمای اتاق، با شستشو فوری در آب مقطر و الکل برای خنثی‌سازی) اعمال گردید تا مرزهای لایه، فازها و ساختارهای جاپروئید نمایان شود [۳۳]. پس از اچینگ، نمونه‌ها خشک شدند و بلافاصله با OM بررسی گردیدند. نرم‌افزار ImageJ برای بخش‌بندی و تحلیل فیلدهای ویو؛ حداقل ۱۰ فیلد هر کدام ۱ mm²، برای بررسی تمایز منافذ باز و بسته استفاده شد.

تخلخل حجمی با تحلیل تصاویر ImageJ v1.53، تقسیم‌بندی بر اساس کنتراست فازها محاسبه شد. درصد باز و بسته بودن منافذ

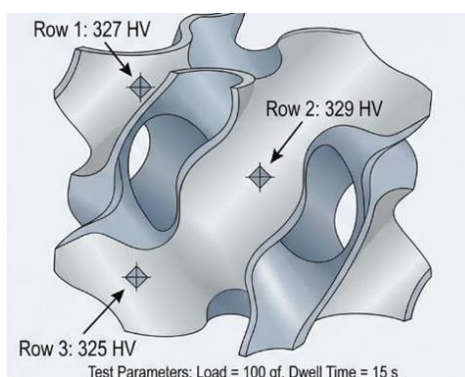
بر اساس حجم ساختارها و کانال‌های جابروئید استخراج گردید. تمام مراحل طبق استاندارد ASTM E407 و پروتکل‌های ISO 17025 بنیاد رازی اجرا گردید [۳۴]. شکل ۵ نشان‌دهنده مراحل متالوگرافی نمونه فیلتر تنفسی را نشان می‌دهد.



شکل ۵ مراحل آماده‌سازی متالوگرافی فیلتر تنفسی (a) ساختار میکروسکوپی پس از اچینگ با محلول HF 2% (Scale bar = 100 μm, 100 μm)؛ (b) اندازه‌گیری فواصل بین لایه‌ای با نرم‌افزار ImageJ؛ (c) مراحل پولیش مکانیکی با سمباده‌های SiC (گرید ۳۲۰ تا ۲۰۰۰)؛ (d) فرآیند اچینگ شیمیایی با HF 2%؛ (e) بخش‌بندی تخلخل با ImageJ v1.53 (Scale bar = 200 μm)؛ (f) نمونه نهایی آماده‌شده.

۲-۴- آزمون‌های میکروسختی

آزمون میکروسختی ویکرز برای ارزیابی مقاومت سطحی و دوام ساختارهای جابروئید با دستگاه Vickers^۱ میکروهاردنس مدل Zwick/Roell، مطابق استاندارد (ASTM E384) انجام شد. نمونه ابتدا با صیقل آینه‌ای نهایی (پولش دیاماندی ۱ μm) برای صافی سطح بزرگ‌تر از ۱ μm آماده شد. فرورفتگی‌ها با بار (۱۰۰ gf) و زمان نشست ۱۵ ثانیه در سه نقطه منتخب روی دیواره‌های منافذ (داخلی/خارجی)، ۳ نقطه در هر ناحیه؛ اعمال گردید، نقاط بر اساس گرادیان (جابروئید از مدل CAD) انتخاب شدند تا اثر همپوشانی ساختارها بر سختی محلی بررسی شود. شکل ۶ گرافیک محل نقاط تست را نشان می‌دهد.



شکل ۶ نقاط اندازه‌گیری میکروسختی ویکرز: ۳ نقطه در هر ناحیه (دیواره داخلی، مرکزی، خارجی)

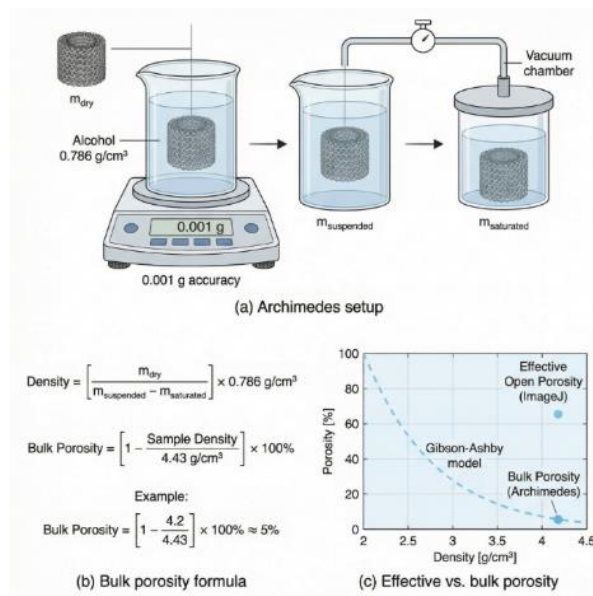
^۱ Vickers hardness

۲-۵- اندازه‌گیری چگالی (روش ارشمیدس)

چگالی ظاهری برای ارزیابی تخلخل حجمی و اعتبارسنجی مدل CAD جاپروئید (با تمرکز بر فواصل لایه‌ای) با روش ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B925 اندازه‌گیری شد [۳۲]. نمونه پس از تمیزکاری و خشک‌کردن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت آماده شد و وزن خشک آن با ترازو دیجیتال مدل AND ساخت ژاپن با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. نمونه در الکل ایزوپروپیل با خلوص ۹۹/۹ درصد ویسکوزیته ۰/۶۳ cP برای نفوذ بهتر به منافذ باز gyroid غوطه‌ور شد. وزن معلق با استفاده از نخ نایلونی (برای تعلیق بدون تماس با ظرف) و وزن اشباع پس از اشباع ملایم با خلأ (برای پر کردن منافذ باز) اندازه‌گیری شد. محاسبات بر اساس فرمول‌های زیر انجام گرفت جزئیات در شکل ۷ آورده شده است.

$$\text{چگالی در الکل چگالی (} 25^{\circ}\text{C)} = [m_{\text{dry}} / (m_{\text{suspended}} - m_{\text{saturated}})] \times 0.786 \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

$$\text{جامد چگالی (} Ti - 6Al - 4V \text{)} = 4.43 \text{ g/cm}^3 \quad \text{Bulk} = [1 - (\text{نمونه چگالی} / 4.43 \text{ g/cm}^3)] \times 100\%$$



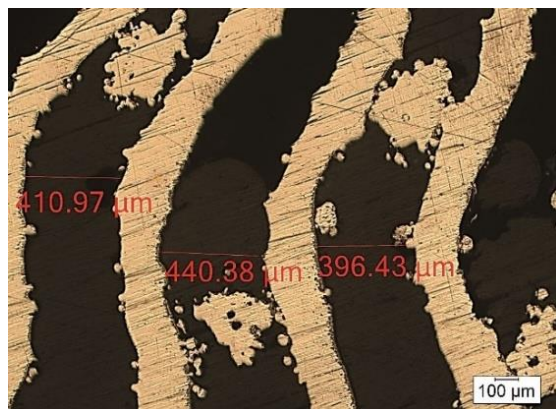
شکل ۷ اندازه‌گیری چگالی به روش ارشمیدس (a) چیدمان آزمایش شامل ترازوی دیجیتال (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم)، ظرف الکل ایزوپروپیل و سیستم تعلیق نخ نایلونی؛ (b) فرمول‌های محاسبه چگالی بدنه و تخلخل حجمی؛ (c) تمایز بین تخلخل مؤثر باز (طراحی‌شده در CAD) و تخلخل بدنه (عیوب فرآیند SLM).

۳- نتایج

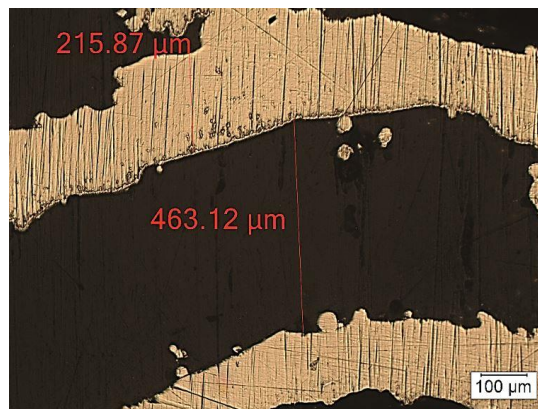
۳-۱- ساختار میکروسکوپی و متالوگرافی

تصاویر OM پس از اچینگ ۲٪ HF (X100/X500)، ساختار فازي $\alpha + \beta$ را در Ti-6Al-4V آشکار ساخت: "توزیع α سوزنی در زمینه β " (عرض $1-5 \mu\text{m}$ ، طول $50-100 \mu\text{m}$ ؛ مقیاس $100 \mu\text{m}$)، نتیجه خنک‌سازی سریع SLM را نشان می‌دهد. یکنواختی ساختارها بدون عیوب عمده مشاهده شد. متالوگرافی فواصل لایه‌ای را در چهار ناحیه و در هر ناحیه با ۵ تکرار اندازه‌گیری کرد: دیواره داخلی $206/48 \mu\text{m}$ ، ناحیه مرکزی-داخلی $396/43 \mu\text{m}$ ، ناحیه مرکزی-خارجی $463/12 \mu\text{m}$ و دیواره خارجی $479/32 \mu\text{m}$ (جدول ۳). میانگین وزنی بر اساس مساحت نسبی هر ناحیه در مقطع عرضی، $415/6 \mu\text{m}$ محاسبه شد. این روش میانگین‌گیری، تأثیر بیشتر نواحی خارجی (با مساحت مقطع بزرگ‌تر) را در مقدار نهایی لحاظ می‌کند و اختلاف ظاهری بین میانگین حسابی ساده و مقدار گزارش‌شده را توضیح می‌دهد. همپوشانی ساختارها مسیرهای مؤثر داخلی باریک‌تر می‌سازد، اندازه منافذ داخلی $206/48 \mu\text{m}$ و منافذ خارجی در بزرگ‌ترین نقاط $479/32 \mu\text{m}$ گزارش می‌شود. لازم به ذکر است که اگرچه تصاویر

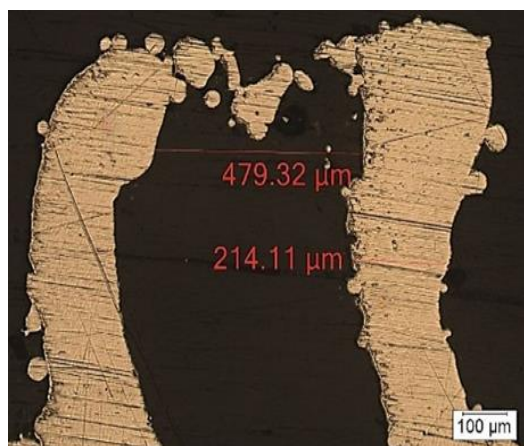
OM در این مطالعه برای تشخیص کلی فازها و اندازه‌گیری فواصل کانال کافی بودند، تأیید دقیق‌تر فازهای α و β و تحلیل کمی ریزساختار (شامل نسبت فازها و اندازه دانه) نیازمند تحلیل SEM و XRD است که در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. نتیجه‌گیری‌های ریزساختاری این مطالعه بر اساس مقایسه با مراجع معتبر [۳۲، ۴۲] که از SEM و XRD استفاده کرده‌اند، صحه‌گذاری شده است.



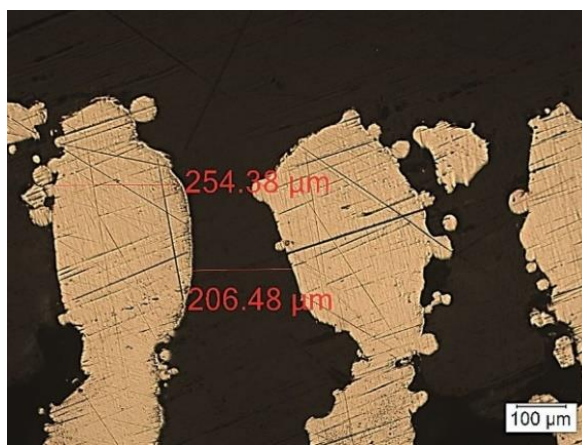
ب



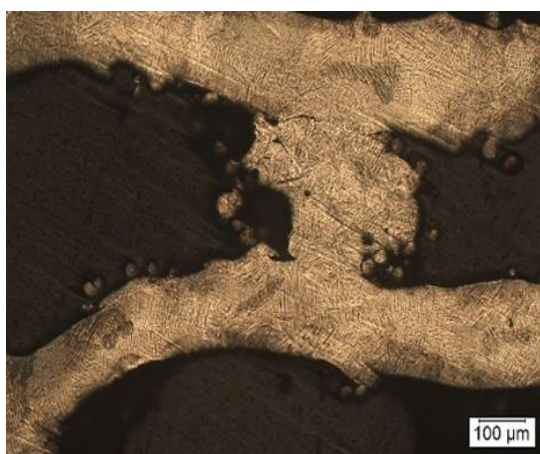
الف



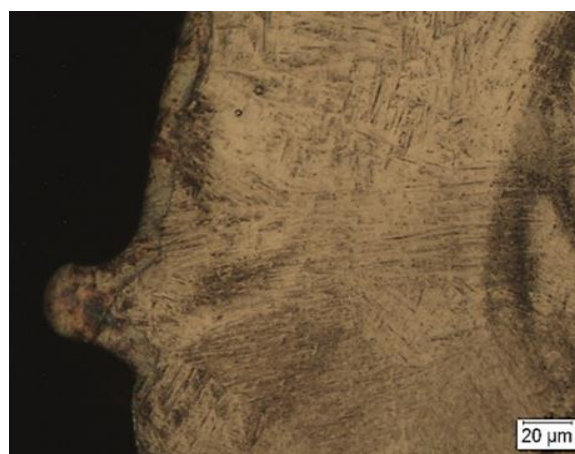
د



ج



و



ه

شکل ۸ (تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه فیلتر جابروئیدی Ti-6Al-4V پس از اچینگ با ۲٪ HF: (الف) نمای کلی ساختار و میانگین فواصل بین لایه‌ای ۴۱۵ میکرومتر (۱۰۰ μm)؛ (ب) فاصله بین لایه‌ها در ناحیه مرکزی: ۴۶۳ میکرومتر (۱۰۰ μm)؛ (ج) فاصله در جداره

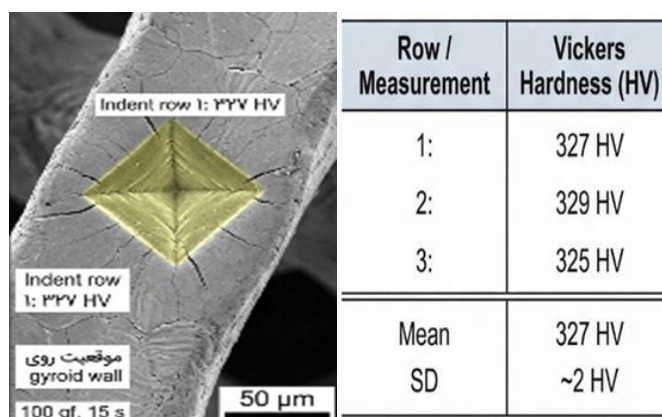
خارجی: ۴۷۹ میکرومتر (100 μm); (د) فاصله در جداره داخلی: ۲۵۴ میکرومتر (100 μm); (ه) ساختار فازی α سوزنی در زمینه β (100 μm); (و) بزرگنمایی بالاتر از فازهای (20 μm)

جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری فواصل بین‌لایه‌ای در نواحی مختلف نمونه فیلتر جاپروئیدی (Ti-6Al-4V) تعداد تکرار در هر ناحیه: (۵)

ناحیه اندازه‌گیری	فاصله کانال (μm)	تعداد نقاط اندازه‌گیری
دیواره داخلی	۲۵۴/۳۸	۵
ناحیه مرکزی-داخلی	۳۸۲/۱۲	۵
ناحیه مرکزی-خارجی	۴۶۱/۲۱	۵
دیواره خارجی	۴۷۹/۳۲	۵
میانگین وزنی	۴۱۵/۶	۲۰

۳-۲- خواص مکانیکی: میکروسختی

آزمون میکروسختی ویکرز، میانگین سختی ۳۲۷ HV را برای ساختارهای جاپروئید نشان داد که دوام محلی در بارهای تنفسی را تأیید می‌کند. این مقدار با ساختار α سوزنی در زمینه β متالوگرافی (۵۰۰/X۱۰۰X) و همپوشانی جاپروئید در نواحی داخلی (۲۵۴-۲۰۶ μm) همخوانی دارد و عیوب SLM را حداقل نگه می‌دارد. جزئیات مقادیر و شماتیک اثر آزمون میکروسختی در شکل ۹ خلاصه شده است.



شکل ۹ نتایج آزمون میکروسختی ویکرز: مقادیر سختی اندازه‌گیری شده در سه ناحیه (دیواره داخلی، مرکزی و خارجی)، میانگین ۳۲۷ HV و شماتیک اثر همپوشانی ساختار جاپروئید بر سختی محلی. بار: ۱۰۰ gf، زمان: ۱۵ ثانیه

۳-۳- چگالی و تخلخل

اندازه‌گیری ارسیمیدس با ۳ تکرار (جدول ۴)، چگالی بدنه نمونه جاپروئید را $4.18 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ نشان داد. این مقدار از وزن‌های خشک معلق و اشباع در الکل ایزوپروپیل محاسبه شد. جزئیات روش در بخش (۵-۲); تخلخل بدنه^۱ به‌طور میانگین ۵/۵ $\pm$ ۰/۱ درصد محاسبه شد. لازم به توضیح است که بین دو مفهوم تخلخل باید تمایز قائل شد: تخلخل مؤثر باز^۲ فضای خالی طراحی شده در توپولوژی جاپروئید برای عبور جریان هوا است (حدود ۶۵٪، تأییدشده با ImageJ) و تخلخل توده‌ای^۳ عیوب میکروسکوپی فرآیند SLM مانند حباب‌های گاز و عدم ذوب کامل در استرات‌ها است (حدود ۵/۵٪). این دو مفهوم متناقض نیستند و در مقیاس‌های متفاوتی تعریف می‌شوند [۳۷]. این نتیجه با تخلخل مؤثر هدف ۶۵٪ (از تحلیل ImageJ روی ۱۰ فیلد ویو؛ $\pm$ SD/۵) و فواصل لایه‌ای میانگین ۴۱۵ μm همخوانی دارد. همپوشانی ساختارها حدود ۳۰٪ از ساختار را تشکیل می‌دهد و مسیرهای باز مؤثر را ۶۵٪ حفظ می‌کند، درحالی‌که چگالی جسم (4.2 g/cm^3) دوام ساختارها را برای کاربردهای

¹ Bulk Porosity

² Effective Open Porosity

³ Bulk/Residual Porosity

تنفسی پیشنهاد می‌کند. خطای اندازه‌گیری کمتر از ۲٪ (± 0.1 SD g/cm³) دقت روش را تأیید می‌کند، اما نفوذ الکل به کانال‌های داخلی ($254 \sim 200 \mu\text{m}$) ممکن است منافذ باز را کمی بیش از حد تخمین بزند [۳۹].

جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری چگالی و تخلخل بدنه به روش ارشمیدس (ASTM B925)

تکرار	جرم خشک (g)	جرم غوطه‌ور (g)	جرم اشباع (g)	چگالی بدنه (g/cm ³)	تخلخل بدنه (%)
۱	۲/۵۱۲۰	۲/۰۳۸۰	۲/۱۰۰۵	۴/۱۸	۵/۶
۲	۲/۵۱۱۸	۲/۰۳۷۵	۲/۰۹۹۸	۴/۱۹	۵/۴
۳	۲/۵۱۲۴	۲/۰۳۸۸	۲/۱۰۱۲	۴/۱۸	۵/۶
میانگین	۲/۵۱۲۱	۲/۰۳۸۱	۲/۱۰۰۵	۴/۱۸	۵/۵
SD	± 0.003	± 0.007	± 0.007	± 0.005	± 0.1

۴- بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توپولوژی جاپروئید کانفورمال گرادیان‌دار در Ti-6Al-4V ساخته‌شده با SLM، بستر مناسبی برای طراحی فیلترهای تنفسی قابل استفاده مجدد فراهم می‌آورد. این ساختار با بهره‌گیری از همپوشانی تدریجی سلول‌ها، فواصل کانال متغیری ایجاد می‌کند که ضمن حفظ نفوذپذیری در نواحی خارجی، مسیرهای فیلتراسیون پریپیچ‌وخم‌تری در نواحی داخلی ایجاد می‌نماید. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از منظرهای مختلف با مطالعات پیشین مقایسه و تحلیل می‌شود.

۴-۱- تحلیل ریزساختار و مقایسه با ادبیات

تصاویر میکروسکوپ نوری (OM) پس از اچینگ با محلول ۲٪ HF، ساختار فاز $\alpha + \beta$ را در Ti-6Al-4V ساخته‌شده با SLM آشکار ساخت. فاز α به‌صورت سوزنی (Acicular α) با عرض ۱ تا ۵ میکرومتر و طول ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر در زمینه فاز β توزیع شده بود. این مورفولوژی ریزساختاری، نتیجه مستقیم نرخ خنک‌سازی بالای فرآیند SLM (در حدود 10^3 تا 10^5 کلین بر ثانیه) است که مانع از تشکیل فاز β پایدار شده و فاز α مارتنزیتی سوزنی را ایجاد می‌کند. این یافته با گزارش‌های پروپتام و همکاران [۳۹] و ورنکن و همکاران [۲۹] که ساختار مشابهی را در Ti-6Al-4V SLM پیش از عملیات حرارتی مشاهده کردند، همخوانی کامل دارد. ورنکن و همکاران [۲۹] نشان دادند که آنیل کردن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (مشابه شرایط تنش‌زدایی اعمال‌شده در این پژوهش) بدون تغییر فاز قابل‌توجه، تنش‌های پسماند را کاهش می‌دهد و ساختار α سوزنی حفظ می‌شود.

لازم به تأکید است که تشخیص فازهای α و β در این مطالعه صرفاً بر پایه تصاویر OM انجام شده و تأیید دقیق‌تر فازها، نسبت حجمی آن‌ها و شناسایی احتمالی فازهای ثانویه (مانند α' مارتنزیت یا فاز ω) نیازمند تحلیل مکمل SEM، EDS، EBSD و XRD است. با این حال، مطالعات معتبر متعددی که از SEM و XRD استفاده کرده‌اند [۳۹، ۳۵، ۲۹]، ساختار α سوزنی در زمینه β را به‌عنوان مورفولوژی غالب Ti-6Al-4V SLM بدون عملیات حرارتی آنیل تأیید نموده‌اند.

۴-۲- تحلیل ابعادی فواصل کانال و تأثیر گرادیان بر عملکرد فیلتراسیون

اندازه‌گیری‌های متالوگرافی فواصل بین‌لایه‌ای در سه ناحیه مشخص (جدول ۳)، گرادیان طراحی‌شده در مدل CAD را تأیید کرد. فاصله کانال در دیواره داخلی (۲۵۴/۳۸ میکرومتر) به‌طور معناداری کمتر از دیواره خارجی (۴۷۹/۳۲ میکرومتر) بود. این اختلاف ۲۲۵ میکرومتری، نتیجه مستقیم استراتژی گرادیان اندازه سلول در نرم‌افزار nTopology است که همپوشانی بیشتر استرات‌ها در نواحی داخلی و فواصل باز تر در نواحی خارجی را هدف‌گذاری کرده بود.

برای ارزیابی عملکرد فیلتراسیون، مقایسه با مطالعات معتبر ضروری است. ال-کتان و همکاران [۱۵] ساختار جاپروئید یکنواخت Ti-6Al-4V با تخلخل ۶۵ تا ۷۵ درصد و فواصل ثابت حدود ۴۰۰ میکرومتر ساختند. یان و همکاران [۱۶] فواصل ۲۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر و سختی حدود ۳۲۰ HV گزارش کردند. رحمتی و همکاران [۱۴] تخلخل حدود ۷۰ درصد و استحکام فشاری ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال برای جاپروئید Ti-6Al-4V ثبت نمودند. در ساختار حاضر، فاصله کانال در ناحیه داخلی (۲۵۴ میکرومتر)

کمتر از مقدار ثابت مطالعات یکنواخت [۱۵، ۱۶] است، درحالی‌که ناحیه خارجی (۴۷۹ میکرومتر) نفوذپذیری بالایی حفظ کرده است. جدول ۵ مقایسه جامع‌تری ارائه می‌دهد. جدول ۵ مقایسه کمی نتایج حاضر با مطالعات معتبر پیشین را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقایسه کمی نتایج حاضر با مطالعات معتبر پیشین در زمینه ساختارهای جاپروئید Ti-6Al-4V ساخته شده با SLM

پارامتر	مطالعه حاضر	Al-Ketan 2020 [۱۵]	Yan 2018 [۱۶]	Rahmati 2021 [۱۴]	Yu 2023 [۲۳]
توپولوژی	جاپروئید گرادیان‌دار	جاپروئید یکنواخت	جاپروئید یکنواخت	جاپروئید/دیاموند	جاپروئید گرادیان‌دار
تخلخل مؤثر (%)	۶۵~	۶۵-۷۵	۵۰-۸۰	۷۰~	۵۴-۷۸
تخلخل بدنه (%)	۵/۵	—	—	—	—
فاصله کانال (μm)	۲۵۴-۴۷۹	۴۰۰~ ثابت	۲۰۰-۵۰۰	۲۰۰-۶۰۰	—
سختی (HV)	۳۲۷	—	۳۲۰~	—	—
چگالی (g/cm ³)	۴/۱۸	—	—	—	—
استحکام فشاری	—	۴-۶ GPa	—	۱۰-۱۵ MPa	۲۵۰ MPa
ماده	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	CP-Ti
کاربرد	فیلتر تنفسی	ایمپلنت	ایمپلنت	ایمپلنت	ایمپلنت

۴-۳- تحلیل خواص مکانیکی و ارزیابی دوام

آزمون میکروسختی ویکرز میانگین HV ۳۲۷ محدود به ۳۲۵ تا HV ۳۲۹ را برای ساختارهای جاپروئید نشان داد. این مقدار با مقدار حدود HV ۳۲۰ گزارش شده توسط یان و همکاران [۱۶] برای جاپروئید Ti-6Al-4V SLM و محدود به ۳۰۰ تا HV ۳۵۰ مرور سیستماتیک لیماخون و همکاران [۱۷] همخوانی دارد. اختلاف کم بین سه نقطه اندازه‌گیری حدود HV ۲ نشان‌دهنده یکنواختی ریزساختار در مقیاس میکروسکوپی است.

در خصوص دوام مکانیکی فیلتر، لازم است چند نکته مهم تبیین شود. نخست، آزمون میکروسختی ویکرز به‌تنهایی برای اثبات کامل دوام سازه‌ای فیلتر کافی نیست و نیاز به آزمون‌های استحکام فشاری، خستگی و سیکل شستشو دارد. بااین‌حال، سختی بالای ۳۲۷HV شواهد غیرمستقیم مهمی فراهم می‌آورد. طبق مدل گیبسون-آشی برای جامدات سلولی [۲۵]، بین سختی استرات‌ها و استحکام کلی ساختار سلولی رابطه مستقیم وجود دارد. دوم، استحکام تسلیم Ti-6Al-4V SLM بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال گزارش شده است [۲۹].

۴-۴- تحلیل مورفولوژی پودر و اثر آن بر کیفیت ساخت

پودر Ti-6Al-4V گرید ۵ با اندازه ذرات ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر و مورفولوژی کروی (درصد کروی بودن بیش از ۹۵ درصد) در فرآیند SLM استفاده شد. مورفولوژی کروی پودر، جریان‌پذیری مناسب را تضمین می‌کند و توزیع یکنواخت لایه‌های پودر را ممکن می‌سازد. صفری و دهفلوی [۲۴] نشان دادند که بهینه‌سازی پارامترهای SLM برای همین پودر (توان ۱۵۰ وات، سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه) به زبری سطح ۱/۴۴ میکرومتر منجر می‌شود. پارک و همکاران [۲۲] با استفاده از یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی $R^2=99\%$ برای چگالی و زبری سطح Ti-6Al-4V SLM گزارش کردند.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، طراحی، ساخت و ویژگی‌شناسی فیلتر تنفسی متخلخل Ti-6Al-4V بر پایه توپولوژی جاپروئید کانفورمال گرادیان‌دار با موفقیت انجام شد. ساختار استوانه‌ای توخالی (H=10 mm, ID=9 mm, OD=15 mm) با نرم‌افزار nTopology طراحی و با دستگاه SLM شرکت نورآی اصفهان تولید گردید. یافته‌های اصلی به شرح زیر است:

الف) طراحی و ساختار هندسی: طراحی گرادیان دار منجر به ایجاد فواصل کانال متغیر از ۴۵۴/۳۸ میکرومتر در دیواره داخلی تا ۴۷۹/۳۲ میکرومتر در دیواره خارجی (میانگین وزنی ۴۱۵/۶ میکرومتر) شد. این گرادیان، نتیجه همپوشانی تدریجی سلول‌های جاپروئید بوده و مسیرهای فیلتراسیون پریپیچ و خم‌تری در نواحی داخلی (برای دام اندازی ذرات) و نفوذپذیری بالاتر در نواحی خارجی (برای عبور جریان هوا) ایجاد می‌کند.

ب) ریزساختار: تصاویر میکروسکوپ نوری پس از اچینگ ۲٪ HF، ساختار فازی α سوزنی عرض ۵-۱ μm ، طول ۱۰-۵۰ μm در زمینه β را آشکار ساخت. این ساختار نتیجه خنک‌سازی سریع فرآیند SLM بوده و با مطالعات معتبر [۳۹، ۳۵، ۲۹] همخوانی دارد.

ج) خواص مکانیکی: سختی میانگین ویکرز ۳۲۷HV محدود به ۳۲۵-۳۲۹ HV به دست آمد که با مقادیر گزارش شده در مطالعات مشابه [۱۷، ۱۶] سازگار است و نشان‌دهنده استحکام محلی مناسب ساختارها است.

د) چگالی و تخلخل: چگالی ارسمیدسی $4/18 \pm 0/05 \text{ g/cm}^3$ (چگالی نسبی ۵/۹۴٪)، تخلخل بدنه (Bulk) $5/5 \pm 0/1 \%$ و تخلخل مؤثر باز حدود ۶۵٪ اندازه‌گیری شد. تمایز بین این دو نوع تخلخل برای درک صحیح عملکرد فیلتر ضروری است: تخلخل مؤثر فضای عبور هوا و تخلخل بدنه عیوب فرآیندی استرات‌ها را نشان می‌دهد.

ه) مورفولوژی پودر: پودر کروی Ti-6Al-4V با اندازه ۱۵-۴۵ میکرومتر و درصد کروی بودن بیش از ۹۵٪، نقش مهمی در کیفیت بالای فرآیند SLM و حداقل بودن عیوب ساخت ایفا کرد.

به‌طور خلاصه، این پژوهش نشان داد که توپولوژی جاپروئید گرادیان دار در Ti-6Al-4V، با ایجاد مسیرهای فیلتراسیون چندمرحله‌ای، پتانسیل قابل‌توجهی برای توسعه فیلترهای تنفسی قابل استفاده مجدد دارد. زیست‌سازگاری ذاتی، استحکام مکانیکی بالا و قابلیت استریل‌سازی حرارتی (اتوکلاو) Ti-6Al-4V، مزایای عملی مهمی نسبت به فیلترهای پلیمری یک‌بار مصرف فراهم می‌آورد.

بر اساس محدودیت‌های شناسایی شده و یافته‌های این پژوهش، اقدامات زیر برای فازهای بعدی رساله پیشنهاد می‌شود:

(۱) ساخت نمونه شاهد یکنواخت: ساخت ساختار جاپروئید یکنواخت با تخلخل و ابعاد مشابه و مقایسه مستقیم افت فشار، نفوذپذیری و راندمان فیلتراسیون.

(۲) آزمون‌های مکانیکی: انجام آزمون فشاری محوری (ASTM E9)، آزمون خستگی و ارزیابی پایداری ساختار تحت سیکل‌های شستشو و اتوکلاو (حداقل ۵۰ سیکل).

(۳) تحلیل ریزساختاری مکمل: استفاده از SEM، EDS، EBSD و XRD برای تأیید دقیق فازها، نسبت حجمی α/β و شناسایی فازهای ثانویه.

Authorship Contribution Statement

Amir Mohammad Babaei



Biography: Ph.D. student at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Methodology, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Dr. Mehdi Safari



Biography: Associate Professor at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Contribution Statement: Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing

Dr. Mohammad Reza Karafi



Biography: Mohammad Reza Karafi is an Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering at Tarbiat Modares University. His research interests include smart materials and the mechanical behavior of advanced porous structures.

Contribution Statement: Conceptualization, Supervision, Validation, Writing – review & editing.

۶- مراجع

- [1] World Health Organization. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO Press; 2021.
- [2] Zhang Y, Wang Y, Li X, et al. Airborne particle filtration using additively manufactured polymeric structures: A review. Addit Manuf. 2022;56:103085.
- [3] Wang Y, Zhang L, Wang J, et al. Respiratory hazards from nanoparticles: Current concepts and research needs. J Hazard Mater. 2020;398:122902.
- [4] Li Y, Liu X, Zhang H, et al. Limitations of melt-blown filters in N95 masks under humid conditions. ACS Appl Mater Interfaces. 2021;13(5):6762–74.
- [5] ASTM International. ASTM F1862/F1862M-17: Standard test method for resistance of medical face masks to penetration by synthetic blood (horizontal projection). West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [6] Niinomi M. Recent metallic materials for biomedical applications. Metall Mater Trans A. 2003;33(3):477–82.
- [7] Liu X, Chu PK, Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. Mater Sci Eng R Rep. 2004;47(3–4):49–121.
- [8] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 3rd ed. Cham: Springer; 2021.

- [9] Frazier WE. Metal additive manufacturing: A review. *J Mater Eng Perform*. 2014;23(6):1917–28.
- [10] ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing—General principles—Terminology. Geneva: International Organization for Standardization; 2015.
- [11] Kapfer SC, Mickel W, Mecke KR, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering. *J Phys Condens Matter*. 2010;22(34):342153.
- [12] Yan C, Hao L, Hussein A, et al. Ti6Al4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated by selective laser melting. *Materials (Basel)*. 2018;11(6):936.
- [13] Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Bus Horiz*. 2017;60(5):677–88.
- [14] Rahmati M, Mills DK, Urbanska AM, et al. Mechanical characterisation of gyroid and diamond TPMS Ti-6Al-4V scaffolds for bone implants. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2021;120:104580.
- [15] Al-Ketan O, Abu Al-Rub RK. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Addit Manuf*. 2020;33:101088.
- [16] Yan C, Hao L, Hussein A, Young P, Rayment D. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *Int J Mach Tools Manuf*. 2018;149:103517.
- [17] Limmahakhun S, Oloyede A, Sitthiseripratip K, et al. Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures fabricated by laser powder bed fusion. *Mater Des*. 2019;174:107798.
- [18] Montazerian H, Davoodi E, Asadi-Eydivand M, et al. Permeability and flow through triply periodic minimal surfaces (TPMS): Analytical and CFD validation. *J Porous Mater*. 2021;28(4):1279–93.
- [19] Wang J, Zhang L, Li X, et al. Metal-organic framework-based filters for virus removal in air filtration. *ACS Nano*. 2023;17(5):4802–18.
- [20] Jumaah OD, Hamid AA, Younis AD. Numerical evaluation of porous structure of titanium alloy fabricated via selective laser melting process. *J Compos Adv Mater*. 2024;34(5):743–52.
- [21] Zhang W, Liu H, Liu Z, Liang Y, Hao Y. Experimental study on performance of Ti-6Al-4V femoral implants produced by selective laser melting. *Metals*. 2024;14(5):492.
- [22] Park HS, Nguyen DS, Le-Hong T, Van Tran X. Machine learning-based optimization of process parameters in selective laser melting for biomedical applications. *J Intell Manuf*. 2022;33(6):1843–58.
- [23] Yu AH, Xu W, Lu X, et al. Development and characterizations of graded porous titanium scaffolds via selective laser melting for orthopedics applications. *Trans Nonferrous Met Soc China*. 2023;33(6):1749–67.
- [24] Safari M, Dehfouli I. Experimental investigation, statistical analysis, and optimization of the selective laser melting process for the titanium alloy Ti-6Al-4V. *J Weld Sci Technol Iran*. 2025;11(1):1–9.
- [25] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular solids: Structure and properties*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
- [26] EOS GmbH. EOS Titanium Ti64: Material data sheet for metal additive manufacturing. Krailling: EOS GmbH; 2023.
- [27] nTopology Inc. nTopology 4.1: User guide for lattice design and filtration applications. New York: nTopology Inc.; 2023.
- [28] Safdari M, Etemadi AH, Noroozi A, et al. Optimization of selective laser melting parameters for Ti-6Al-4V alloy. *Optik*. 2022;259:168942.

- [29] Vrancken B, Thijs L, Kruth JP, Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties. *J Alloys Compd.* 2012;541:177–85.
- [30] Bagheri A, Shamsaei N, Thompson SM. Morphology and flow characterization of Ti-6Al-4V powder for selective laser melting. *J Manuf Process.* 2021;67:360–73.
- [31] ASTM International. ASTM B213-17: Standard test methods for flow rate of metal powders using the Hall flowmeter funnel and Carney flowmeter funnel. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [32] ASTM International. ASTM E407-20: Standard practice for microetching metals and alloys. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
- [33] ANSYS Inc. ANSYS Additive Suite: User guide for Print and Simulate modules. Canonsburg (PA): ANSYS Inc.; 2023.
- [34] ASTM International. ASTM E384-22: Standard test method for microindentation hardness of materials. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.
- [35] Liu YH, Wang Z, Gao Y, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V with graded porosity. *Addit Manuf.* 2021;42:101987.
- [36] ASTM International. ASTM B925-20: Standard practices for production and preparation of powder metallurgy test specimens. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
- [37] Esmaeilizadeh R, Toyserkani E, Jahed H. Density measurement challenges in porous additively manufactured structures: Archimedes vs. X-ray CT. *J Mater Process Technol.* 2022;302:113217.
- [38] Zhang LC, Attar H. Selective laser melting of titanium alloys and titanium matrix composites for biomedical applications: A review. *Adv Eng Mater.* 2016;18(4):463–75.
- [39] Promoppatum P, Onn KR, Yao S. Residual stress modeling in selective laser melting of Ti-6Al-4V: Validation with experiments. *Addit Manuf.* 2020;36:101422.
- [40] Al-Ketan O, Soliman M, Abu Al-Rub RK. Topological mechanical metamaterials: Additive manufacturing and mechanical properties. *Acta Biomater.* 2023;155:93–116.
- [41] Limmahakhun S, Oloyede A, Chaysuwan D, et al. Mechanical properties of additively manufactured porous titanium: A systematic review. *Mater Des.* 2022;213:110332.
- [42] National Institute for Occupational Safety and Health. 42 CFR Part 84: Approval of respiratory protective devices. Washington (DC): US Department of Health and Human Services; 2016.
- [43] ISO/TC 142. ISO 16890-1:2016: Air filters for general ventilation—Part 1: Technical specifications and requirements. Geneva: International Organization for Standardization; 2016.
- [44] Al-Ketan O, Rowshan H, Abu Al-Rub RK. Topology–mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet-based TPMS cellular structures. *Addit Manuf.* 2020;33:101134.