



Original Article

# Comparative Study and use of Fractal Model in Synthesis and Investigation of Properties of Zn-Mg-Cu Nanocomposites

Maryam Gholizadeh Arashti

Department of Physics, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2025-02-10

Revised: 2025-03-07

Accepted: 2025-03-26

**Abstract:** In this work, the Zn-Mg-Cu nanocomposites with different weight percent of Cu were deposited by electrochemical method and their surface and fractal properties were studied. The structural properties of the nanocomposites by X-ray diffraction (XRD) and their morphological properties by atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) were evaluated. Statistical analysis based on 3D AFM images showed that all synthesized samples exhibit fractal properties and that these properties depend on the type and amount of impurity loaded in the matrix. Also, the results show that the grain size decreases with increasing weight percent of Cu doping. The fractal dimension ( $D_f$ ) of the nanocomposites were measured using the box-counting algorithm between 2 and 3, indicating that  $D_f$  is independent of the surface scan size and pixel resolution of the images. The results showed that with increasing copper concentration, the fractal dimension and surface roughness decrease and the surface topography becomes more regular. By obtaining the lacunarity coefficient  $\beta$ , it was found that all the nanocomposites have a high degree of surface texture homogeneity with  $\beta < 0.07$  and that the ZM3C4 and ZM3C2 nanocomposites have the lowest and highest lacunarity coefficients compared to the reference nanocomposite ZM3

**Keywords:** Nanocomposite, Cu concentration, Electrochemical method, Surface morphology, SEM and AFM analyses, Fractal properties

\*Corresponding Author: [m.gholizadeh.ar@gmail.com](mailto:m.gholizadeh.ar@gmail.com)

## How to Cite This Article:

Gholizadeh Arashti, M., Comparative Study and use of Fractal Model in Synthesis and Investigation of Properties of Zn-Mg-Cu Nanocomposites. Nanomeghyas. 2025;12(1): 87-99. DOI: [10.22034/ns.2025.722316](https://doi.org/10.22034/ns.2025.722316)





## بررسی مقایسه ای و بهره گیری از مدل فراکتالی در سنتز و ارزیابی خواص نانو کامپوزیت های Zn-Mg-Cu

مریم قلی زاده آرشتی

گروه فیزیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

**چکیده:** در پژوهش انجام شده، نانو کامپوزیت های Cu-Mg-Zn با درصدهای وزنی مختلف مس با روش الکتروشیمیایی لایه نشانی شدند و خواص سطحی و فراکتالی آنها مورد مطالعه قرار گرفتند. خواص ساختاری نانو کامپوزیت ها با استفاده از پراش اشعه ایکس (X-Ray) و خواص ریخت شناسی آنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) ارزیابی شدند. تجزیه و تحلیل آماری بر اساس تصاویر سه بعدی AFM نشان داد که تمام نمونه های سنتز شده دارای خواص فراکتالی هستند و این خواص به نوع و مقدار ناخالصی بارگذاری شده در ماتریس بستگی دارد. همچنین با توجه به نتایج حاصله، اندازه دانه ها با افزایش درصد وزنی ناخالصی مس کاهش می یابد. بعد فراکتالی نانو کامپوزیت ها با استفاده از روش الگوریتم شمارش جعبه بین ۲ و ۳ اندازه گیری شد و نشان داد که  $D_f$  مستقل از اندازه روبش سطح و وضوح پیکسل تصاویر است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت مس، بعد فراکتالی و زبری سطح کاهش می یابد و مکان نگاری سطح منظم تر می شود. با محاسبه ضریب شکاف  $\beta$ ، مشخص شد که همه ی نانو کامپوزیت ها درجه بالایی از همگنی بافت سطحی با  $\beta < 0.07$  دارند و نانو کامپوزیت های ZM3C4 و ZM3C2 به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب شکاف را در مقایسه با نانو کامپوزیت مرجع ZM3 دارند.

واژگان کلیدی: نانو کامپوزیت، روش الکتروشیمیایی، غلظت مس، ریخت شناسی سطح، تجزیه و تحلیل SEM و AFM، خواص فراکتال.

[m.gholizadeh.ar@gmail.com](mailto:m.gholizadeh.ar@gmail.com)

نحوه استناد به این مقاله:

قلی زاده آرشتی، مریم، بررسی مقایسه ای و بهره گیری از مدل فراکتالی در سنتز و ارزیابی خواص نانو کامپوزیت های Zn-Mg-Cu. *نانو مقیاس*، ۱۲(۱)، ۸۷-۹۹.

DOI: 10.22034/ns.2025.722316



## ۱- مقدمه

حساس نیست. پان و همکاران [۷] نیز گزارش دادند که رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی کامپوزیت Mn-Zn-Mg به طور خطی با یکدیگر متناسب هستند. فیلم‌های فلزی را می‌توان با روش‌های مختلفی مانند لایه‌نشانی فیزیکی بخار (PVD) [۸-۱۱]، سل-ژل [۱۳ و ۱۲]، لایه‌نشانی الکتروشیمیایی [۱۵ و ۱۴] و غیره تهیه کرد. پژوهشگران می‌توانند خواص سطحی کامپوزیت‌های Cu-Mg-Zn را جهت کاربردهای خاص توسط کنترل اندازه ذرات و چگالی ارتفاع دانه‌ها در حین سنتز با استفاده از روش الکتروشیمیایی بهینه کنند. تجزیه و تحلیل تصویر سطحی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) به طور گسترده‌ای برای استخراج داده‌های سطح و جزئیات مکان‌نگاری و ریخت‌شناسی سطح استفاده می‌شود و برای آن به ابزارهای محاسباتی مختلفی مانند تک فراکتال، چندفراکتال و چگالی طیف توان نیاز دارد. این ابزارها پارامترهایی مانند شکاف (lacunarity) فراکتال (معیاری از توزیع فضایی وجود فضاهای خالی در زمینه تصاویر)، بعد فراکتال و آنتروپی سطح را در اختیار محققان قرار می‌دهند که در زمینه‌های مختلف علمی کاربرد دارند [۱۷ و ۱۶]. بعد فراکتال و شکاف توسط الگوریتم‌ها و برنامه‌های مختلفی از قبیل پردازش تصویر [۱۸] محاسبه می‌گردد. الگوریتم شمارش جعبه (algorithm counting-box) روشی است که برای تخمین بعد فراکتالی یک ساختار پیچیده، شکاف فراکتال و سایر داده‌های یک تصویر استفاده می‌شود. تصویر به تعدادی مربعات یا جعبه‌ها تقسیم می‌شود. اندازه جعبه‌ها توسط مقیاس یا وضوح تصویر تعیین می‌شود. اندازه هر شبکه یا تصویر شامل الگوریتم شمارش جعبه‌ها با حداقل یک پیکسل می‌باشد. فرآیند مقیاس‌های چندگانه (اندازه‌های مختلف جعبه) برای به دست آوردن طیف وسیعی از نقاط داده تکرار می‌شود. بعد فرکتال ( $D_f$ ) از رابطه بین تعداد جعبه‌ها (N) و اندازه جعبه (ε) و همچنین شکاف محاسبه می‌شود که معیاری از محاسبه شکاف‌های ساختار توسط این الگوریتم است. الگوریتم شمارش جعبه توسط نرم

کامپوزیت‌های مبتنی بر روی-مس-منیزیم (Cu-Mg-Zn) به دلیل زیست سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و قابلیت ذخیره داده‌ها توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است [۱]. تهیه کامپوزیت سه‌تایی Cu-Mg-Zn و مطالعه خواص فراکتالی سطح آن، نتایج بسیار خوبی برای ارزیابی استحکام سطح کامپوزیت را ارائه می‌دهد. وجود ویژگی‌های فراکتال می‌تواند بر نحوه توزیع تنش در ماده تأثیر بگذارد و به طور بالقوه منجر به افزایش یا کاهش سختی شود. در واقع، خواص فراکتال می‌تواند در مورد رفتار مکانیکی مواد از جمله استحکام، چقرمگی و سختی آنها دید مناسبی فراهم کند و همچنین بر سایر خواص نیز تأثیر بگذارد. ماهیت فراکتالی مسیرهای رسانای پرپیچ و خم در یک کامپوزیت می‌تواند منجر به افزایش رسانایی الکتریکی و هدایت حرارتی در کامپوزیت شود. به علاوه با تجزیه و تحلیل ابعاد فراکتالی سطح، می‌توان توزیع مراکز فعال نوری، طیف‌های جذب و پراکندگی یک کامپوزیت را که برای نورتابناکی، نمایشگرهای نوری و قطعات نیم رسانایی که قابلیت تبدیل انرژی نورانی خورشید به انرژی الکتریسیته را دارند، استفاده می‌شود، بررسی کرد. ابعاد فرکتالی بالا، می‌تواند منجر به افزایش سطح و واکنش‌پذیری و در نتیجه افزایش فعالیت کاتالیزوری سطح گردد [۲-۴]. کامپوزیت‌های منیزیم به دلیل ساختار فلزی سبک، استحکام ویژه بالا و اتلاف حرارت، کاربردهای مهندسی گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند هوافضا، الکترونیک و حمل و نقل دارند [۵]. از آنجا که منیزیم و مس می‌توانند به ترتیب رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی کامپوزیت را افزایش دهند، تحقیقات قبلی بر روی خواص رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی کامپوزیت Zn-Cu-Mg متمرکز شده است. چن و همکاران [۵] گزارش دادند که رسانایی گرمایی کامپوزیت سه تایی Cu-Mg-Zn نسبت به تغییرات در ترکیب آلیاژ

حجم محلول با آب مقطر به ۱۰۰۰ میلی لیتر افزایش یافت. قبل از لایه نشانی، زیرلایه‌های شیشه‌ای با ابعاد (۲ cm × ۲ cm) پوشش داده شده با ( $\Omega < 7$ ) FTO چندین بار با آب یون زدوده، استون و اتانول در حمام فراصوت شستشو شدند. در سنتز الکتروشیمیایی، از دو الکتروگرافیتی برای لایه نشانی کامپوزیت‌های Mg-Zn و Cu-Mg-Zn بر روی زیرلایه شیشه‌ای FTO استفاده شدند. در این روش الکتروگرافیت به عنوان آند، شیشه FTO به عنوان کاتد و محلول به عنوان الکترولیت یونی عمل می‌کنند. الکترودها به مدت ۲۰ دقیقه به یک منبع تغذیه با چگالی جریان ثابت  $2/5 \text{ mA/cm}^2$  متصل شدند. اندازه دانه‌ها و ضخامت فیلم لایه نشانی شده روی شیشه FTO به مدت زمان سنتز و چگالی جریان بستگی دارد. پس از لایه نشانی و تهیه فیلم‌های کامپوزیتی Zn-Mg و Cu-Mg-Zn با نسبت وزنی ۲٪، ۳٪، و ۴٪، که بصورت ZM3C4، ZM3C3، ZM3C2، ZM3 نامگذاری شدند، تجزیه و تحلیل ساختاری و ریخت شناسی نمونه‌ها برای ارزیابی بیشتر ارائه شد. شایان ذکر است در این مطالعه فرضیاتی بشرح ذیل در نظر گرفته شده است:

فرض می‌شود با افزودن ناخالصی مس به کامپوزیت، ریخت شناسی دانه‌ها و رشد تکاملی کامپوزیت تحت تاثیر قرار می‌گیرد و همچنین افزودن ناخالصی مس می‌تواند خواص سطحی فیلم نازک را تغییر دهد. به علاوه، فرض می‌شود شرایط لایه نشانی شامل دمای محیط، مدت زمان بهم زدن محلول و دمای محلول و چگالی جریان در تمام نمونه‌های سنتز شده یکسان باشد. در ادامه فرض می‌شود به غیر از مواد افزودنی مجاز برای این تحقیق، ناخالصی دیگری اضافه نشود.

## ۲-۲- روش‌های تجزیه و تحلیل

برای ارزیابی خواص ساختاری کامپوزیت‌های تهیه شده از پراش اشعه ایکس (Philips، مدل PW1730) با تابش Cu-Ka در طول موج  $\lambda = 1.5406$  استفاده شد. ریخت شناسی کامپوزیت‌ها توسط میکروسکوپ

افزار ImageJ و ابزار Fraclac روش مناسبی است که امروزه برای تعیین شکاف و شناسایی الگوهای سطحی تصاویر ۸ بیتی استفاده می‌شود [۱۹-۲۱]. در این پژوهش، ابتدا جهت تهیه فیلم‌های کامپوزیت Cu-Mg-Zn، مس به عنوان آلاینده دوم با درصدهای وزنی مختلف به کامپوزیت روی-منیزیم اضافه شده و سپس خواص فراکتالی و ریزساختاری کامپوزیت سه تایی Cu-Mg-Zn با جزئیات مورد بررسی قرار گرفتند. از تصاویر SEM و AFM برای ارزیابی سطح و تحلیل کمی و کیفی بر اساس رفتار فراکتالی سطح کامپوزیت استفاده گردید. تجزیه و تحلیل تک فراکتال نیز برای بررسی سطح در یک بعد فراکتالی استفاده گردید [۲۲]. برای اندازه‌گیری ناهمگونی سطح وابسته به مقیاس، از پارامتر شکاف استفاده شد که بر اساس توزیع جرم ذرات سطحی در یک مجموعه معین توسط الگوریتم شمارش جعبه [۲۳] تحلیل می‌شود.

## ۲- فرآیندهای آزمایشگاهی

### ۲-۱- آماده سازی نمونه

برای تهیه فیلم‌های کامپوزیت Mg-Zn و Zn-Cu-Mg، ابتدا ۲ گرم استات روی  $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$  (Merck-۹۸) (به عنوان ماده پیش‌ساز روی و ۶۰ میلی گرم تترا هیدرات استات منیزیم  $(\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$  (Merck-۹۸) (به عنوان اولین ناخالصی استفاده شد. روی و منیزیم در ۱۰۰ میلی لیتر اتانول (98%-Merc) به عنوان حلال حل شدند. دومین ناخالصی، نیترات مس تری هیدرات  $(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$  (Merck-۹۸) با مقادیر مختلف ۲٪، ۳٪ و ۴٪ وزنی مس، به این محلول اضافه شدند. سپس محلول به مدت ۲۰ دقیقه در حمام فراصوت قرار گرفت. برای به دست آوردن محلولی همگن و شفاف، محلول تهیه شده روی همزن مغناطیسی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت هم زده شد. سپس جهت لایه نشانی،

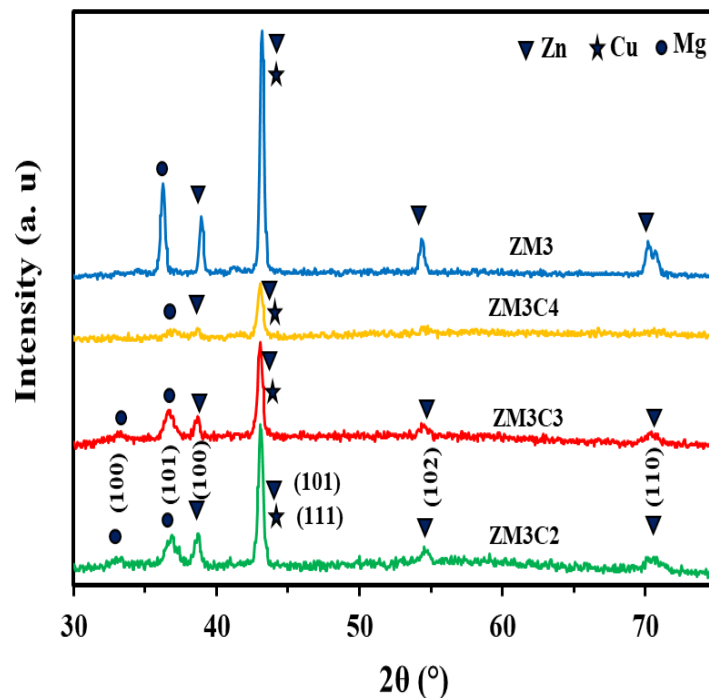
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تحلیل ساختاری

در شکل ۱، الگوهای پراش اشعه ایکس XRD بر روی کامپوزیت‌های Mg-Zn و Cu-Mg-Zn تهیه شده با درصدهای وزنی مختلف ناخالصی مس نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نانو کامپوزیت‌های تهیه شده دارای فاز کریستالی هستند و هیچ قله ناشناخته اضافی در طیف مشاهده نشده است که نشان دهنده این است که نانو کامپوزیت‌های تهیه شده به خوبی سنتز شده‌اند. قله‌های پهن مشاهده شده در تصاویر XRD نشان دهنده اندازه ذرات کوچک است. متوسط اندازه کریستالیت با استفاده

الکترونی روبشی (SEM) (Philips، مدل XL30) انجام شد. تصاویر مکان نگاری سطحی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه AFM، Core Nanosurf با نوک سیلیکونی در حالت غیرتماسی با ثابت الاستیک  $0.2 \times 10^{-2}$  N/m و نیروی تماس  $20 \text{ nN}$  به دست آمد. سطح نمونه‌ها با سرعت  $50 \mu\text{m/s}$  رویش شد و نقشه‌های مکان نگاری با مساحت  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  و وضوح  $256 \times 256$  پیکسل، تولید شدند.

تصاویر و داده‌های میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای تجزیه و تحلیل ارتفاع دانه‌ها و زبری سطح با استفاده از نرم افزار ImageJ [۲۴]  $1/53e$  مورد بررسی قرار گرفتند، در حالی که بعد فراکتالی  $D_f$  و تجزیه و تحلیل فراکتالی با استفاده از نرم افزار Gwyddion [۲۵]  $2/56$  به دست آمد.



شکل ۱: الگوی پراش اشعه ایکس برای نانو کامپوزیت‌های ZM3، ZM3C2، ZM3C3 و ZM3C4

جدول ۱: اندازه دانه نانو کامپوزیت‌ها برای غلظت‌های مختلف مس

Samples	$2\theta$ (°)	$\beta$ (°)	D (nm)
ZM3	43.04	0.34	28.42
ZM3C2	43.05	0.37	22.55
ZM3C3	43.10	0.38	22.19
ZM3C4	43.24	0.44	19.20

متوسط کریستالیت (D) برای کامپوزیت‌های Zn-Cu-Mg با استفاده از معادله دبی-شرر Debye-Scherrer [۲۶] در محدوده ۹/۲۰ nm تا ۲۸/۴۲ nm به دست آمده است که در جدول ۱ نیز آورده شده است. مطابق نتایج حاصل شده، اندازه کریستالیت با افزایش درصد وزنی ناخالصی مس کاهش می‌یابد.

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos \theta \quad (1)$$

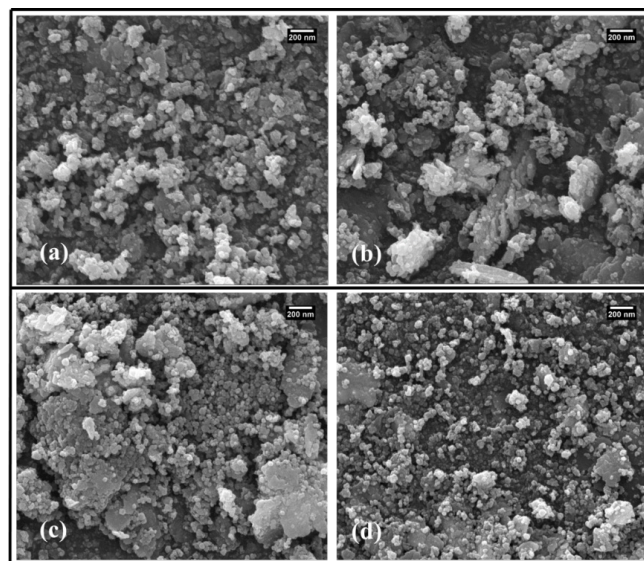
که در آن  $\theta$  زاویه براگ و  $\beta$  پهنای کل در نصف ماکزیمم قله است.

قله تشکیل شده در  $43^\circ$  به هر دو فاز مس و روی نسبت داده می‌شود، زیرا شعاع یونی ( $0.72 \text{ \AA}$ )  $\text{Cu}^{2+}$  و ( $0.74 \text{ \AA}$ )  $\text{Zn}^{2+}$  تفاوت جزئی با هم دارند [۲۷]، بنابراین اتم‌های مس را می‌توان درون اتم‌های روی گنجانده. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی مس، بزرگترین قله در  $43^\circ$  به آرامی به زوایای بالاتر جابه‌جا شده است.

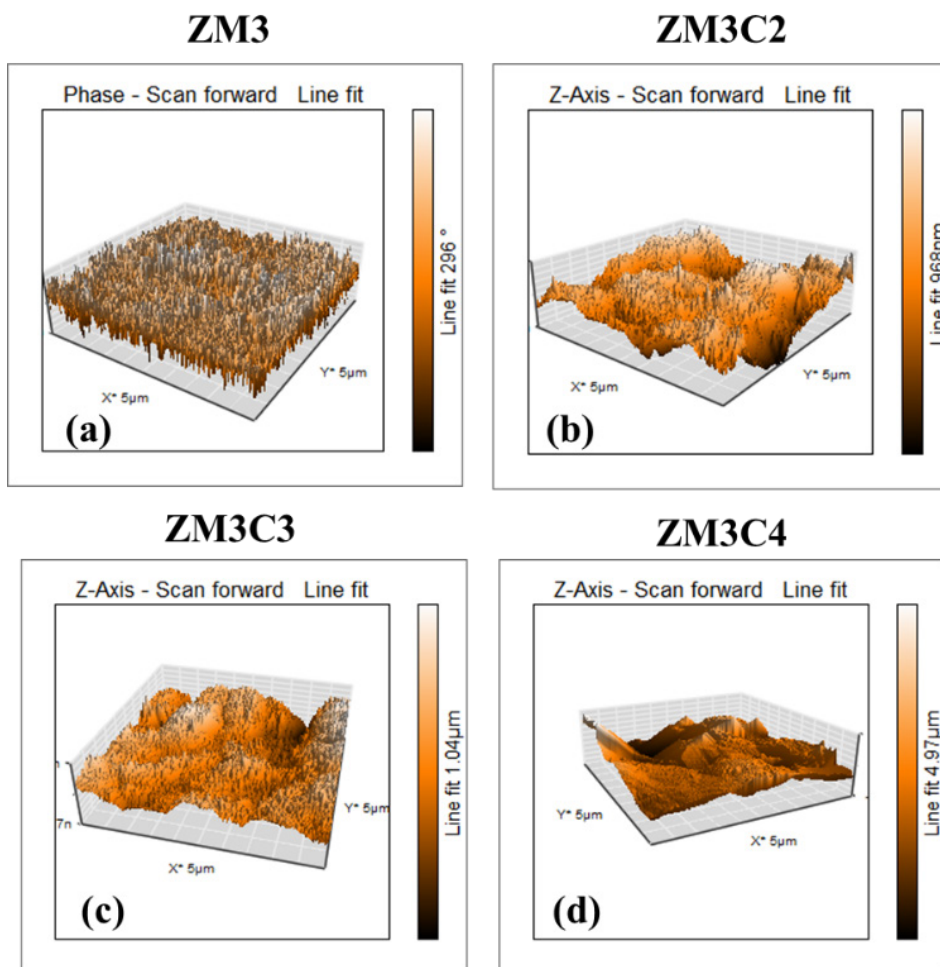
### ۳-۲- تحلیل ریخت شناسی

شکل (۲a-۲d) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانوکامپوزیت‌های Cu-Mg-Zn با درصدهای وزنی مختلف مس را نشان می‌دهد.

از معادله شرر در بزرگترین قله (101) محاسبه شد که برای نمونه‌های  $\text{ZM}^3\text{C}^3$ ،  $\text{ZM}^3\text{C}^2$ ،  $\text{ZM}^3$  و  $\text{ZM}^3\text{C}^4$  به ترتیب  $43/0.4^\circ$ ،  $43/0.5^\circ$ ،  $43/1.0^\circ$  و  $43/2.4^\circ$  است. در واقع افزایش مقدار مس تأثیری بر خواص کریستالی آنها نداشت. با مقایسه الگوهای XRD نانوکامپوزیت‌های سنتز شده، می‌توان نتیجه گرفت که شدت بزرگترین قله در حدود  $2\theta = 43^\circ$  با افزایش مقدار مس کاهش یافته و تفاوت معنی داری در ساختار بلوری وجود ندارد. طیف قله‌های پراش در  $2\theta = 38/99^\circ$ ،  $43/22^\circ$ ،  $54/32^\circ$ ،  $70/63^\circ$ ، صفحات پراش  $(100)$ ،  $(101)$ ،  $(102)$ ،  $(101)$ ،  $(101)$  را برای عنصر روی با کد مرجع ۰۱-(JCPDS: ۰۸۷-۰۷۱۳) نشان می‌دهد. زوایای پراش  $2\theta = 32/20^\circ$  و  $36/62^\circ$  صفحات پراش  $(100)$  و  $(101)$  را برای ناخالصی منیزیم با کد مرجع ۰۰-(JCPDS: ۰۸۲۱-۰۳۵) و زاویه پراش  $2\theta = 43/29^\circ$  صفحه پراش  $(111)$  را برای ناخالصی مس با کد مرجع ۰۰-(JCPDS: ۰۰۴-۰۸۳۶) نشان می‌دهد. علاوه بر این، فازهای روی و منیزیم در نانوکامپوزیت‌ها غالب هستند و با افزایش درصد وزنی مس، شدت قله  $43^\circ$  کاهش می‌یابد. قله‌های پراش به دست آمده در این پژوهش با نتایج تحقیقات قبلی روی کامپوزیت Cu-Mg-Zn مطابقت دارد [۵۷]. اندازه



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانوکامپوزیت‌های  $\text{ZM}^3$ ،  $\text{ZM}^3\text{C}^2$ ،  $\text{ZM}^3\text{C}^3$  و  $\text{ZM}^3\text{C}^4$

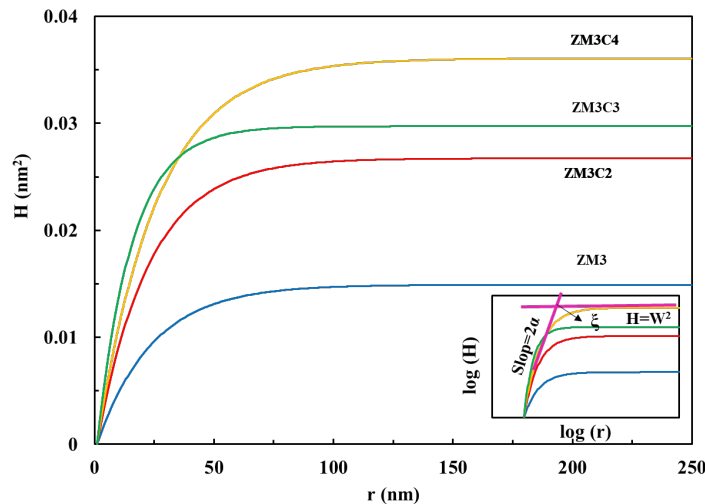


شکل ۳: تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از نانوکامپوزیت های ZM3 ، ZM3C2 ، ZM3C3 و ZM3C4

ZM3C3 در مقایسه با ZM3 و ZM3C4 بیشتر است. بخش قابل توجهی از نانوذرات در تمام تصاویر کروی هستند. بنابراین، اندازه دانه نانوکامپوزیت ها با افزایش غلظت ناخالصی مس کاهش می یابد. اندازه دانه ها در تصاویر SEM مشابه اندازه بلورها در الگوی XRD است و با افزایش درصد وزنی ناخالصی مس، کاهش می یابد.

شکل ۳ ، تصاویر AFM سه بعدی سطح نانوکامپوزیت Cu-Mg-Zn دوپ شده با درصدهای وزنی مختلف مس را در نوارهای رنگی برای سطوح  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  با وضوح  $256 \times 256$  پیکسل نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، بافت سطح نمونه مرجع ZM3 ساختاری سوزنی شکل دارد، در حالی که این ساختارهای سوزنی مانند بر روی یک ساختار

تصاویر SEM تأیید می کنند که ریخت شناسی و اندازه نانوذرات عمدتاً به مقدار ناخالصی مس بستگی دارد. اندازه متوسط دانه های تمام نانوکامپوزیت ها کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که تأیید کننده این است که نانوکامپوزیت های تهیه شده دارای دانه های غیر یکنواخت هستند. این ویژگی برای بررسی خواص فراکتالی سطح مفید است. شکل ۲a نانوکامپوزیت های ZM3 را بدون ناخالصی مس با اندازه دانه حدود  $50,20 \text{ nm}$  همراه با دانه های آگلومره نشان می دهد. در شکل (۲b-۲d) ، تصاویر SEM نانوکامپوزیت های ZM3C2 ، ZM3C3 و ZM3C4 را به ترتیب با اندازه دانه در حدود  $36/43$  ،  $32/64$  و  $32/57$  نانومتر نشان می دهند. اما پدیده آگلومره شدن در نانوکامپوزیت های ZM3C2 و



شکل ۴: تابع همبستگی  $H(r)$  برای نانوکامپوزیت های  $ZM^3$ ،  $ZM^3C^2$ ،  $ZM^3C^3$ ،  $ZM^3C^4$

جدول ۳: داده های به دست آمده از تابع  $H(r)$  برای نانوکامپوزیت های  $ZM^3$ ،  $ZM^3C^2$ ،  $ZM^3C^3$  و  $ZM^3C^4$

Sample	$\beta$	$H(r)$			
		w [nm]	$\xi$ [nm]	$\alpha$	$D_f=3-\alpha$
ZM3	0.070	218.90	0.59	0.52	2.48
ZM3C2	0.063	168.49	0.48	0.56	2.44
ZM3C3	0.057	162.02	0.48	0.64	2.36
ZM3C4	0.050	158.32	0.29	0.7	2.30

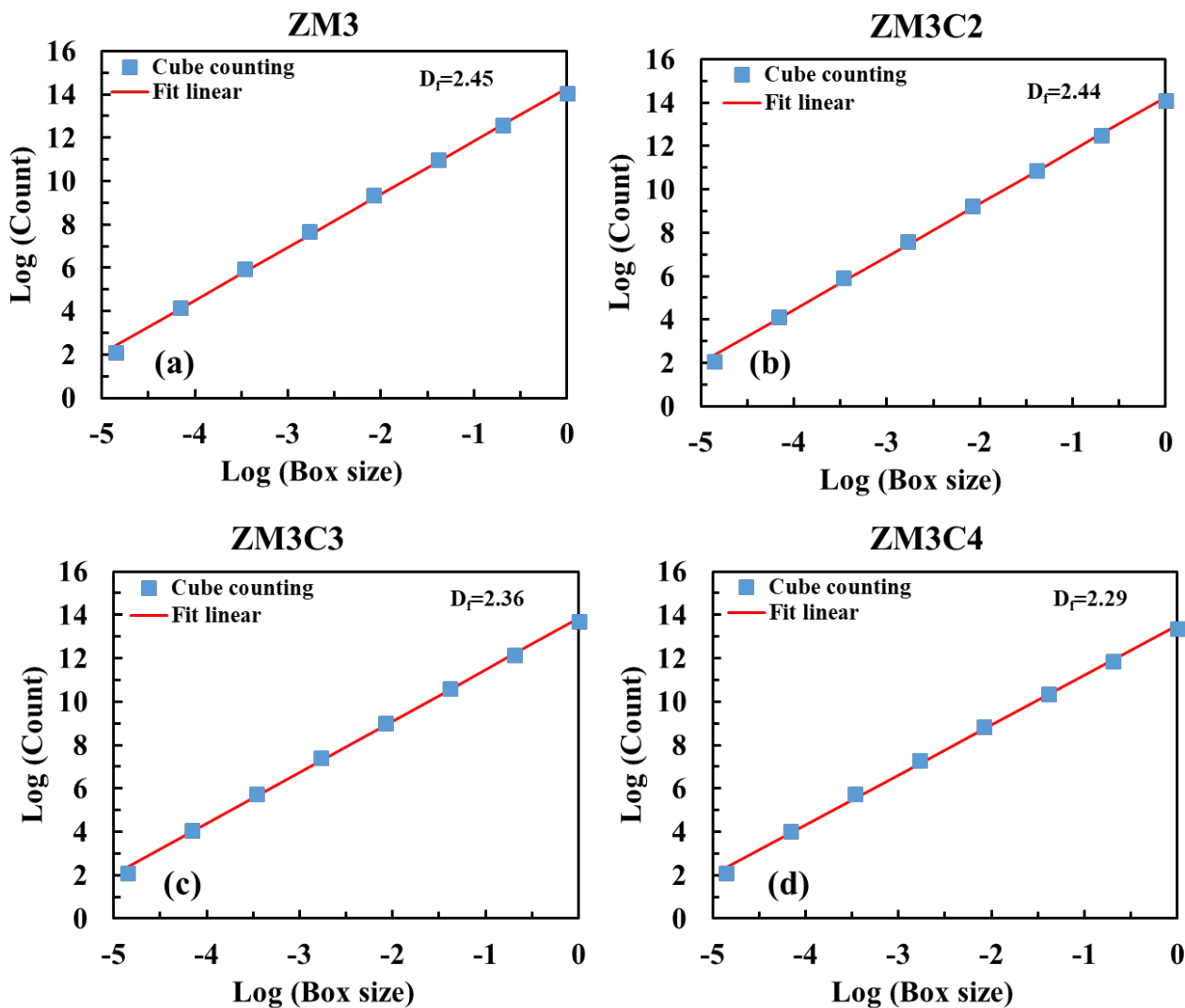
function  $H(r)$  را به صورت تابعی از مکان برای نانوکامپوزیت های  $ZM^3$ ،  $ZM^3C^2$ ،  $ZM^3C^3$  و  $ZM^3C^4$  نشان میدهد. پارامترهایی مانند زبری تعمیم یافته  $\alpha$  (roughness exponent)، پهنای بین لایه  $w$  و طول همبستگی عرضی (lateral correlation length)  $\xi$  را می توان از نمودار  $H(r)$  اندازه گیری کرد. زبری تعمیم یافته معیاری از رابطه بین زبری و مقیاس طول است. با تعیین زبری تعمیم یافته، بعد فراکتالی  $D_f$  به صورت  $D_f = 3 - \alpha$  محاسبه می شود.  $D_f$  نانوکامپوزیت های  $ZM^3$ ،  $ZM^3C^2$ ،  $ZM^3C^3$  و  $ZM^3C^4$  به ترتیب ۲/۴۸، ۲/۴۴، ۲/۳۶ و ۲/۳۰ به دست آمدند. پهنای بین لایه ها یا جذر میانگین زبری مربع (Sq) به دست آمده توسط تابع  $H(r)$  با موارد گزارش شده توسط روش آماری در جدول ۲ مطابقت دارد. از این نتایج می توان نتیجه گرفت که رفتار فراکتالی سطح به نوع و مقدار ناخالصی

تپه مانند پیوسته از سطح نمونه ها با غلظت های مختلف مس ( $ZM^3C^2$ ،  $ZM^3C^3$ ،  $ZM^3C^4$ ) تشکیل شده اند. این ویژگی برای نمونه های  $ZM^3C^2$  و  $ZM^3C^3$  بیشتر مشهود است. در واقع دارای ناخالصی کردن کامپوزیت توسط غلظت های مختلف مس بر بافت سطح اثر می گذارد و این تغییرات با استفاده از پارامترهای آماری به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه گیری می شود.

### ۳-۳- تحلیل فراکتال

رهیافت فراکتال برای مطالعه پیچیدگی و بی نظمی های سطحی نانوکامپوزیت های سنتز شده Zn-Mg-Cu استفاده شد. برای محاسبه بعد فراکتال نمونه ها، از روابط ارائه شده در مرجع [۲۸ و ۲۹] استفاده شده است.

شکل ۴ نمودار تابع همبستگی (correlation



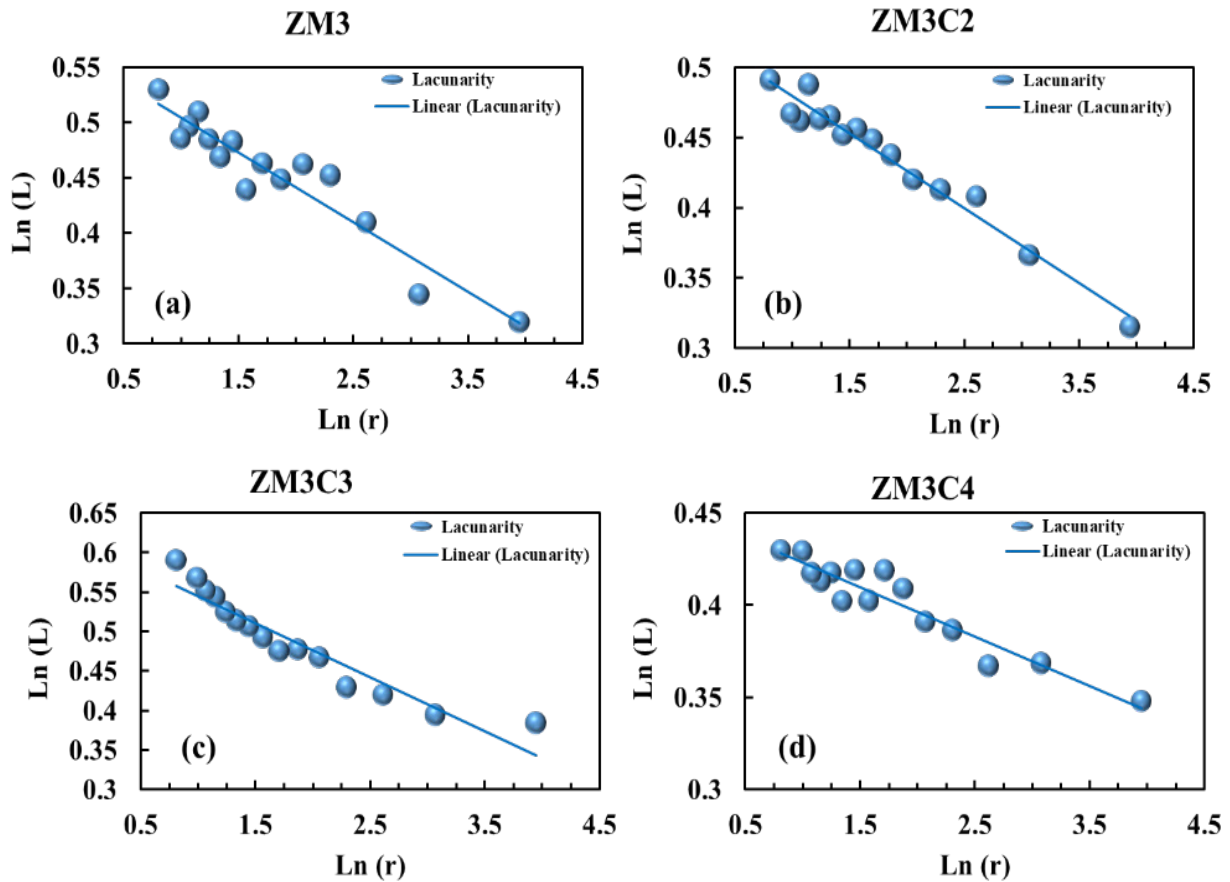
شکل ۵: محاسبه  $D_f$  با استفاده از روش الگوریتم شمارش جعبه برای نانوکامپوزیت های ZM3 ، ZM3C2 ، ZM3C3 و ZM3C4

در شکل ۵ نشان داده شده است، به دست می آید. به علاوه، این نمودار نشان می دهد که  $D_f$  مستقل از اندازه تصویر و وضوح پیکسل است که اطلاعاتی در مورد ریخت شناسی سطح ارائه می دهد.  $D_f$  بدست آمده با نتایج جدول ۳ مطابقت دارد.

منحنی های شکاف همه نمونه ها برحسب تابعی از اندازه جعبه در شکل ۶ نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که نانوکامپوزیت ZM3 در مقیاس های ۲ کوچک دارای شکاف بیشتری است. به عبارت دیگر، فضاهای خالی روی سطح نانوکامپوزیت ZM3 آرایش فضایی ناهمگون تری نسبت به سایر نانوکامپوزیت ها دارند. به طور مشابه، ZM3C4 در مقایسه با سایر

بارگذاری شده در ماتریس بستگی دارد. شایان ذکر است که مقدار  $D_f$  بین ۲ و ۳ است؛  $D_f = ۲$  و  $D_f = ۳$  به ترتیب سطوح هموار و زبر را نشان می دهند. طبق نتایج بدست آمده، تمام نمونه های سنتز شده در این کار خواص فراکتالی را نشان می دهند و زبری و بعد فراکتالی با افزایش مقدار ناخالصی مس به دلیل تشکیل جزیره ها و تپه ها در سطح کاهش می یابد [۲۹].

مقدار  $D_f$  با استفاده از روش الگوریتم شمارش جعبه با نرم افزار Gwyddion به دست آورده شد. مقدار  $D_f$  با ترسیم  $\text{Log}(\text{count})$  بر حسب  $\text{Log}(\text{box size})$  و اندازه گیری شیب خط تطبیق یافته، همانطور که



شکل ۶: منحنی‌های شکاف برحسب تابعی از اندازه جعبه نانوکامپوزیت های  $ZM^3$  ،  $ZM^{3C2}$  ،  $ZM^{3C3}$  و  $ZM^{3C4}$

با نانوکامپوزیت  $ZM^3$  دارند. این نشان می‌دهد که  $ZM^{3C4}$  توزیع یکنواخت کمتر و  $ZM^{3C2}$  توزیع یکنواخت بیشتری از پیکسل‌های خالی در تصویر دارند. با توجه به شکل ۶، نمونه  $ZM^3$  بزرگترین اندازه حفره‌ها و فضای خالی را نشان می‌دهد که به این دلیل است که مکان‌نگاری سطح برای مقادیر بزرگتر  $L(r)$  حفره‌ای‌تر می‌شود [۳۱]. تحقیقات قبلی نیز نتایجی منطبق بر نتایج مطالعه حاضر دارند. پاندار و همکاران [۳۲] تحلیل فراکتالی از ریخت‌شناسی نانولوله کربنی انجام دادند که در آن بعد فراکتال و شکاف توسط روش الگوریتم شمارش جعبه محاسبه شد. نتیجه نشان داد که پارامترهای رشد و افزودن ناخالصی و دما می‌تواند روی بعد فراکتالی و توزیع یکنواخت فضاهای خالی و شکاف‌ها تأثیر بگذارد. همچنین کاهش بعد فراکتالی موجب افزایش فضاهای خالی و شکاف‌ها می‌شود که با نتایج

نانوکامپوزیت‌ها دارای شکاف و ناهمگونی کمتری است. اگرچه نانوکامپوزیت‌های  $ZM^3$  دارای بالاترین زبری سطحی هستند، اما میکروبافت سطحی همه نانوکامپوزیت‌ها مشابه است. در واقع، نتایج شکاف تأیید می‌کند که افزایش غلظت مس تأثیری بر همگنی میکروبافت‌ها ندارد. ضریب شکاف  $\beta$  معیاری برای ارزیابی همگنی توزیع شکاف‌ها و صفحات فرورفته روی سطح است که از شیب منحنی  $\ln-\ln$  از شکاف  $(L)$  برحسب اندازه جعبه  $(r)$  به دست می‌آید [۳۰].

ضریب شکاف  $\beta$  به دست آمده در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همه نانوکامپوزیت‌ها دارای درجه بالایی از همگنی بافت سطحی با  $\beta < 0.07$  هستند. نانوکامپوزیت‌های  $ZM^{3C2}$  و  $ZM^{3C4}$  کمترین و بیشترین ضریب لکوناریتی را به ترتیب  $0.050$  و  $0.063$  در مقایسه

یکنواختی سطح می تواند عملکرد قابل توجهی را تحت تأثیر قرار دهد بسیار مهم است. توانایی ایجاد تغییرات در ابعاد فرکتال از طریق تغییر غلظت مس، روشی را برای تنظیم خواص نانو ساختار در کاربردهای خاص فراهم می کند. کنترل ابعاد فرکتال می تواند در زمینه هایی مانند کاتالیست ها، که در آن مساحت سطح و واکنش پذیری اهمیت دارند، بسیار مهم باشد. رابطه بین غلظت مس و بعد فرکتال می تواند رهیافتی در مورد سازوکارهای رشد نانو ساختارها ارائه دهد. علاوه بر این، زبری سطح با افزایش غلظت مس کاهش می یابد. در ادامه مقدار  $D_f$  با استفاده از روش الگوریتم شمارش جعبه با نرم افزار Gwyddion به دست آورده شد و نتایج نشان داد که بعد فرکتال مستقل از اندازه تصویر و وضوح پیکسل است که اطلاعاتی در مورد ریخت شناسی سطح ارائه می دهد. با به دست آوردن ضریب شکاف  $\beta$  مشاهده شد که همه نانو کامپوزیت ها دارای درجه بالایی از همگنی بافت سطحی با  $\beta < 0.07$  هستند و همچنین نانو کامپوزیت های  $ZM3C2$  و  $ZM3C4$  کمترین و بالاترین ضریب شکاف را در مقایسه با نانو کامپوزیت ZM3 دارند.

## تعارض منافع

نویسنده اعلام می دارد که هیچگونه تعارض منافی مرتبط با تحقیق حاضر ندارد.

## مراجع

- [1] J. Huang, Y. Lai, H. Jin, H. Guo, F. Ai, Q. Xing, D. J. Ross, "Preparation and properties of Zn-Cu alloy for potential stent material", *Materials Engineering and Performance*, 29, 6484-6493, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05167-0>
- [2] Q. Duan, J. An, H. Mao, D. Liang, H. Li, S. Wang, C. Huang, "Review about the application of fractal theory in the research of packaging materials", *Materials*, 14, 860, 2021.
- [3] C. Ding, T. Xu, Q. Chen, C. Su, P. Zhao, "Study on the relationship between fractal characteristics and mechanical properties of tensile fracture of

این کار مطابقت دارد. به علاوه، داس و همکاران [۳۳] اثر افزودن آلومینیوم به لایه نازک نیتريد تیتانیوم روی خواص سطحی آن را گزارش کردند و نتایج نشان داد، مقادیر بالای آلومینیوم موجب می شود تا زبری سطح و شکاف ها کاهش یابد که می تواند ناشی از اصلاح شبکه با صفحات ناهمگن مختلف باشد و این موضوع با نتایج کار تحقیق حاضر مطابقت دارد.

## ۴- نتیجه گیری

نانو کامپوزیت ها با روش الکتروشیمیایی تحت چگالی جریان ثابت بر روی زیر لایه های شیشه ای FTO تهیه شدند. داده های ساختاری به دست آمده توسط تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس نشان داد که نانو کامپوزیت های Zn-Mg-Cu و Zn-Mg بخوبی سنتز شده اند و در حالت کریستالی اند. همچنین اندازه متوسط کریستالیت نانو کامپوزیت ها با افزایش درصد وزنی ناخالصی مس کاهش می یابد. تصاویر SEM بدست آمده، نشان داد که ریخت شناسی و اندازه نانوذرات عمدتاً به مقدار ناخالصی مس بستگی دارد. به علاوه نانو کامپوزیت های تهیه شده دارای دانه های غیر یکنواخت هستند که این ویژگی برای بررسی خواص فراکتالی سطح مفید است. مشخصات میکرو بافت سطح نانو کامپوزیت Zn-Mg به عنوان نمونه مرجع و نانو کامپوزیت های Zn-Mg-Cu حاوی ناخالصی مس به میزان ۲٪، ۳٪ و ۴٪ درصد وزنی با تصاویر سه بعدی AFM مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت مس در نانو کامپوزیت، بعد فرکتال  $D_f$  کاهش می یابد و مکان نگاری سطح منظم تر می شود. این نشان می دهد که با افزایش غلظت مس، الگوهای رشد نانو ساختارها یکنواخت تر می شوند که می تواند خواص مکانیکی و فیزیکی مواد را بهبود بخشد. مکان نگاری سطح منظم می تواند منجر به بهبود خواص مانند چسبندگی بهتر، افزایش رسانایی الکتریکی و بهبود خواص نوری شود که به ویژه در کاربردهایی مانند مهندسی الکترونیک و مهندسی نورشناسی که

- photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanotubes decorated with Ag nanoparticles by simultaneous electrochemical deposition and reduction processes", *Applied Surface Science*, 615, 156332, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156332>
- [15] M. L. Personick, A.A. Jallow, G. C. Halford, L. A. Baker, "Nanomaterials Synthesis Discovery via Parallel Electrochemical Deposition", *Chemistry of Materials*, 36, 3034 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c00318>
- [16] W. Sapota, P. Szczepanik, S. Stach, Z. Wróbel, "Fractal and Multifractal Analyses of the Porosity Degree of Ceramics Used in Biomedicine", *Adv. Sci. Eng. Med*, 12, 450-456, 2020. <https://doi.org/10.1166/ase.2020.2546>
- [17] R. Shakoury, A. Grayeli Korpi, K. Ghosh, Ş. Tãlu, S. Rezaee, F. Mwema, M. Mardani, A. Arman, "Stereometric and scaling law analysis of surface morphology of stainless steel type AISI 304 coated with Mn: a conventional and fractal evaluation", *Mater. Res. Express*, 6, 116436, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4aa6>
- [18] Ş. Tãlu, S. Abdolghaderi, E. P. Pinto, R. S. Matos, M. Salerno, "Advanced fractal analysis of nanoscale topography of Ag/DLC composite synthesized by RF-PECVD", *Surface Engineering*, 36, 713-719, 2020. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1710937>
- [19] M. R. B. Dias, D. Dornelas, W. F. Balthazar, J. A. O. Huguenin, L. da Silva, "Lacunarity study of speckle patterns produced by rough surfaces", *Phys. A*, 486, 328-336, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.05.022>
- [20] D. Risović, H. Gebavi, M. Ivanda, "Influence of fractal and lacunar characteristic of a nanostructured substrate on SERS enhancement", *Appl. Surf. Sci.*, 537, 147915, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147915>
- [21] A. Pander, T. Onishi, A. Hatta, H. Furuta, "Study of self-organized structure in carbon nanotube forest by fractal dimension and lacunarity analysis", *Mater. Charact.*, 160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110086>
- [22] G. Q. Ramos, R. S. Matos, A. Das, S. T. Kumar, S. Tãlu, H. D. da Fonseca Filho, "Correlating morphology and multifractal spatial patterns of the leaf surface architecture of *Anacardium occidentale* L", *Fractal Fract.* 6, 320, 2022. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6060320>
- [23] C. Allain, M. Cloitre, "Characterizing the lacunarity of random and determined fractal set", *Physics Review A*, 44, 3552-3558, 1991. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.3552>
- [24] ImageJ | World Library - eBooks | Read eBooks reinforced concrete structures", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26, 2225-2233, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0196-0>
- [4] M. Fakharpour, M. Gholizadeh Arashti, M. T. Musazade Meybodi, "Electrical characterization of zig-zag Aluminum thin films using experimental and theoretical methods", *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, 6, 25-42, 2021.
- [5] L. Chen, S. Lü, W. Guo, J. Li. Wu, "High thermal conductivity of highly alloyed Mg-Zn-Cu alloy and its mechanism", *Journal of Alloys and Compounds*, 918, 165614, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165614>
- [6] H. Pan, Y. Ren, H. Fu, H. Zhao, L. Wang, X. Meng, G. Qin, "Recent developments in rare-earth free wrought magnesium alloys having high strength: A review", *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 321-331, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.057>
- [7] H. Pan, F. Pan, X. Wang, J. Peng, J. She, C. Zhao, Z. Gao, "High conductivity and high strength Mg-Zn-Cu alloy", *Materials Science and Technology*, 30, 759-764, 2014. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000400>
- [8] M. Fakharpour, G. Taheri, "Fabrication of Al zigzag thin films and evaluation of mechanical and hydrophobic properties", *Applied Physics A*, 126, 631, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03773-2>
- [9] M. Fakharpour, F. Babaei, H. Savaloni, "Engineering Mn as tetragonal-like helical sculptured thin film for broadband absorption", *Plasmonics*, 11, 1579-1587, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11468-016-0213-6>
- [10] M. Fakharpour, M. Gholizadeh Arashti, S. Hesami Tackallou, B. Zamani, "Surface characterization of Al thin film dependent on the substrate using fractal geometry", *Progress in Physics of Applied Materials*, 3, 177-183, 2023.
- [11] M. H. Karimi Tafti, M. Fakharpour, "Optical Properties of NiO Columnar Nanostructure Prepared by OAD Technique", *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, 8, 51-67, 2023
- [12] M. Ben Arbia, H. Helal, E. Comini, "Recent Advances in Low-Dimensional Metal Oxides via Sol-Gel Method for Gas Detection", *Nanomaterials*. 14, 359, 2024. <https://doi.org/10.3390/nano14040359>
- [13] V Golshan, F Mirjalili and M Fakharpour, "Self-cleaning surfaces with superhydrophobicity of Ag-TiO<sub>2</sub> nanofilms on the floor ceramic tiles", *Glass Physics and Chemistry*, 48, 35-42, 2022. <https://doi.org/10.1134/S1087659622010059>
- [14] E. Montakhab, F. Rashchi, S. Sheibani, "Enhanced

- Physics Letters A, 487, 129136 ,2023. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2023.129136>
- [30] B. B. Mandelbrot, "A fractal's Lacunarity, and how it can be tuned and measured. In Fractals in Biology and Medicine", edited by T. Nonnenmacher, G. Losa, and E. Weibel (Basel: Birkhauser, 1993), pp. 8-21. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8501-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8501-0_2)
- [31] E. P. Pinto, M. A. Pires, R. S. Matos, R. R. M. Zamora, R. P. Menezes, R. S. Araújo, T. M. de Souza, "Lacunarity Exponent and Moran Index: A Complementary Methodology to Analyze AFM Images and Its Application to Chitosan Films", Phys. A Stat. Mech. Appl, 581, 126192 ,2021. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126192>
- [32] A. Pander, T. Onishi, A. Hatta, H. Furuta, "Study of self-organized structure in carbon nanotube forest by fractal dimension and lacunarity analysis", Materials Characterization, 160, 110086, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110086>
- [33] A. Das, V. Chawla, R. S. Matos, H. D. da Fonseca Filho, R. P. Yadav, Ş. Tãlu, S. Kumar, "Surface microtexture and wettability analysis of quasi two-dimensional (Ti, Al) N thin films using fractal geometry", Surface and Coatings Technology, 421, 127420, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127420>
- online [WWW Document], 2020. URL <http://www.worldlibrary.in/articles/eng/ImageJ> (accessed 11.17.20).
- [25] D. Nečas, P. Klapetek, Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis, Open Physics. 10 (2012). <https://doi.org/10.2478/s11534-011-0096-2>.
- [26] A. K. Nikumbh, A. V. Nagawade, G. S. Gugale, M. G. Chaskar, P. P. Bakare, "The formation, structural, electrical, magnetic and Mössbauer properties of ferrispinel, Cd 1- x Ni x Fe 2 O 4", Journal of materials science, 37, 637-647, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1013790129045>
- [27] A. Yadav, D. Varshney, "Structural and dielectric properties of copper-substituted Mg-Zn spinel ferrites", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 30, 1297-1302, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3931-2>
- [28] M. Fakharpour, F. Abrinaci, "Glancing angle deposition of helical manganese oxide nanostructures on the glass substrate and study the optical nonlinearity by Z-scan technique", Optical Materials, 143, 114219,2023. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114219>
- [29] M Fakharpour, "Fractal and structural analysis of the different sculptured Mn-based nanostructures",