



Research Article

Studying the Effect of Reduced Graphene Oxide on the Microstructure and Biomechanical Properties of Akermanite Ceramics

Farzad Malamir¹, Mahdi Kalantar^{1*} , Mojdeh Azizi² and Masoud Moshrafifar¹

1- Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran

2- Department of Biomedical Engineering, Science and Art University, Yazd, Iran

* Corresponding author, Email: mkalantar@yazd.ac.ir

(Received: 18 May 2025; Revised: 31 August 2025; Accepted: 10 September 2025; Available online: 24 May 2026)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Ceramics based calcium silicate such as Akermanite ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) are suitable bioactive materials for bone tissue engineering applications. However, they suffer from poor mechanical properties. So, additives like graphene or its derivatives are used. In this regard, in this study, reduced graphene oxide (0.5%, 1%, and 1.5% by weight) has been employed as a reinforcement.

Materials and Methods: The mixture of raw materials (akermanite and reduced graphene oxide to the desired ratio) went through various preparation stages followed by sintering process and finally, the sintered samples were characterized.

Results: By increasing the weight percentage of reduced graphene oxide from zero (control sample) to 1.5 wt. %, a decrease in relative density from 94.9% to 89.3% and a reduction in compressive strength from 13 to 8 Mpa was observed. Toughness increased from 1.9 for the control sample to 4.2 for the 1 wt.% sample, it decreased to 2.7 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ for a 1.5 wt.% sample, though. Similarly, the hardness increased from 435 for the control sample to 588 Vickers for the 1 wt.% sample, and decreased to 308 Vickers for the 1.5 wt.% sample.

Conclusion: Among the composite specimens, the most homogeneous microstructure was related to the 1 wt.% sample with the highest mechanical properties (toughness and hardness). Graphene oxide not only does not prevent the formation of the apatite layer, but also encourages the formation of dense and fine apatite deposits on the surface of the composite sample.

Keywords: Reduced graphene oxide, Akermanite, Composite, Microstructure, Mechanical and biological properties.

How to Cite: Malamir F, kalantar M, Azizi M, Moshrafifar M. Studying the effect of reduced graphene oxide on the microstructure and biomechanical properties of akermanite ceramics. J Adv Mater Eng. 2026;45(3):21–37 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.45.3.1131>

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی تاثیر اکسید گرافن کاهش یافته بر ریزساختار، خواص مکانیکی و خواص زیستی سرامیک آکرمائیت

فرزاد مالمیر^۱، مهدی کلانتر^{۱*}، مژده عزیزی^۲ و مسعود مشرفی^۱

۱- گروه مواد و متالورژی، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

۲- گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mkalantar@yazd.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۹، انتشار: ۱۴۰۵/۳/۳)

چکیده

مقدمه و اهداف: سرامیک‌های برپایه سیلیکات کلسیم، مانند آکرمائیت ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$)، مواد زیست‌فعال مناسبی جهت استفاده به‌عنوان ترمیم استخوان هستند اما خواص مکانیکی ضعیفی دارند. به همین دلیل، از مواد افزونی مانند گرافن یا مشتقات آن استفاده می‌کنند. در همین راستا، در این مطالعه از اکسید گرافن کاهش یافته (۵/۰، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است.

مواد و روش‌ها: مخلوط مواد اولیه، شامل آکرمائیت و اکسید گرافن کاهش یافته به نسبت مورد نظر، مراحل مختلف آماده‌سازی را طی کرده و در ادامه، نمونه‌ها تحت فرآیند تف‌جوشی قرار گرفتند و در نهایت مشخصه‌یابی نمونه‌های تف‌جوشی شده انجام گرفت.

یافته‌ها: با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته از صفر (نمونه شاهد) تا ۱/۵ درصد، کاهش چگالی نسبی از ۹۴/۹ به ۸۹/۳ درصد، کاهش استحکام فشاری از ۱۳ به ۸ مگاپاسکال مشاهده شد. چقرمگی از ۱/۹ برای نمونه شاهد به $4/2 \text{ MPa.m}^{1/2}$ برای نمونه یک درصد وزنی افزایش یافته اما مجدداً به $2/7 \text{ MPa.m}^{1/2}$ برای نمونه یک و نیم درصد وزنی کاهش یافت. به‌طور مشابه سختی از ۴۳۵ برای نمونه شاهد به ۵۸۸ ویکرز برای نمونه یک درصد وزنی افزایش یافته اما مجدداً به ۳۰۸ ویکرز برای نمونه یک و نیم درصد وزنی یافت.

نتیجه‌گیری: در بین نمونه‌های کامپوزیتی، همگن‌ترین ریزساختار مربوط به نمونه یک درصد وزنی با بالاترین خواص مکانیکی (چقرمگی و سختی) بود. اکسید گرافن، نه تنها مانع از تشکیل لایه آپاتیت نمی‌شود، بلکه زمینه‌ساز شکل‌گیری رسوبات آپاتیتی متراکم و ریز روی سطح نمونه کامپوزیتی است.

واژه‌های کلیدی: اکسید گرافن کاهش یافته، آکرمائیت، کامپوزیت، ریزساختار، خواص مکانیکی و زیستی.



۱- مقدمه

مواد زیستی، باید شامل ویژگی‌هایی مانند زیست‌سازگاری با محیط بدن و تحریک تشکیل بافت جدید (زیست‌فعالی) بوده و در عین حال، از حداقل خواص مکانیکی لازم برخوردار باشند. سرمایه‌های زیستی، به دلیل شباهت با محیط فیزیولوژیکی بدن، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. موادی مانند هیدروکسی‌آپاتیت، فسفات‌های کلسیم، شیشه‌های زیست‌فعال و ترکیبات سیلیکاتی در تعدادی از سیستم‌های خاص سه‌تایی، به دلیل توانایی در ترمیم استخوان و ایجاد پیوند با بافت استخوان در مهندسی بافت و ایمپلنت‌های ارتوپدی و دندان‌کاری کاربرد دارند. در بین سیستم‌های سیلیکاتی سه‌تایی $MgO-CaO-SiO_2$ تعدادی از ترکیبات مانند آکرمایت ($(Ca_2MgSi_2O_7)$)، دیوپساید ($(MgCaSi_2O_6)$) و غیره، به دلیل داشتن ویژگی‌های مکانیکی و زیستی مناسب مورد توجه قرار گرفته است و برای استفاده در ترمیم استخوان‌های آسیب‌دیده، انتخاب خوبی به شمار می‌آیند (۱۷-۱). تحقیقات پیشین نشان داده است که سرمایه‌های زیست‌فعال بر پایه آکرمایت، به خوبی تجزیه پذیر بوده و می‌توانند زمینه‌ساز خاصیت زیست‌فعالی (قابلیت استخوان‌سازی)، قابلیت چسبندگی خوب و در عین حال قابلیت تکثیر سلول‌های استئوبلاست^۲ باشند. نتایج مقایسه‌ای بین توانایی تشکیل آپاتیت زیستی روی سطح اکرمایت و دیگر سرمایه‌ها، چون ولاستونیت در محلول شبیه‌ساز بدن نشان داده که پس از ۲۰ روز، لایه ضخیم‌تری از آپاتیت با ضخامت حدود ۱۳۰ میکرومتر روی سطح اکرمایت شکل می‌گیرد (۱۱ و ۱۲). افزایش زمان غوطه‌وری، منجر به آزاد شدن سریع‌تر یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) نسبت به یون منیزیم (Mg^{2+}) شده که این امر باعث فوق‌اشباع شدن یون‌های کلسیم در محلول و در نتیجه کریستالیزه شدن و افزایش لایه آپاتیت زیستی می‌گردد. در یک مطالعه دیگر، غوطه‌وری اکرمایت با ۹۰ درصد تخلخل به مدت ۱۰ روز در محلول شبیه‌ساز بدن، منجر به تشکیل لایه‌ای از هیدروکسی‌آپاتیت با نسبت کلسیم به فسفر ۱/۶۲ و اندازه ذرات حدود ۱۰۰ میکرومتر شد (۷). از نقطه ضعف اکرمایت ترد و شکننده بودن و مقاومت

کم آن در در نواحی باربر استخوان است و لازم است با افزایش یک جزء ثانویه خواص مکانیکی آن را بهبود بخشید، ضمن این که خواص زیستی آن کاهش پیدا نکند. نتایج بررسی داربست‌های متخلخل^۳ آکرمایت تقویت شده با نانو ذرات تیتانیوم دی‌اکسید ساخته شده به روش لیزری، نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی داربست شامل سختی ۷/۶۶ گیگاپاسکال برای داربست با ۷ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 در مقایسه با ۵/۸۲ گیگاپاسکال برای آکرمایت خالص، چقرمگی شکست ۲/۳۲ برای داربست با ۷ درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم در مقایسه با ۱/۸۲ مگاپاسکال رادیکال‌متر برای آکرمایت خالص و استحکام فشاری ۲۲/۸۶ مگاپاسکال برای داربست با ۷ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 در مقایسه با ۳/۵۳ مگاپاسکال برای آکرمایت خالص است که به فرارگیری نانوذرات TiO_2 در داخل دانه‌های آکرمایت و در طول مرز دانه‌ها و افزایش مقاومت به تشکیل و رشد ترک نسبت داده شده است (۱۳). این در حالی است که خواص زیستی آکرمایت نیز بهبود می‌یابد، به طوری که تکثیر سلولی MG-63 در داربست‌های آکرمایت با ۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 ، نسبت به داربست آکرمایت خالص کیفیت بهتری داشته و زیست‌سازگاری داربست‌های آکرمایت بهبود یافته است. سایر مطالعات نیز نشان دادند که TiO_2 قادر به افزایش چسبندگی استئوبلاست^۴ و القای رشد سلولی^۵ است (۱۶ و ۱۸).

گرافن به دلیل سطح ویژه بالا، سازگاری زیستی و بهبوددهنده خواص مکانیکی، می‌تواند عامل تقویت‌کننده مناسبی برای آکرمایت باشد. در سال‌های اخیر، نانوپرکننده‌های بر پایه گرافن، مانند اکسید گرافن کاهش یافته^۶، به منظور تقویت خواص مکانیکی سرمایه‌ها و سرمایه‌های زیستی، مانند نیتريد سیلیسیم، زیرکونیا، آلومینا، هیدروکسی‌آپاتیت و آکرمایت استفاده شده‌اند (۲۷-۱۸). تقویت خواص مکانیکی، به واسطه ظهور سازوکارهای مختلف مقاومت به رشد ترک، از جمله پل زدن، انحراف و دور زدگی ترک است. اکسید گرافن کاهش یافته زیست‌سازگاری بهتری نسبت به سایر مشتقات گرافن دارد. سرمایه زیستی آکرمایت خواص زیستی مناسبی را از خود نشان می‌دهد اما

مکانیکی با حضور اکسید گرافن کاهش یافته است (۱۰). با این حال، این ماده تکثیر سلولی را ارتقاء داده، اما تأثیری بر توانایی تشکیل آپاتیت بر سطح سرامیک کلسیم سیلیکات نداشته است. در ضمن به دلیل این که اکسید گرافن، دانه‌های زمینه را از هم جدا کرده و از بسته شدن تخلخل‌ها جلوگیری می‌کند، چگالی نسبی از ۹۸ درصد برای کلسیم سیلیکات به ۹۴ درصد، برای یک درصد وزنی، کاهش خواهد یافت. نانوسختی از ۳/۵۵ به ۴/۸۳ گیگاپاسکال و چقرمگی از ۱/۲۴ به ۲/۷۶ مگاپاسکال رادیکال‌متر، هر دو با افزایش اکسید گرافن تا یک درصد وزنی افزایش می‌یابند، اما در مقادیر بالاتر مجدداً کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل افزایش قابل توجه تخلخل و ضعیف شدن اتصال‌ها در فصل مشترک باشد. در این نوع کامپوزیت‌ها، افزایش چقرمگی مربوط به فعال شدن چهار مکانیزم شامل (الف) پل‌زنی ترک، (ب) بیرون کشیدگی یا خارج شدگی ورق‌های اکسید گرافن از زمینه به واسطه نیروهای کششی، (ج) انحراف ترک و (د) انشعاب ترک که نقش افزایش مقاومت به رشد ترک را دارند، است. براساس تحقیقات اخیر، کامپوزیت‌هایی که حاوی اکسید گرافن با عرض متوسط باشند چقرمگی شکست بالاتری نسبت به ورق‌های با عرض بزرگ‌تر (درشت‌تر) از خود نشان می‌دهند. در حقیقت ورق‌های ریزتر، اتصال قوی‌تری با زمینه برقرار می‌کنند (۱۹) و (۲۰). تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های شاهد و کامپوزیتی بعد از غوطه‌وری به مدت ۱۴ روز در محلول شبیه‌سازی شده بدن^۱ نشان‌دهنده رشد نانوصفحات آپاتیت و تشکیل یک لایه متراکم از هیدروکسی آپاتیت روی سطح نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش غلظت اکسید گرافن است. طبق نتایج طیف‌سنجی پراکندگی پرتو ایکس^{۱۱} هیچ نشانه‌ای از حضور پیک Si^۱ نبوده و نسبت مولی Ca/P آپاتیت شکل گرفته برای کلسیم سیلیکات خالص و کامپوزیت آن، به ترتیب حدود ۱/۷۲ و ۱/۵۸ است (۱۰). برخی مطالعات نشان می‌دهند که تبادل یونی بین یون‌های کلسیم (Ca²⁺) و یون‌های هیدروژن (H⁺) در سطح نمونه رخ می‌دهد و منجر به تشکیل لایه‌ای از سیلیس آمورف می‌شود که مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی آپاتیت فراهم می‌کند. تفاوت

خواص مکانیکی چندان مناسبی برای استفاده در بافت استخوان ندارد، به همین دلیل لازم است با کامپوزیتی کردن آن خواص مکانیکی آن را بهبود بخشید. برای اولین بار از گرافن، برای افزایش چقرمگی سرامیک‌های برپایه نیتريد سیلیسیم بهره گرفته شد (۲۱). به طوری که ذرات ورقه‌ای گرافن را به طور یکنواخت در میان ذرات سرامیکی نیتريد سیلیکون پراکنده کرده و سپس با استفاده از روش تف‌جوشی قوس پلاسمایی در دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد متراکم شد. نتایج نشان داد که با افزودن گرافن در مقادیر حجمی ۱/۵ تا ۲/۵ درصد وزنی، چقرمگی شکست از ۲/۸ به ۶/۶ مگاپاسکال رادیکال‌متر افزایش می‌یابد. دلیل افزایش چقرمگی، به واسطه احاطه شدن دانه‌های سرامیکی به وسیله ذرات صفحه‌ای گرافن است. به عبارتی گرافن، دانه‌های سرامیکی را پوشش داده و ترک‌های در حال گسترش را نه تنها در دو بعد، بلکه در سه بعد نیز منحرف می‌کند. بیشترین چقرمگی شکست، معادل با ۸ MPa·m^{1/2} و بالاترین عدد سختی ۱۸/۸ GPa برای نمونه با یک درصد وزنی بود. نتایج تست رامان برای نانوکامپوزیت گرافن-آلومینا که با استفاده از فرآیند آسیاکاری و تف‌جوشی در کوره تحت خلا ساخته شده بودند، نشان دهنده آگلومره شدن صفحات گرافن و ایجاد برخی عیوب ساختاری در گرافن است (۲۲). از نانورقه‌های اکسید گرافن، با غلظت ۰/۵ و ۱ درصد وزنی، در ساخت داربست کامپوزیتی ژلاتین-هیدروکسی آپاتیت برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی و تمایز استخوانی استفاده گردید (۲۳). نتایج نشان‌دهنده کاهش تدریجی داربست کامپوزیتی با افزایش حضور اکسید گرافن است. داربست‌های حاوی ۱/۵ درصد اکسید گرافن به مدت ۶۰ روز در محلول بافر فسفات سالین^۷ غوطه‌ور شدند که طی آن گرافن به شکلی پایدار و خطی آزاد شد، سمیت کمی داشت و آزمایش‌های کشت سلولی^۸ نشان‌دهنده افزایش القای استخوان‌سازی^۹ است. کامپوزیت کلسیم سیلیکات و اکسید گرافن کاهش یافته که با استفاده از روش هیدروترمال و فرآیند پرس ایزواستاتیک گرم در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید شده، مورد ارزیابی خواص مکانیکی و زیستی قرار گرفته است و نتایج نشان از بهبود خواص

(خاصیت زیست‌فعالی) و خواص مکانیکی (استحکام، چقرمگی و سختی) مشخصه‌یابی شد تا بدین وسیله تاثیر درصد اکسید گرافن بر خواص زیستی و مکانیکی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

در این مطالعه از مواد اولیه آکرامنیت (خلوص ۹۹ درصد- شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان- شرکت کیمیا زیست ترمیم با کد Ak-N)، اکسید گرافن کاهش یافته (خلوص ۹۹/۹ درصد- کاراپژوهش امیرکبیر)، اتانول (خلوص ۹۹/۸ درصد- پارس الکل)، محلول شبیه‌سازی شده بدن (مطابق جدول ۱ - آپاتک)، آب دیونیزه، پلی وینیل الکل^{۱۵} (خلوص ۹۹/۹۹ درصد- مرک) در مراحل مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۲- آماده سازی مواد اولیه

در ابتدا دوغاب همگن و پایدار از آکرامنیت و اکسید گرافن کاهش یافته، به‌طور جداگانه در اتانول با استفاده از همزن مغناطیسی (به مدت سه ساعت و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، تهیه شدند. در مرحله بعد، با مخلوط کردن سوسپانسیون‌های فوق به نسبت‌های مختلف (طبق جدول ۲) و عمل همزدن به مدت دو ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد روی همزن مغناطیسی، سوسپانسیون‌های کامپوزیتی حاصل شدند. جهت همگن‌سازی و همچنین ریزترشدن ورقه‌های اکسید گرافن کاهش یافته، دوغاب‌های مخلوط تهیه شده، مورد آسیاکاری گلوله‌ای با نسبت وزنی گلوله‌های زیرکونیا به دوغاب ۲ به ۱، مدت دو ساعت و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفتند. دوغاب‌های پایدار (حداقل به مدت ۱۰ الی ۱۲ ساعت مخلوط دوغاب در دمای محیط نگه داشته شده که ته‌نشینی نداشت) و همگن‌سازی شده به مدت سه روز در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در یک خشک‌کن قرار گرفته و بدین ترتیب پودر کامپوزیتی مورد نظر از آکرامنیت- اکسید گرافن کاهش یافته حاصل شد که از الک با مش ۲۳۰ عبور داده شدند.

مورفولوژیکی هیدروکسی آپاتیت رشد کرده در محلول شبیه‌سازی شده بدن برای نمونه‌های با مقادیر اکسید گرافن مختلف، می‌تواند به تغییرات غلظت یونی عناصر مختلف اعم از کلسیم، فسفر، سیلیسیم در داخل محلول و pH آن نسبت داده شود. بررسی تست زیست‌فعالی، برای کامپوزیت زیستی متشکل از اکسید گرافن کاهش یافته، سیلیکات روی و سیلیکات کلسیم، نشان‌دهنده وجود نانوکریستال‌های آپاتیت روی سطوح کامپوزیت زیستی می‌باشد (۱۲). همچنین، تست تکثیر سلولی نشان می‌دهد که آزادسازی سیلیسیم و روی از ترکیب زیستی، باعث افزایش قابل توجهی در استخوان‌سازی سلول‌های بنیادی مزانشیمی^{۱۲} شده است. علاوه بر این، فعالیت آلكالین فسفاتاز با اعمال جریان مستقیم سه میکروآمپر برای تحریک سلول‌های کشت داده شده روی سطح کامپوزیت بهبود یافته و می‌تواند کامپوزیت زیستی الکترونیکی با رسانایی نسبتاً خوب ساخت که پتانسیل بالقوه‌ای برای ترمیم استخوان در موارد پوکی استخوان است. با توجه به آنچه گفته شد، نقش گرافن در افزایش خواص مکانیکی سرامیک‌های زیستی بدون این‌که خواص زیستی آن‌ها را کاهش دهد، کاملاً مشهود است. از طرفی اثر گرافن و یا مشتقات آن روی آکرامنیت کمتر کار شده و لازم است تا اثر درصد اکسید گرافن کاهش یافته روی خواص زیستی و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا، در این کار کامپوزیت‌های زیستی بر پایه آکرامنیت، شامل درصد‌های مختلف از اکسید گرافن کاهش یافته (۵/۰، ۱ و ۵/۱ درصد وزنی)، به عنوان تقویت‌کننده از نظر خواص زیستی و خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، ابتدا سنتز پودر آکرامنیت به روش سل-ژل انجام شده و در ادامه آسیاکاری تر جهت مخلوط مواد اولیه، دانه‌بندی، تراکم سرد و عملیات حرارتی تف‌جوشی در کوره تیوبی تحت حفاظت گاز آرگون در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت انجام شد. نمونه‌های حاصل پس از تف‌جوشی، از نظر ترکیب فازی با استفاده از آزمون تفرق اشعه ایکس^{۱۳}، ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^{۱۴}، خواص زیستی

جدول ۱- pH و آنالیز محلول SBF مورد استفاده

ترکیب	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
mol/lit	۱۴۲	۵	۱/۵	۲/۵	۱۴۷/۸	۴/۲	۱	۰/۵
pH	۷/۴ ± ۰/۲							

جدول ۲- نمونه‌های شاهد و کامپوزیتی مورد مطالعه

کد نمونه	درصد وزنی آکریل	درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته
AK	۱۰۰	۰
AK-0.5 rGO	۹۹/۵	۰/۵
Ak-1 rGO	۹۹	۱
AK-1.5 rGO	۹۸/۵	۱/۵

۲-۳- تهیه نمونه‌های کامپوزیتی

از روش پرس سرد (قالب فولادی، فشار ۱۲۰ مگاپاسکال)، برای تهیه قرص‌های کامپوزیتی آکریل-رGO استفاده شد. قبل از پرس کردن مقداری پلی وینیل الکل (۲ درصد وزنی) به پودرها، جهت دستیابی به قرص‌هایی با استحکام بیشتر افزوده شد. قرص‌های کامپوزیتی برای تفجوشی شدن در درون کوره تیوبی تحت حفاظت گاز آرگون به مدت سه ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه قرار گرفتند.

۲-۴- مشخصه‌یابی

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی، در ابتدا عملیات سنباده‌زنی سطح نمونه‌ها با سنباده‌های با گریدهای مختلف (از ۲۰۰ تا ۱۵۰۰) و در ادامه عملیات پولیش‌کاری با سوسپانسیون آلومینایی انجام شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل (MIRA III, TESCAN, Czech Republic)، مشاهدات ریزساختار سطح و مقطع شکست نمونه‌ها انجام شد. همچنین برای تجزیه و تحلیل عناصر موجود در فازهای مختلف روی ریزساختار، طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDAX-SAM-X) نیز انجام شد. برای بررسی ترکیب فازی نمونه‌های کامپوزیتی تفجوشی شده

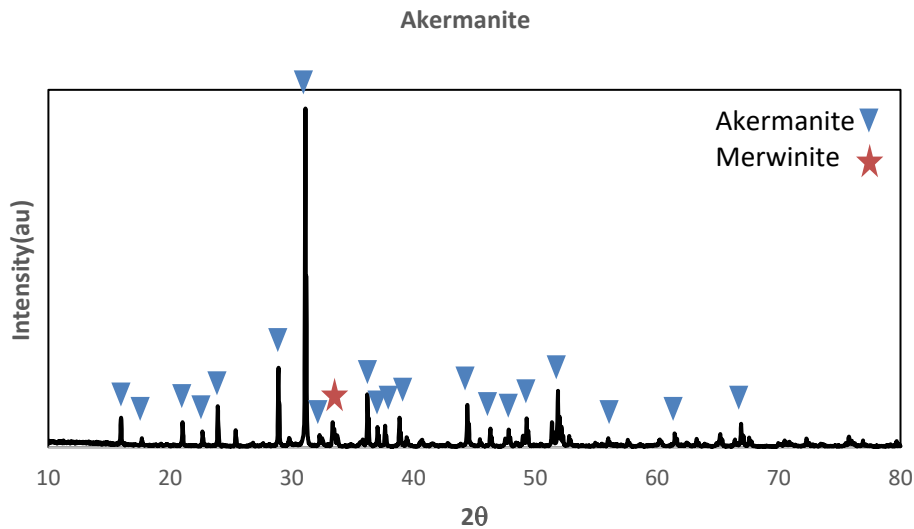
از آزمون تفرق اشعه ایکس (دستگاه Panalytical مدل X'pertPro) استفاده شد. در این آزمون، از پرتو تک‌فام مس با طول موج ۱/۵۴ Å، ولتاژ شتاب‌دهنده ۴۰ kv و شدت جریان ۳۰ mA استفاده شد. همچنین زمان شمارش ۰/۵ ثانیه، مقدار هر گام ۰/۰۲ درجه و منطقه بررسی بین ۱۰ تا ۸۰ درجه انتخاب شد. از نرم‌افزار پردازش تصویر ImageJ برای محاسبه اندازه دانه‌ها استفاده شد. از دستگاه سختی‌سنجی ویکرز (مدل Instron Wolpert، فرورونده الماسی-هرمی با قاعده مربع و زاویه ۱۳۶ درجه، بار اعمالی یک کیلوگرم، مدت زمان ۱۰ ثانیه) برای اندازه‌گیری قطر اثر ایجاد شده و از رابطه (۱) برای محاسبه عدد سختی ویکرز نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد (۸). میانگین سه اندازه‌گیری به‌عنوان عدد سختی در نظر گرفته شد.

$$HV = 2F \sin(136^\circ/2) \div d^2 \sim 1.854F/d^2 \quad (1)$$

که در آن HV عدد سختی ویکرز، F نیروی اعمال شده (بر حسب کیلوگرم) و d میانگین قطر فرورفتگی (بر حسب میلی‌متر) است. برای محاسبه چقرمگی شکست، از تست نفوذ دندان‌های ویکرز استفاده شد. به طوری که طول ترک شکل گرفته و قطر اثر ایجاد شده، اندازه‌گیری شده و در مرحله بعد با استفاده از رابطه (۲) عدد چقرمگی محاسبه گردید (۸)

$$K_{IC} = 0.016 (E/H)^{1/2} (P/C^{3/2}) \quad (2)$$

که در آن KIC چقرمگی نفوذی (MPa m^{1/2}) است، E مدول



شکل ۱- آنالیز XRD برای پودر آکرمانیت خریداری شده.

(۱) آمده است. مطابق آن پیک‌های کوچکی مربوط به فاز مروینیت مشاهده می‌شود و پیک‌های مربوط به آکرمانیت با پیک‌های در طیف استاندارد آکرمانیت تطابق دارند.

۳-۲- نتایج ریزساختاری و ترکیب فازی نمونه‌های شاهد و کامپوزیتی

مطابق شکل‌های (۲) و (۳) که نتایج مشاهدات ریزساختاری نمونه شاهد و نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهند، با حضور اکسید گرافن کاهش یافته در آکرمانیت، به‌طور جزئی ناهمگنی و تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی افزایش یافته است. به عبارتی اکسید گرافن کاهش یافته، به دلیل عدم ترشوندگی خوب با ذرات آکرمانیت قابلیت تف‌جوشی شدن را کاهش داده و تخلخل و ناهمگنی ریزساختار را افزایش می‌دهد (۳). لازم به ذکر است اکسید گرافن، دارای گروه‌های عاملی اکسیژنی مانند هیدروکسیل (-OH) و اپوکسید (-O-) روی سطح خود است که فعالیت‌های فیزیکی و شیمیایی و برقراری پیوند با زمینه کامپوزیت را تضمین می‌نماید (بهبود قابلیت ترشوندگی)، اما برای اکسید گرافن کاهش یافته، به دلیل حذف گروه‌های عاملی اکسیژنی که مسئول خاصیت ترشوندگی هستند قابلیت ترشوندگی کاهش

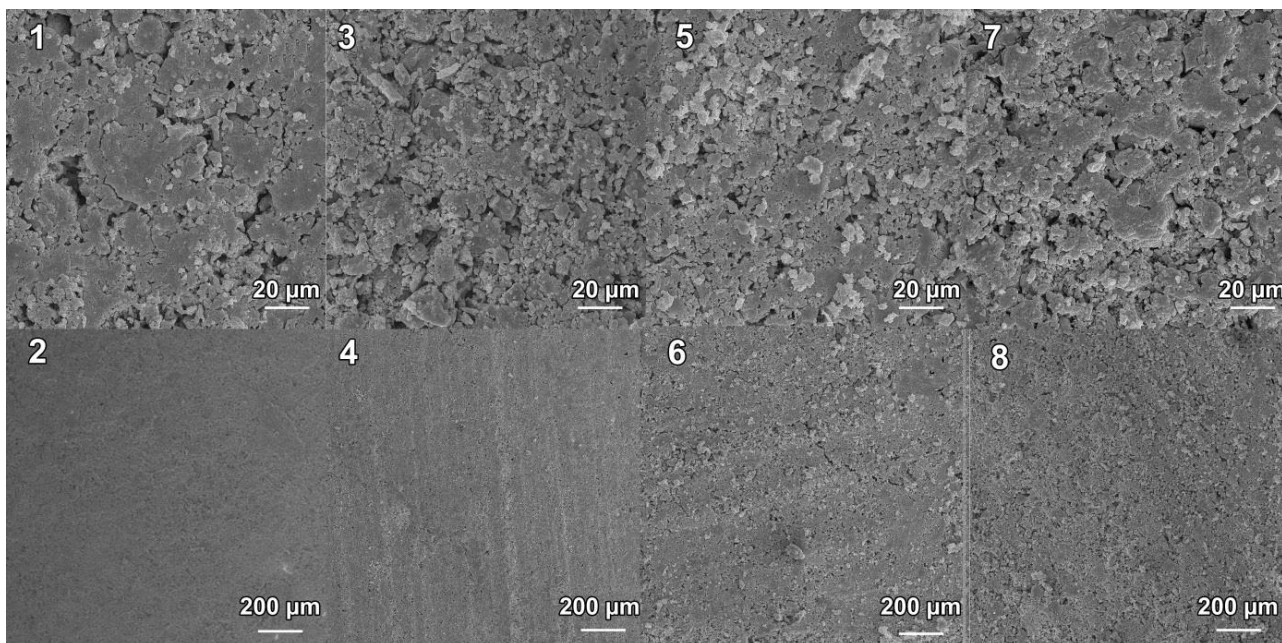
الاستیک (GPa)، H سختی ویکرز (GPa)، P بار نفوذ (N) و C طول نیمه ترک‌های شعاعی روی سطح (متر) پس از نفوذ ویکرز می‌باشد.

به منظور بررسی قابلیت تشکیل آپاتیت، نمونه کامپوزیتی بهینه از نظر ریزساختار، ترکیب فازی و خواص مکانیکی Ak-rGO (1%)، و نمونه شاهد (Ak) مورد تست زیست‌فعال قرار گرفتند. برای هر یک از نمونه‌ها به تعداد سه عدد در ۵۰ میلی‌لیتر محلول شبیه‌سازی شده بدن با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد (جدول ۱) غوطه‌ور شدند و پس از ۳، ۷ و ۱۴ روز به ترتیب یکی از آنها خارج شدند، با آب مقطر شسته شده و خشک شدند. در ضمن هر سه روز یک بار، محلول خارج شده و نمونه‌ها با آب مقطر شسته شدند و مجدداً در محلول تازه قرار گرفتند. برای بررسی مورفولوژی و ترکیب فازی سطح، نمونه‌ها به ترتیب مورد مشاهدات میکروسکوپی و آزمون تفرق اشعه ایکس قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز نمونه آکرمانیت خریداری شده

به منظور تأیید صحت ترکیب شیمیایی آکرمانیت خریداری شده، آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) انجام شد که نتایج آن در شکل



شکل ۲- تصاویر FESEM برای نمونه‌های کامپوزیتی تف‌جوشی شده:

۱ و ۲) نمونه شاهد، ۳ و ۴) AK-0.5 wt% rGO، ۵ و ۶) AK-1wt%rGO، ۷ و ۸) AK-1.5wt%rGO

نقطه‌ای روی تصویر FESEM) برای نمونه‌های کامپوزیتی Ak-1.5rGO (شکل ۵)، به خوبی حضور کربن با توزیع یکنواخت در کنار آکرامنیت را نشان می‌دهد. بزرگی پیک اکسیژن به دلیل حضور آن با نسبت بالا در در آکرامنیت و همین‌طور حضور آن در اکسید گرافن کاهش یافته است.

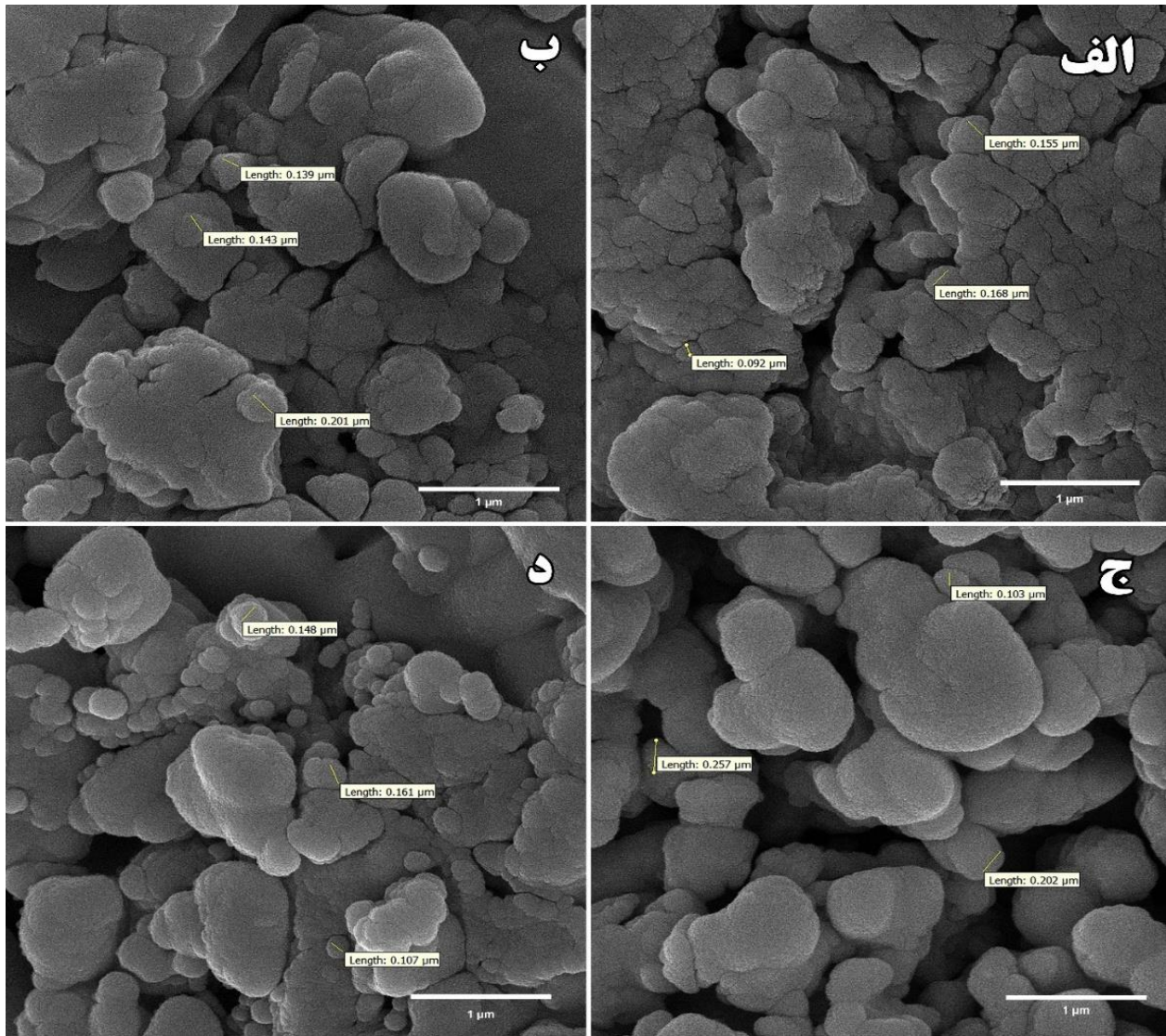
۳-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی

نتایج مربوط به چگالی نسبی نمونه‌های تف‌جوشی شده (جدول ۳)، نشان‌دهنده کاهش چگالی نسبی و افزایش تخلخل با افزایش درصد گرافن است. به عبارتی با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته، چگالی نسبی از ۹۴/۹ برای نمونه شاهد به ۸۹/۳ درصد برای نمونه یک و نیم درصد وزنی رسیده و تخلخل از ۵/۱ برای نمونه شاهد به ۱۰/۷ درصد برای نمونه یک و نیم درصد وزنی می‌رسد. لازم به ذکر است که اکسید گرافن کاهش یافته ترشوندگی خوبی با آکرامنیت نداشته و به همین دلیل بعد از عمل تف‌جوشی، ریزساختار با حضور اکسید گرافن کاهش یافته متخلخل است (مطابق آنچه در مورد شکل‌های ۲ و ۳ گفته شد) (۲۸).

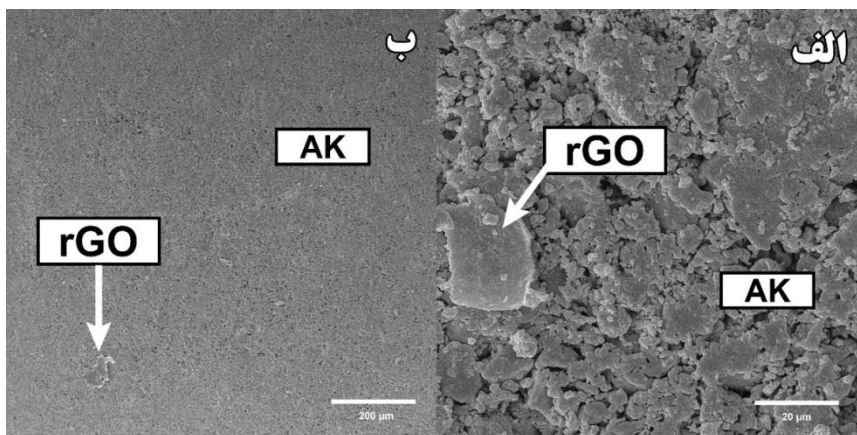
می‌یابد. انجام فرآیند احیاء در جهت حذف گروه‌های عاملی (هیدروکسیل، کربوکسیل، کربونیل، استر، اپوکسی و ...) و کاهش عیوب ساختاری لازم است؛ چراکه رسانایی حرارتی و الکتریکی و همین‌طور مقاومت مکانیکی آن را به عنوان تقویت‌کننده افزایش می‌دهد (۲۳). همچنین طبق شکل (۳)، اندازه دانه‌های کریستالی در مقیاس نانومتری است و می‌توان نمونه‌ها را نانوکامپوزیتی محسوب نمود. اندازه متوسط دانه‌های کریستالی، از ۱۳۸/۰ برای نمونه شاهد به ۱۸۷/۰ میکرومتر برای نمونه یک و نیم درصد وزنی افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که انرژی سطحی آکرامنیت در برابر اکسید گرافن کاهش یافته، به‌طور قابل توجهی بالاتر است (۱۲)؛ به همین دلیل در ضمن فرآیند پخت برای کاهش انرژی سطحی خود رشد دانه را انجام می‌دهد.

مطابق شکل (۴) که با بزرگ‌نمایی بالاتر گرفته شده است، به خوبی ذرات ورقه‌ای شکل قابل مشاهده است که با توجه به پیشینه تحقیق، این نوع ذرات به اکسید گرافن کاهش یافته مربوط می‌شوند (۱۰).

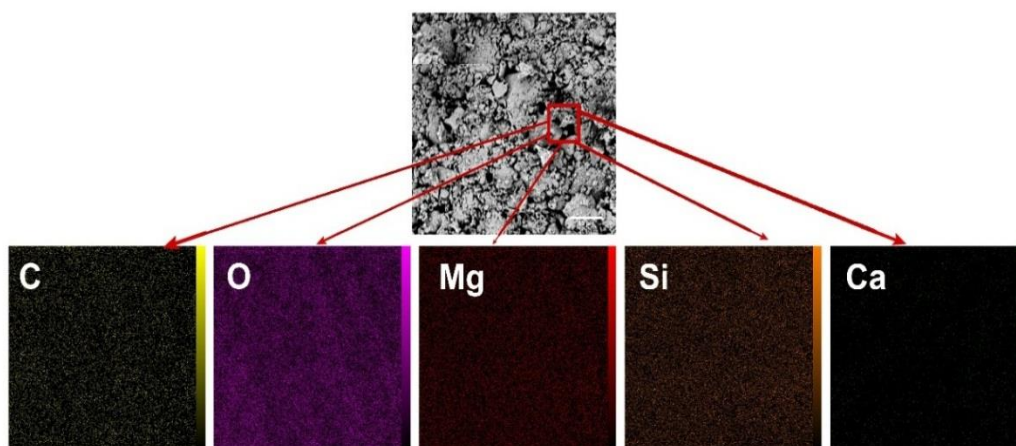
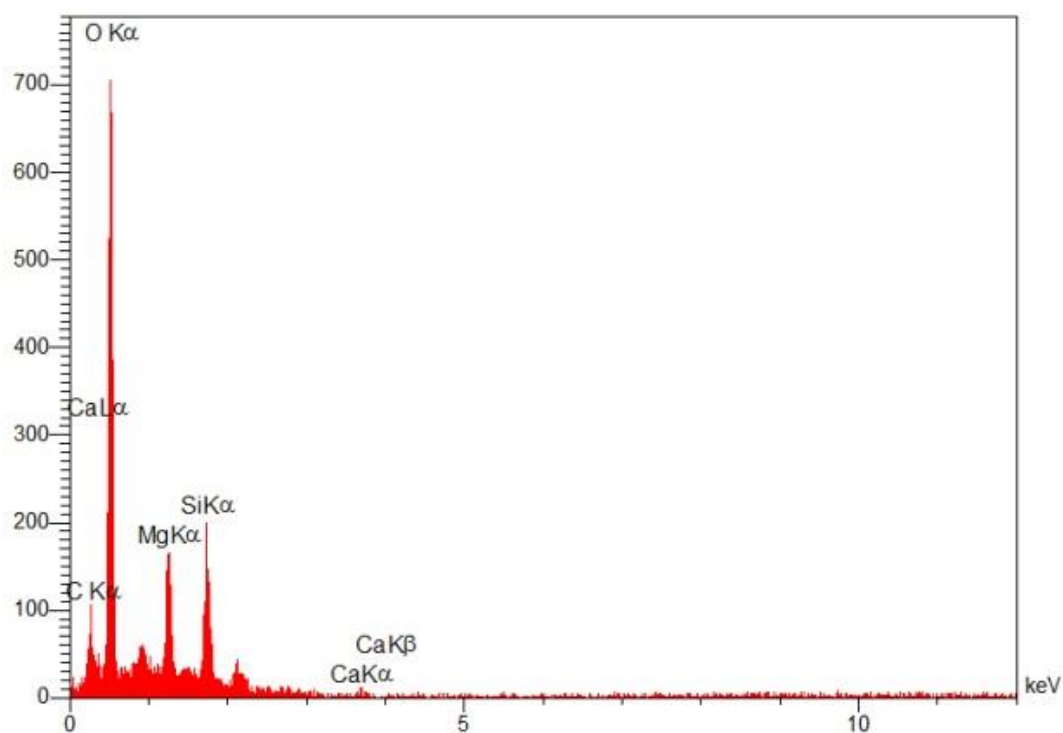
نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس (آنالیز



شکل ۳- اندازه دانه‌های کریستالی برای نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب (الف) نمونه شاهد (اکرمانیت)، (ب) Ak-0.5rGO، (ج) Ak-1rGO، (د) Ak-1.5rGO.



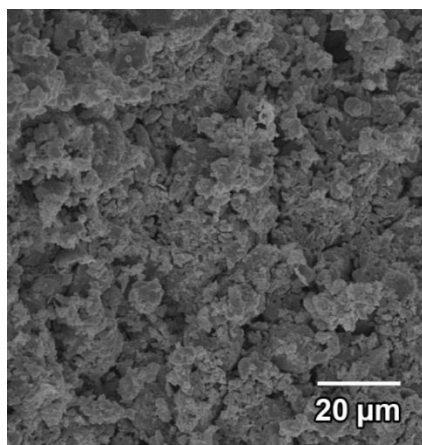
شکل ۴- حضور صفحات اکسید گرافن کاهش یافته در کنار ذرات اکرمانیت در نمونه Ak-1rGO.



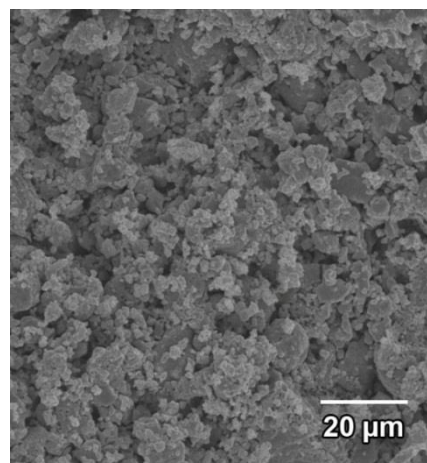
شکل ۵- نتایج آنالیز EDX برای نمونه Ak-1.5rGO.

جدول ۳- داده‌های مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی تفجوشی شده

چقرمگی MPa.m ^{1/2}	استحکام فشاری MPa	اندازه دانه متوسط (μm)	درصد تخلخل	سختی (HV)	چگالی نسبی (%)	نمونه
۱/۹	۱۳±۴	۰/۱۳۸	۵/۱	۴۳۵ ± ۱۴	۹۴/۹	Ak
۲/۵	۹±۶	۰/۱۶۱	۷/۱	۴۵۹ ± ۴	۹۲/۹	Ak-0.5%rGO
۴/۲	۱۰±۵	۰/۱۸۷	۸/۹	۵۸۸ ± ۱۱	۹۱/۱	Ak-1%rGO
۲/۷	۸±۷	۰/۱۵۸	۱۰/۷	۳۰۸ ± ۱۰	۸۹/۳	Ak-1.5%rGO



ب



الف

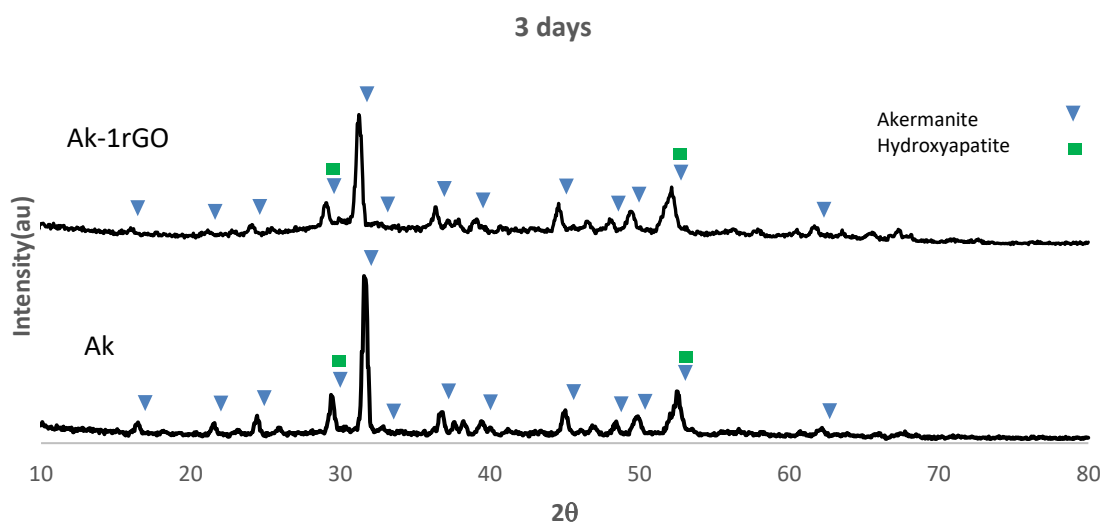
شکل ۶- مقاطع شکست نمونه‌های تست استحکام فشاری: الف) شاهد، ب) یک درصد وزنی.

سازوکارهای افزایش مقاومت به رشد ترک اعم از انحراف مسیر رشد ترک، پل زدگی ترک، دوردگی ترک (پال-اوت^{۱۶}) در حضور ورقه‌های اکسید گرافن کاهش یافته باشد. به همین دلیل سطح مقطع شکست نمونه Ak-IrGO نسبت به نمونه شاهد، ناهمواری و زبری بالاتری (شکست بین‌دانه‌ای محسوس‌تر) از خود نشان می‌دهد (شکل ۶). درحالی‌که برای نمونه شاهد سطح مقطع شکست نسبتاً صاف و با زبری کمتری است.

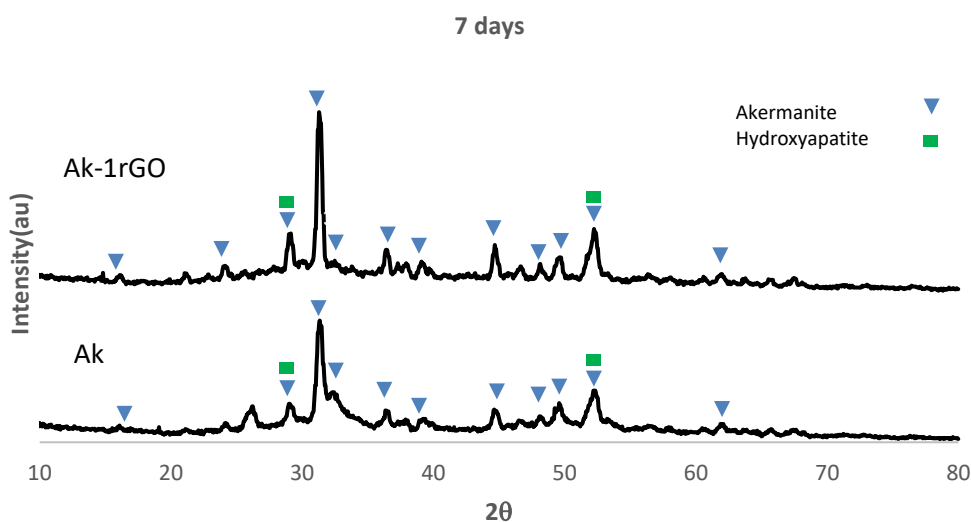
۳-۴- خواص زیستی

به منظور بررسی خاصیت زیست‌فعالی نمونه‌های Ak (به‌عنوان نمونه شاهد) و AK-IrGO (به‌عنوان نمونه کامپوزیتی باخواص بهینه از لحاظ خواص مکانیکی)، نمونه‌ها به مدت ۳، ۷ و ۱۴ روز در محلول شبیه‌ساز محیط بدن غوطه‌ور شدند. نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس برای نمونه‌ها بعد از غوطه‌وری برای مدت سه روز (شکل ۷)، نشان‌دهنده شکل‌گیری هیدروکسی آپاتیت روی سطح هر دو نمونه است. اما برای نمونه کامپوزیتی با یک درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته یک زمینه در طیف تفرق اشعه ایکس وجود دارد که به آمورف بودن بخشی از آپاتیت‌های شکل‌گرفته با حضور اکسید گرافن مربوط است. شدت پیک‌ها برای نمونه کامپوزیتی نسبتاً قوی‌تر است که نشان‌دهنده تقویت خاصیت زیست‌فعالی با حضور اکسید گرافن کاهش یافته است.

نتایج استحکام فشاری (جدول ۳)، نشان‌دهنده کاهش استحکام از ۱۳ برای نمونه شاهد به ۸ مگاپاسکال برای نمونه کامپوزیتی AK-1.5rGO است. کاهش استحکام می‌تواند به دلیل افزایش تخلخل و ایجاد ناهمگنی در ریزساختار برای نمونه‌های کامپوزیتی با حضور اکسید گرافن کاهش یافته باشد. البته این کاهش برای نمونه با یک درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته کمتر است؛ چراکه ریزساختار نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی دارای ناهمگنی کمتری است. نتایج سختی (جدول ۳) نشان می‌دهد که مقدار سختی از ۴۳۵ برای آکرمانیت به ۵۸۸ ویکرز برای AK-IrGO افزایش یافته اما مجدداً برای نمونه AK-1.5rGO سختی به ۳۰۸ ویکرز کاهش یافته است. تغییرات عدد چقرمگی نیز همان رویه تغییرات سختی را داشته (جدول ۳) و از ۱/۹ برای نمونه شاهد به ۴/۲ مگاپاسکال رادیکال‌متر برای نمونه AK-IrGO افزایش یافته اما مجدداً به ۲/۷ برای نمونه AK-1.5rGO کاهش می‌یابد. درحقیقت نمونه AK-IrGO، به دلیل ریزساختار همگن‌تر از نظر توزیع یکنواخت اکسید گرافن در آن و همین‌طور ریزبودن تخلخل‌ها نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی، خواص مکانیکی (سختی و چقرمگی) بهتری از خود نشان می‌دهد. در ضمن استحکام فشاری آن هرچند از نمونه شاهد کمتر است اما نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی وضعیت بهتری دارد. بالاتر بودن چقرمگی برای نمونه AK-IrGO، می‌تواند به دلیل فعال‌تر بودن



شکل ۷- آنالیز XRD برای نمونه‌های شاهد (آکرمانیت) و Ak-1% rGO. بعد از غوطه‌وری به مدت سه روز در محلول شبیه‌ساز بدن.

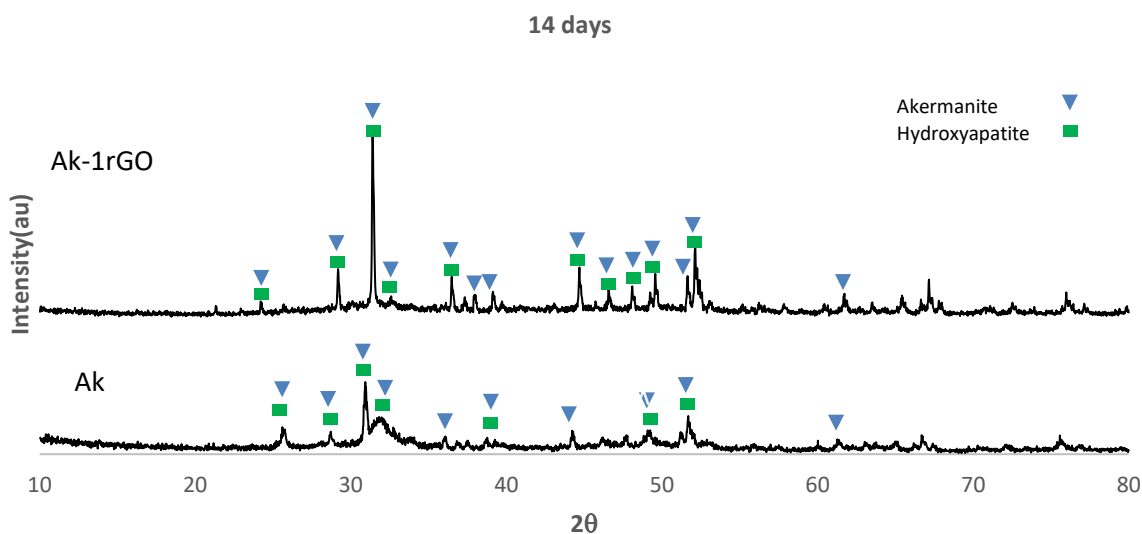


شکل ۸- نتیجه آنالیز XRD برای نمونه‌های Ak و Ak-1% rGO. بعد از غوطه‌وری به مدت هفت روز در محلول شبیه‌ساز بدن.

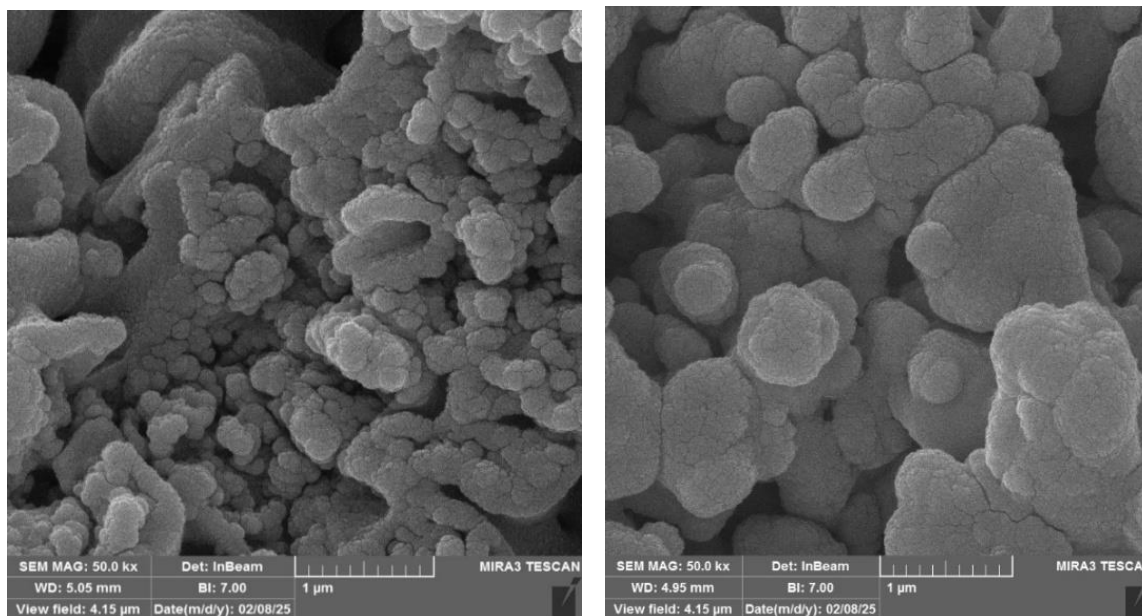
سطح نمونه کامپوزیتی بهبود می‌یابد. این درحالی است که برای نمونه شاهد بهبود زیست‌فعالی در حد نمونه کامپوزیتی نیست. لازم به ذکر است که علاوه بر هیدروکسی آپاتیت، انواع آپاتیت هم روی سطح نمونه‌ها شکل می‌گیرند که به دلیل آمورف بودن در طیف اشعه ایکس ظاهر نمی‌شوند.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی برای نمونه‌های شاهد و کامپوزیتی پس از مدت ۳، ۷ و ۱۴ روز غوطه‌وری در

برای دو نمونه غوطه‌ور شده در محلول شبیه‌سازی شده بدن برای مدت طولانی‌تر (به مدت هفت روز)، نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس نشان‌دهنده ظهور تعداد پیک بیشتر برای هیدروکسی آپاتیت (شکل ۸) است. برای غوطه‌وری به مدت ۱۴ روز (شکل ۹)، شدت پیک‌های آکرمانیت کاهش یافته و در عوض شدت پیک‌های هیدروکسی آپاتیت افزایش یافته است و نشان می‌دهد با افزایش زمان غوطه‌وری، شکل‌گیری هیدروکسی آپاتیت روی



شکل ۹- نتیجه آنالیز XRD برای نمونه‌های Ak و Ak-1% rGO بعد از غوطه‌وری به مدت ۱۴ روز در محلول شبیه‌ساز بدن.



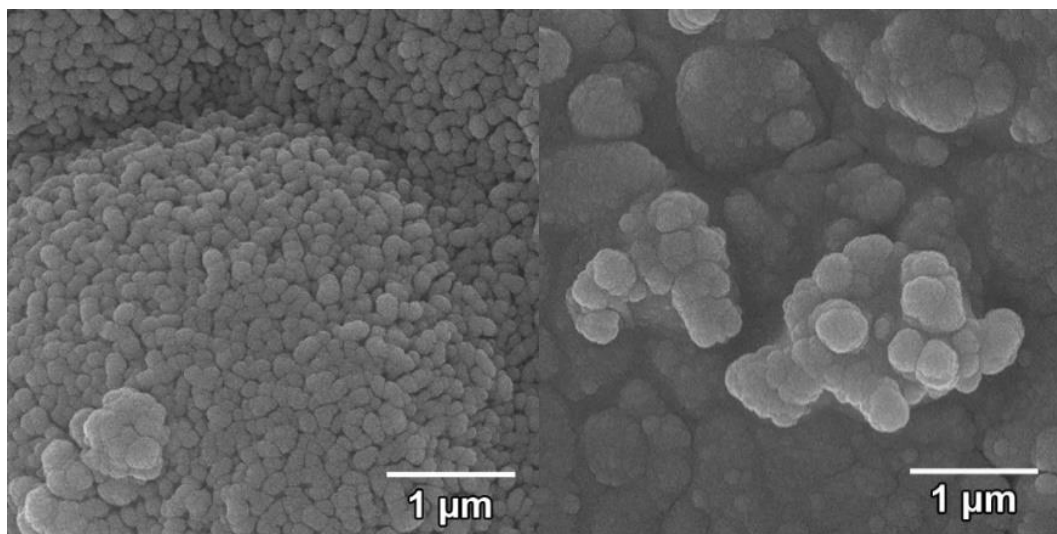
ب: Ak-1rGO

الف: شاهد

شکل ۱۰- نتایج FESEM: (الف) نمونه شاهد و (ب) نمونه Ak-1rGO پس از سه روز غوطه‌وری در محلول SBF.

افزایش داده و قابلیت زیست‌فعالی آکرمانیت را افزایش می‌دهد. حضور اکسید گرافن البته تاثیرگذاری قابل توجهی بر مورفولوژی و اندازه ذرات آپاتیت زیستی ندارد. با افزایش زمان غوطه‌وری از ۳ تا ۱۴ روز، مقدار آپاتیت‌های شکل‌گرفته مرتب زیاد شده و پوشش سطحی کامل‌تری از رسوبات آپاتیته به شکل گل‌کلمی

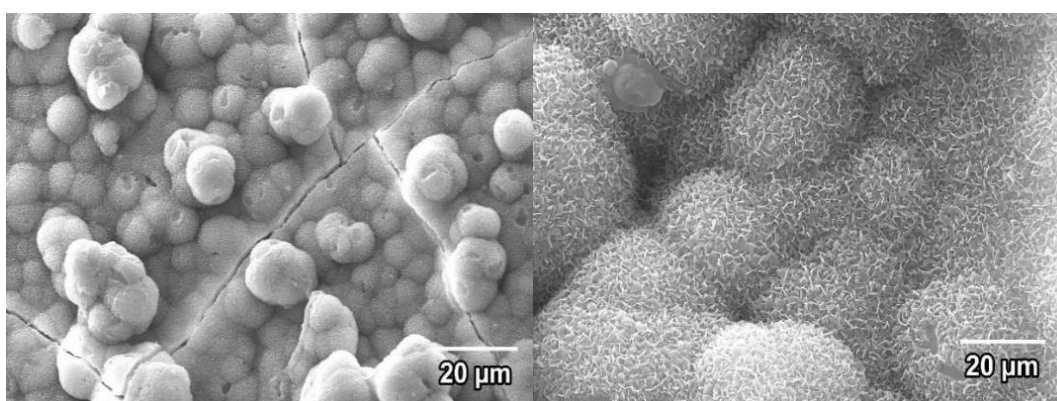
شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) آمده است که مطابق با آن، به خوبی می‌توان شکل‌گیری آپاتیت و هیدروکسی آپاتیت را مشاهده کرد. وجود رسوبات آپاتیت روی سطح، نشان‌دهنده این است که اکسید گرافن کاهش‌یافته نه تنها مانع تشکیل رسوبات آپاتیته نمی‌شود که حتی شکل‌گیری آن‌ها را نسبت به نمونه شاهد



ب: Ak-IrGO

الف: شاهد

شکل ۱۱- نتایج FESEM: (الف) نمونه شاهد و (ب) نمونه Ak-IrGO پس از هفت روز غوطه‌وری در محلول SBF.



ب: Ak-IrGO

الف: شاهد

شکل ۱۲- نتایج FESEM: (الف) نمونه شاهد و (ب) نمونه Ak-IrGO پس از ۱۴ روز غوطه‌وری در محلول SBF.

که می‌تواند به دلیل تراکم و ضخامت بالای رسوبات آپاتیتی باشد و لازم بوده تا سرعت خشک کردن (در سیکل حرارت‌دهی و خنک کردن)، آهسته‌تر باشد. نمونه شاهد تنها پس از ۱۴ روز غوطه‌وری توانسته رسوبات گل‌کلمی از خود نشان دهد (شکل ۱۲-الف). درحالی‌که نمونه‌های کامپوزیتی از همان سه روز، رسوبات گل‌کلمی ریز از خود نشان داده که با افزایش زمان ریزی خود را حفظ نموده اما تراکم آن به‌طور محسوس افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۰-ب، ۱۱-ب و ۱۲-ب).

برای نمونه‌ها، به‌خصوص برای نمونه کامپوزیتی حاصل می‌شود. پس از سه روز غوطه‌وری (شکل ۱۰)، شکل‌گیری رسوبات آپاتیت روی سطح نمونه‌ها محدود بوده و تعداد محدودی از رسوبات گل‌کلمی قابل مشاهده است، اما با این وجود برای نمونه کامپوزیتی شکل‌گیری رسوبات وضعیت بهتری دارد و رسوبات ریزتر و با تراکم بالاتری شکل گرفته است. برای مدت ۱۴ روز ترک‌های انقباضی برای نمونه کامپوزیت مشاهده می‌شود (شکل ۱۲-ب) که در ضمن مرحله خشک کردن سطح رخ داده است.

۴- نتیجه گیری

نتایج مشخصه‌یابی نمونه‌های مختلف کامپوزیتی و شاهد نشان می‌دهد:

۱. با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته، کاهش چگالی نسبی از ۹۴/۹ برای نمونه شاهد به ۸۹/۳ درصد برای نمونه کامپوزیتی (یک و نیم درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته) و افزایش تخلخل از ۵/۱ برای نمونه شاهد به ۱۰/۷ درصد برای نمونه یک و نیم درصد وزنی را خواهیم داشت.
۲. با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته، افزایش چقرمگی از ۱/۹ برای نمونه شاهد به ۴/۲ مگاپاسکال رادیکال متر برای نمونه یک درصد وزنی را داشته اما مجدداً به ۲/۷ مگاپاسکال رادیکال متر برای نمونه یک و نیم درصد وزنی کاهش پیدا می‌کند.
۳. نتایج اندازه‌گیری سختی نشان می‌دهد که سختی از ۴۳۵ برای نمونه شاهد به ۵۸۸ ویکرز برای نمونه یک درصد وزنی افزایش یافته اما مجدداً به ۳۰۸ ویکرز برای نمونه یک و نیم درصد وزنی کاهش می‌یابد.

۴. با حضور اکسید گرافن کاهش یافته، استحکام فشاری کاهش یافته و از ۱۳ برای نمونه شاهد به ۸ مگاپاسکال برای نمونه کامپوزیتی یک و نیم درصد وزنی اکسید گرافن می‌رسد.

۵. از بین نمونه‌های کامپوزیتی، همگن‌ترین ریزساختار (ریزی تخلخل‌ها و توزیع همگن آن‌ها)، مربوط به نمونه یک درصد وزنی اکسید گرافن کاهش یافته است؛ به همین دلیل بالاترین خواص مکانیکی (چقرمگی و سختی) برای این نمونه حاصل شده است.

۶. نتایج تست‌های زیست‌فعالی برای نمونه شاهد و کامپوزیتی (یک درصد وزنی اکسید گرافن) از سه تا ۱۴ روز، نشان می‌دهد که با حضور اکسید گرافن کاهش یافته تشکیل رسوبات آپاتیت روی سطح نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه شاهد، به‌طور محسوسی بهبود یافته است. با افزایش زمان

غوطه‌وری از سه تا ۱۴ روز، یک مورفولوژی ریزتر و متراکم‌تری از رسوبات آپاتیتی بر سطح حاصل می‌شود. به عبارتی اکسید گرافن نه تنها مانع از تشکیل لایه آپاتیت نمی‌شود بلکه قابلیت زیست‌فعالی را علاوه بر خواص مکانیکی افزایش می‌دهد.

۷. اگرچه اصولاً هدف، افزایش تمام خواص مکانیکی اعم از چقرمگی، سختی و استحکام فشاری بود، اما به دلیل عدم ترشوندگی و عدم اتصال قوی اکسید گرافن کاهش یافته به آکرمینیت و افزایش تخلخل و ناهمگنی در ریزساختار، استحکام کاهش می‌یابد. اما هدف مهم که کاهش تردی آکرمینیت بود نائل شدیم (افزایش چقرمگی). پیشنهاد می‌شود در کارهای بعدی، با اضافه کردن افزودنی‌های مناسب بدون اینکه گروه‌های عاملی روی سطح ورقه‌های گرافن را افزایش دهد، ترشوندگی آن را بهبود داده و با افزایش قابلیت تف‌جوشی شدن استحکام آن هم افزایش یابد.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از موسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

فرزاد مالمیر: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن مقاله. **مهدی کلاتر:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، تحلیل و تفسیر داده‌ها، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه. **مژده عزیز:** اعتبارسنجی نتایج، تحلیل و تفسیر داده‌ها. **مسعود مشرفی فر:** نوشتن مقاله.

واژه نامه

1. bone formation
2. osteoblast cell proliferation
3. porous scaffold
4. osteoblast adhesion
5. cell growth motility
6. reduced graphen oxide (rGO)
7. phosphate buffered saline (PBS)
8. cell culture
9. tendency to bone formation
10. simultad body fluid (SBF)
11. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDXS)
12. mesenchymal stem cells
13. X-ray diffraction (XRD)
14. field emission scanning electron microscopy (FESEM)
15. poly vinyl alcohol (PVA)
16. pull-out

مراجع

1. Shackelford JF. Bioceramics (1-Advanced ceramics). New Jersey: CRC Press, Taylor and Francis Group; 1999.
2. Mortazavi WAS, Fathi MH. Introduction to biomaterials. 2nd ed. Isfahan: Arkan Publications; 2002. p. 344.
3. Xiong K, Wu T, Fan, Q, Chen, L, Yan, M. Novel reduced graphene oxide/zinc silicate/ calcium silicate. electroconductive biocomposite for stimulating osteoporotic bone regeneration. ACS Appl Mater Interfaces 2017;9(51):1-41. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16206>
4. Wu C, Chang J. Synthesis and apatite-formation ability of akermanite. Mater Lett. 2004;58(19):2415-2417. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.02.039>
5. Mojtaba A, Farzad M, Amir S. Preparation and characterization of akermanite/merwinite scaffolds for bone tissue repair. J Biomim Biomater Biomed Eng. 2020;44:73-81. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.44.73>
6. Bhatkar VB, Bhatkar NV. Combustion synthesis and photoluminescence study of silicate biomaterials. Bull Mater Sci. 2011;34:1281-1284. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0166-5>
7. Wu C, Chang J, Zhai W, Ni S, Wang J. Porous akermanite scaffolds for bone tissue engineering: Preparation, characterization, and in vitro studies. J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater. 2006;78(1):47-55. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30456>
8. Ducheyne P, Hastings GW. Metal and ceramic biomaterials. Vol. 1: Structure. New Jersey: CRC Press, Taylor and Francis Group; 1984.
9. Fariborz T, Caleb A, Keivan D. Synthesis, characterization and formation mechanisms of nanocrystalline akermanite powder. J Mater Res Technol. 2021;11:792-800. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.021>
10. Mehrali M, Moghaddam E, Shirazi SFS, Baradaran S, Latibari ST. Synthesis, mechanical properties, and in vitro biocompatibility with osteoblasts of calcium silicate-reduced graphene oxide composites. ACS Appl Mater Interfaces. 2014;6(6):3947-62. <https://doi.org/10.1021/am500845x>
11. Liu XY, Ding CX, Chu PK. Mechanism of apatite formation on wollastonite coatings in simulated body fluids. Biomaterials 2004;25(10):1755-1761. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.08.024>
12. Najafinezhad A, Abdellahi M, Ghayour H, Soheily A, Chami A, Khandan A. A comparative study on the synthesis mechanism, bioactivity and mechanical properties of three silicate bioceramics. Mater Sci Eng C 2017;72:259-267. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.084>
13. Pei F, Chengde G, Cijun Sh, Shuping P. Toughening and strengthening mechanisms of porous akermanite scaffolds reinforced with nano-titania. RSC Adv 2015;5:3498-3507. <https://doi.org/10.1039/C4RA12095G>
14. Arastouei M, Khodaei M, Atyabi SM, Jafari Nodoushan M. Poly lactic acid-akermanite composite scaffolds prepared by fused filament fabrication for bone tissue engineering. J Mater Res Technol. 2020;9(6): 14540-14548. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.036>
15. Seyma D, Büsra B. Effect of akermanite powders on mechanical properties and bioactivity of chitosan-based scaffolds produced by 3D-bioprinting. Ceram Int. 2021;47:13912-13921. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.258>
16. Wu C, Chang J, Ni S, Wang J. In vitro bioactivity of akermanite ceramics. J Biomed Mater Res A 2006;76(1):73-80. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.258>
17. Ghadiri S, Hassanzadeh-Tabrizi A. Synthesis and characterization of nanoporous calcium magnesium silicate and assessment of the calcination temperature effect on its drug delivery behavior. J Adv Mater Eng. 1397;37(1):69-82. (In Persian) <https://doi.org/10.29252/jame.37.1.69>
18. Liu XY, Ding CX, Wang, ZY. Apatite formed on the surface of plasma-sprayed coating immersed in simulated body fluid. Biomaterials 2001;22(14):2007-2012.

- [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00386-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00386-0)
19. Walker LS, Marotto VR, Rafiee MA, Koratkar N, Corral EL. Toughening in graphene ceramic composites. *ACS Nano* 2011;5(4):3182–3190. <https://doi.org/10.1021/nn200319d>
 20. Stankovich S, Dikin DA, Dommett GHB, Kohlhaas KM, Zimney EJ, Stach EA. Graphene-based composite materials. *Nature* 2006;442(7100):282–286. <https://doi.org/10.1038/nature04969>
 21. Bódis E, Tapasztó O, Károly Z, Fazekas P, Klébert S, Keszler A, et al. Spark plasma sintering of Si₃N₄/multilayer graphene composites. *Open Chem.* 2015;13:484–489. <https://doi.org/10.1515/chem-2015-0064>
 22. Liu J, Yang Y, Hassinin H, Jumbu N, Deng S, Zuo Q, et al. Graphene-alumina nanocomposites with improved mechanical properties for biomedical applications. *ACS Appl Mater Interfaces* 2015;8(4):2607–2616. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10424>
 23. Nair M, Nancy D, Krishnan AG, Anjusree GS, Vadukumpully S. Graphene oxide nanoflakes incorporated gelatin–hydroxyapatite scaffolds enhance osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells. *Nanotech.* 2015;26:161-171. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/16/161001>
 24. Hedayati F, Jalaly M, Mohammadi S, Mousavi-Khoshdel SM. Synthesis of Co₃O₄/RGO nanocomposite and investigation of its electrochemical properties for supercapacitor applications. *J Adv Mater Eng.* 1402;42(4):45-59. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jame.42.4.1039>
 25. Rouhi N, Hassanpoor S. Synthesis of template free morphology controlled α -MnO₂ nanorod and electrochemical capacitive study of its RGO nanocomposite. *J Adv Mater Eng.* 1402;42(3):31-48. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jame.42.3.1032>
 26. Atashgar K, Masoudi R. Radar evasion control of military structures using graphene oxide coating RGO/NiFe₂O₄ and polynomial profile Monitoring. *J Adv Mater Eng.* 1401;41(4):61-74. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jame.41.4.1009>
 27. Ghobadi N, Hosseini Moradi SA, Amirzade M. Synthesis and structural, magnetic, and electromagnetic characterization of cobalt ferrite/reduced graphene oxide composite. *J Adv Mater Eng.* 1400;40(4):69-83. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jame.40.4.23402>
 28. Aram R, Rasoul R. Changing the wettability of graphene oxide layer using photocatalytic reduction. *Iran J Phys Res.* 2016,16 (1):19-25. (In Persian) <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijpr.16.1.19>