



Synthesis and Characterization of Porous Silica Microspheres Capped with CuO: Antibacterial Drug Delivery System

Alireza Koohikar ¹, Maryam Tajabadi ^{2*}

¹ MSc Student, School of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Assistant Professor, School of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: mtajabadi@iust.ac.ir

Paper History:

Received: 2025-05-11

Revised: 2025-06-30

Accepted: 2025-08-02

Keywords:

Porous Silica,
CuO,
Microspheres,
Antibacterial,
Drug Delivery

Abstract Bacterial infections remain a leading cause of mortality worldwide, exacerbated by the overuse of antibiotics, which has driven the emergence of antimicrobial resistance. Recent advancements in biocompatible ceramic drug delivery systems aim to enhance antibiotic efficacy against resistant bacteria. This study focuses on the successful coating of copper oxide (CuO) nanoparticles onto mesoporous silica microspheres and the evaluation of their antibacterial properties. The synthesized CuO@SiO₂ system was characterized using various techniques, including X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and antibacterial assays. XRD analysis revealed distinct peaks for CuO@SiO₂ at 36.5°, 39.5°, and 68.2° (2θ), corresponding to the (002), (111), and (202) crystal planes, respectively, with a crystallite size of approximately 17 nm, in contrast to the amorphous silica structure. FESEM images confirmed the spherical morphology, microscale size (~1.2 μm), and porous structure of the samples, while EDS analysis indicated a copper content of 4–13 wt%, with elemental mapping demonstrating uniform copper distribution. Antibacterial testing (colony counting method) exhibited over 99% bacterial inhibition against both *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* after 24 hours for CuO@SiO₂. Owing to its porous structure and potent antibacterial activity, this microscale drug delivery system shows significant potential as a versatile carrier for various therapeutic agents, enhancing treatment efficacy for infections and wound healing applications.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.520186.1327>

URL: https://www.jamt.ir/article_226344.html

1. INTRODUCTION

Bacterial infections now rank among the top ten causes of mortality worldwide, posing a serious threat to public health. Over the past decades, antibiotics have proven highly effective in controlling these infections; however, their widespread and often indiscriminate use has given rise to an even greater challenge: bacterial resistance. In response to this growing crisis, the design of novel drug-delivery platforms capable of both carrying therapeutic agents and exerting intrinsic antimicrobial effects has become a key focus in biomedical research (Nicolosi et al., 2015). Porous silica microspheres have emerged as promising drug carriers owing to their high specific surface area, tunable pore size, and highly porous architecture, which together facilitate efficient loading and controlled release of molecular cargos (Chen et al., 2004). Meanwhile, copper oxide (CuO) nanoparticles, particularly in the tenorite (monoclinic) phase have attracted considerable attention for their unique physicochemical and antimicrobial properties. Tenorite's stability, semiconductor behavior, and strong oxidative activity not only make it invaluable in electronics, catalysis, and sensing applications, but also render it a powerful antimicrobial and oxidative agent (Takele Assefa et al., 2024). In this study, we report the synthesis of a multifunctional antibacterial delivery system in which tenorite-phase CuO nanoparticles are uniformly deposited onto the surface of porous silica microspheres. This hybrid platform enables the co-loading of various

therapeutic molecules while releasing bioactive copper ions that exert significant bactericidal effects. Such a system holds great promise for the treatment of bacterial and fungal infections as well as for enhancing the healing of diverse wound types.

2. MATERIALS AND METHODS

All reagents were obtained from Merck (Germany): tetraethyl orthosilicate (TEOS) served as the silica precursor for forming the porous microsphere framework; ammonium hydroxide (NH₄OH) was employed to adjust the reaction pH and catalyze the sol-gel process; cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) acted as the structure-directing surfactant to template mesopore formation; and copper(II) nitrate trihydrate (Cu(NO₃)₂·3H₂O) provided the copper source for in situ generation of tenorite-phase CuO nanoparticles.

2.1. Porous SiO₂ and Cu@SiO₂ Synthesis

Porous silica microspheres were prepared via a modified sol-gel route: CTAB was dissolved in quadruple-distilled water for 30 min, then NH₄OH was added to adjust the pH to 12. After stirring at room temperature for 1 h, TEOS was introduced dropwise under an 85 °C oil bath and the mixture was stirred for 8 h. The resulting silica spheres were collected by centrifugation, washed four times with ethanol, dried at 70 °C for 12 h, and finally calcined at 625 °C for 6 h (15 °C/min ramp) to yield a white porous powder. For CuO coating, a homogeneous ethanolic solution of TEOS and

Please cite this article as: Koohikar, A. & Tajabadi, M. (2025). Synthesis and Characterization of Porous Silica Microspheres Capped with CuO: Antibacterial Drug Delivery System. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 14, No. 1, 77-88. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.520186.1327>.



$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ was stirred for 1 h and then added dropwise to the dried silica microspheres. The mixture was vacuum-dried for 12 h and calcined under the same conditions (625°C , 6 h, $15^\circ\text{C}/\text{min}$) to produce a uniform, brown CuO -coated silica powder (Ma et al., 2016; Rahimabadi et al., 2022; Yaseen et al., 2022).

2.2. Characterization of hydrogels

FTIR spectra ($400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$) were recorded on KBr pellets using a PerkinElmer Spectrum 100 to identify functional groups, and XRD was employed to assess the amorphous/crystalline nature of the mesoporous silica. Morphology and elemental composition were examined by FESEM–EDS on a Tescan Mira3 at 15 kV, with samples drop-cast from ethanol dispersions onto aluminum foil and silver-sputtered for conductivity. Antibacterial efficacy was determined by applying 0.4–1 mL of a 0.5 McFarland ($\approx 1.5 \times 10^8$ CFU/mL) bacterial suspension to the samples, incubating for 1, 3, 6, and 24 h, then plating 0.1 mL on TSA and counting colonies after 24–48 h at $30 \pm 2^\circ\text{C}$; CFU/mL, percent kill, and log reduction were subsequently calculated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

FTIR analysis (Figure 1) of the $\text{NH}_4\text{F}/\text{CTAB}$ -templated SiO_2 microspheres revealed the characteristic CTAB bands at $2800\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ (C–H stretching), 1470 cm^{-1} (C–H bending) and 960 cm^{-1} (CH_3 out-of-plane), which disappeared after calcination and were replaced by Si–O–Si vibrations at 472, 810 and 1082 cm^{-1} , confirming complete surfactant removal and mesopore formation. Deposition of CuO onto the calcined SiO_2 did not noticeably alter these framework peaks, indicating that the silica network remains intact during the coating process.

XRD patterns (Figure 2) show pristine SiO_2 as a broad diffuse halo, characteristic of an amorphous material. After impregnation with $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 24 h stirring and rapid thermal treatment at 625°C , the composite exhibits three sharp diffraction peaks at $2\theta = 36.5^\circ$, 39.5° and 68.2° , assigned to the (002), (111) and (202) planes of tenorite-phase CuO (JCPDS 45-0937). Application of the Debye–Scherrer equation gives an average CuO crystallite size of $\sim 17\text{ nm}$, confirming the successful formation of nanoscale copper oxide on the silica support.

Morphological examination by FESEM (Figure 3) shows that both SiO_2 and $\text{CuO}@/\text{SiO}_2$ retain uniform, spherical particles of $\sim 1.2\ \mu\text{m}$ diameter, reflecting the original CTAB-templated self-assembly. Elemental mapping further demonstrates a homogeneous distribution of Cu alongside Si and O on the microsphere surface, and EDS quantification (Figure 4) indicates copper loadings ranging from 4 to 13 wt% depending on the region analyzed.

Antibacterial testing via colony-count assays (Figure 5) against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* revealed complete (100%) bacterial inactivation after 24 h exposure to $\text{CuO}@/\text{SiO}_2$. This potent biocidal effect is driven by the sustained release of Cu^{2+} ions from the tenorite nanoparticles, which disrupt microbial membranes and interfere with essential enzymatic processes. These results collectively demonstrate that $\text{CuO}@/\text{SiO}_2$ microspheres combine robust structural

integrity with high antimicrobial efficacy, making them attractive candidates for infection-control applications.

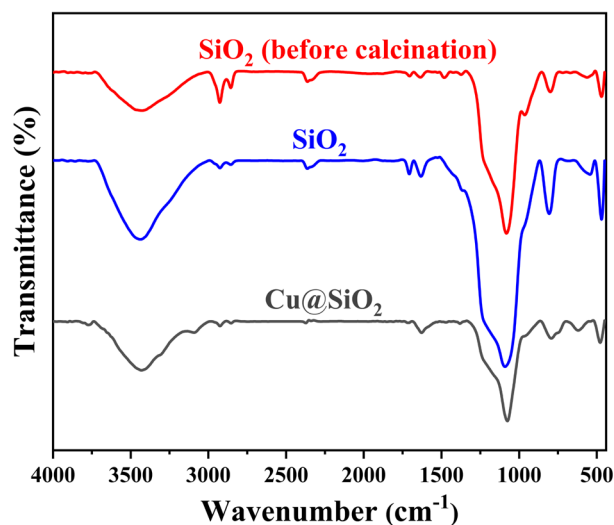


Figure 1. FTIR spectra of SiO_2 before calcination, SiO_2 after thermal treatment, and CuO -coated silica ($\text{CuO}@/\text{SiO}_2$).

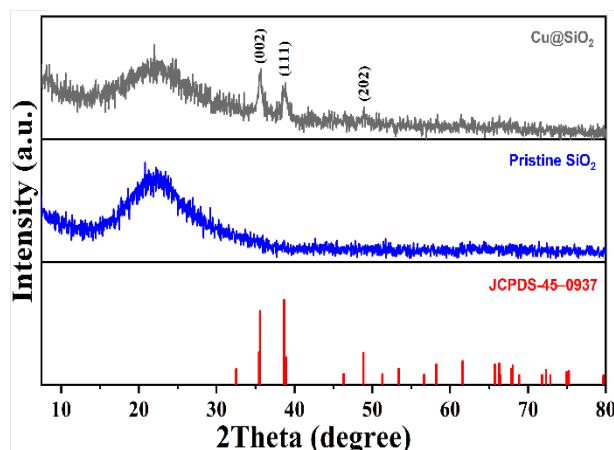


Figure 2. XRD patterns of pristine SiO_2 and CuO -coated SiO_2 ($\text{CuO}@/\text{SiO}_2$), with the tenorite (CuO) reference phase card.

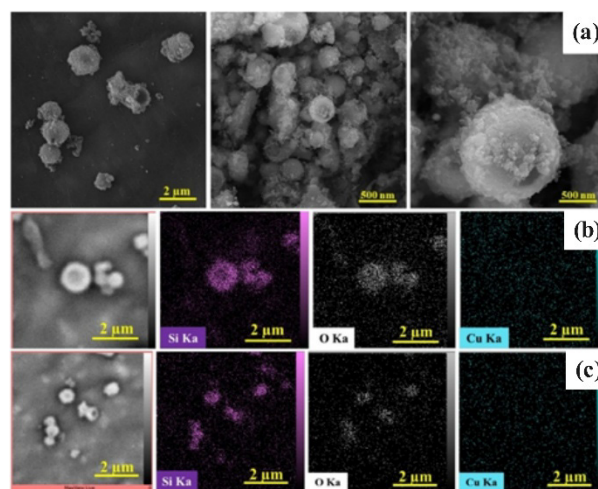


Figure 3. (a) FESEM images of $\text{CuO}@/\text{SiO}_2$ microparticles; (b, c) elemental mapping images from two different regions of the $\text{CuO}@/\text{SiO}_2$ sample.

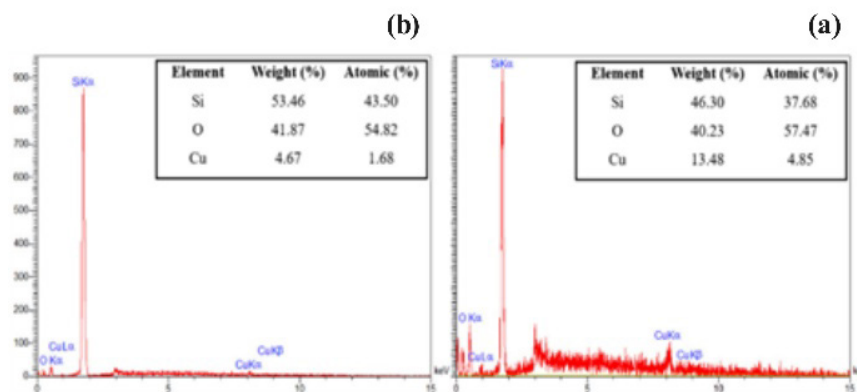


Figure 4. EDS spectra of the CuO@SiO₂ sample showing copper content of (a) 13 wt% and (b) 5 wt%.

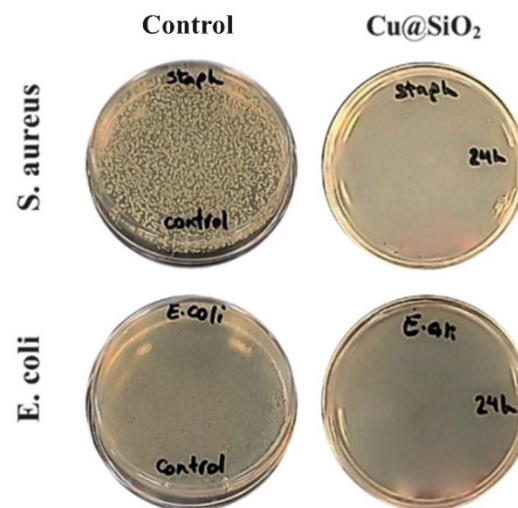


Figure 5. Antibacterial assay results of the CuO@SiO₂ sample against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*.

4. CONCLUSION

In this study, we successfully fabricated CuO-coated mesoporous silica microspheres (CuO@SiO₂) and systematically evaluated their structural and antibacterial properties. Characterization by XRD confirmed the presence of the tenorite phase with an average crystallite size of 17 nm, while FESEM and EDS analyses revealed uniformly distributed copper (4–13 wt%) on spherical particles of approximately 1.2 μm with well-developed porosity. Antibacterial assays demonstrated over 99% kill rates against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* after 24 h. Given their robust structural features, high copper loading, and potent antimicrobial activity, CuO@SiO₂ microspheres constitute a promising micro-scale drug-delivery platform for the treatment of bacterial infections and wound healing applications.

REFERENCES

- Chen, J.-F., Ding, H.-M., Wang, J.-X., & Shao, L. (2004). Preparation and characterization of porous hollow silica nanoparticles for drug delivery application. *Biomaterials*, 25(4), 723–727. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00566-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00566-0)
- Yaseen, M., Farooq, S., Khan, A., Shah, N., Shah, L. A., Bibi, S., Khan, I. U., & Ahmad, S. (2022). CuO-SiO based nanocomposites: Synthesis, characterization, photocatalytic, antileishmanial, and antioxidant studies. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 69(9), 1637–1653. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jccs.202200182>
- Rahimabadi, Z., Bagheri-Mohagheghi, M. M., & Shirpay, A. (2022). Synthesis, characterization, and the study of structural and optical properties of core/shell nanoparticles of SiO₂@CuO for solar absorption collectors application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(10), 7765–7780. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07928-0>
- Sharma, S., & Basu, S. (2021). Construction of an efficient and durable hierarchical porous CuO/SiO₂ monolith for synergistically boosting the visible-light-driven degradation of organic pollutants. *Separation and Purification Technology*, 279, 119759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119759>
- Jayanthi, S., Parangusan, H., babu, A., Balakrishnan, S., & Ponnammam, D. (2024). Fabrication of free standing nano-SiO₂ incorporated solid polymer electrolytes based on poly(vinyl) chloride. *Ionics*, 30(11), 7083–7096. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05787-9>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

سنتز و مشخصه‌یابی میکروکره‌های سیلیکای متخلخل با پوشش CuO: سیستم دارورسانی ضدباکتری

علیرضا کوهی کار^۱، مریم تاج‌آبادی^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران^۲ استادیار، دانشکده‌ی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

کلیدواژه‌ها:

سیلیکای متخلخل،

اکسید مس،

میکروکره،

ضد باکتری،

دارورسانی

چکیده عفونت‌های باکتریایی از علل اصلی مرگ در جهان به شمار می‌روند و استفاده‌ی بیش از حد از آنتی‌بیوتیک‌ها به بروز مقاومت در برابر آن‌ها منجر شده است. پژوهش‌های نوین با بهره‌گیری از سیستم‌های دارورسانی سرمایی زیست‌سازگار در تلاش هستند تا کارایی آنتی‌بیوتیک‌ها در برابر باکتری‌های مقاوم را بهبود بخشند. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی پوشش‌دهی موفق نانوذرات اکسید مس (CuO) بر روی سطح میکروکره‌های سیلیکای مزو متخلخل و ارزیابی خواص ضدباکتریایی آن است. سیستم CuO@SiO₂ سنتز شده با استفاده از آزمون‌های مشخصه‌یابی متعددی نظیر XRD، SEM، FTIR، EDS و آزمایش آنتی‌باکتریال ارزیابی شد. در آزمون XRD، برخلاف نمونه‌ی آمورف سیلیکا، نمونه‌ی CuO@SiO₂ دارای پیک‌های مشخصه در زوایای ۳۶/۵، ۳۹/۵ و ۶۷/۲ درجه (بر حسب ۲θ) به ترتیب متعلق به صفحات کریستالی (۰۰۲)، (۱۱۱) و (۲۰۲) بوده و اندازه‌ی کریستالیت ذرات CuO حدود ۱۷ نانومتر اندازه‌گیری شد. تصاویر FESEM ریخت‌شناسی کروی و اندازه‌ی میکرو (حدود ۱/۲ میکرومتر) و ساختار متخلخل نمونه را تأیید کردند و آزمون EDX حضور ۴ تا ۱۳ درصد وزنی عنصر مس را در سامانه نشان داد؛ تصاویر نقشه‌برداری عنصری نیز توزیع یکنواخت و منظم این عنصر را در ساختار تأیید کرد. آزمون آنتی‌باکتریال (روش شمارش کلونی) کشندگی بالای ۹۹ درصد را بر روی هر دو گونه‌ی باکتری E. coli و S. aureus پس از ۲۴ ساعت برای نمونه‌ی CuO@SiO₂ نشان داد. این سامانه‌ی دارورسانی، به دلیل ساختار متخلخل و قابلیت ضدباکتریایی، به عنوان یک حامل میکرواندازه‌ی مناسب برای درمان عفونت‌ها و زخم‌های مختلف، با امکان بارگذاری انواع داروها، پتانسیل بالایی برای افزایش اثربخشی درمان دارد.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.520186.1327>URL: https://www.jamt.ir/article_226344.html

۱- مقدمه

مقاوم هستند و، در برخی موارد، به‌ویژه تحت فشار زیستی محیط‌های بیمارستانی، سویه‌های حساس نیز می‌توانند مقاومت اکتسابی پیدا کنند. باکتری‌های مقاوم به دارو در برابر آنتی‌بیوتیک‌های موجود و حتی آنتی‌بیوتیک‌های تازه‌ی توسعه‌یافته مقاومت نشان می‌دهند که این امر می‌تواند به ناکامی کامل درمان‌های ضدباکتریایی منجر شود. با توجه به اهمیت بالینی مقاومت باکتریایی، پژوهش‌های نوآورانه در سال‌های اخیر بر تغییر پروفایل فارماکوکینتیک آنتی‌بیوتیک‌های شناخته‌شده از طریق پیوند آن‌ها با سیستم‌های دارورسانی بر پایه‌ی مواد

عفونت‌های باکتریایی به یکی از ده عامل اصلی مرگ‌ومیر در جهان تبدیل شده‌اند و چالشی جدی برای سلامت عمومی ایجاد کرده‌اند. در دهه‌های گذشته، آنتی‌بیوتیک‌ها آثار درمانی مطلوبی در کنترل این عفونت‌ها داشته‌اند، اما استفاده‌ی بیش از حد از آن‌ها به ظهور مشکلی بزرگ‌تر، یعنی مقاومت باکتریایی، منجر شده است. گونه‌های مختلف باکتری‌ها به دلیل نفوذپذیری محدود غشای سلولی خود به‌طور ذاتی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها

*عهده‌دار مکاتبات: مریم تاج‌آبادی

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۸۸۸۸، دورنگار: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۴۸۰

پیام‌نگار: mtajabadi@just.ac.ir

و صرفه‌ی اقتصادی، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. مس به دلیل در دسترس بودن، هزینه‌ی پایین و خواص اکسیداسیونی مطلوب، در مقایسه با فلزات گران‌قیمتی نظیر پلاتین و طلا، در کاربردهای نوری، الکتریکی و به‌ویژه ضدباکتریایی از جمله پانسمان زخم برای مقابله با باکتری‌های گرم‌مثبت و گرم‌منفی به‌طور گسترده استفاده می‌شود. علاوه‌براین، نانوذرات CuO به دلیل فعالیت ضدقارچی و کاربرد به‌عنوان حسگرهای زیستی برای تشخیص موادی مانند گلوکز، دوپامین و DNA و همچنین نقش آن‌ها به‌عنوان عوامل ضدتومور در درمان سرطان‌هایی نظیر ریه، سینه و پروستات اهمیت بسزایی دارند. این نانوذرات همچنین به‌عنوان نانوحامل‌های مؤثر در دارورسانی و در فرایندهای زیستی نظیر تنفس سلولی، تولید کلاژن و متابولیسم آهن نقش کلیدی ایفا می‌کنند و، به دلیل بی‌ضرر بودن برای پستانداران، گزینه‌ای ایمن برای کاربردهای زیستی به شمار می‌روند (Naz et al., 2023; Takele Assefa et al., 2024; Zeinali Heris et al., 2015).

تنوریت به‌عنوان یکی از پایدارترین اکسیدهای مس دارای ساختار بلوری مونوکلینیک است و، به‌واسطه‌ی خواص نیمه‌رسانایی منحصربه‌فرد خود، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های الکترونیک، کاتالیست‌ها، حسگرها و زمینه‌های زیست‌پزشکی پیدا کرده است. از آنجاکه تنوریت از نظر پایداری شیمیایی و ترمودینامیکی ویژگی‌های برجسته‌ای ارائه می‌دهد، فعالیت‌های ضدسرطان و جذب نوری قابل‌توجه آن موضوع مطالعات فنی و علمی فراوانی قرار گرفته است. علاوه‌براین، خواص ضد میکروبی و عملکرد اکسیداسیونی تنوریت آن را به ماده‌ای جذاب برای بهبود عملکرد سیستم‌های دارورسانی و توسعه‌ی پوشش‌های کاتالیستی تبدیل کرده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که فعالیت ضدباکتریایی اکسید مس عمدتاً به تشکیل فاز کریستالی تنوریت وابسته است، به‌طوری که مقدار فاز تنوریت، در سطوح حاوی مس، اندکی بالاتر از نمونه‌های CuO مشاهده می‌شود و این افزایش به تقویت جزئی اثر ضدباکتریایی در مقایسه با نمونه‌های CuO خالص منجر می‌شود. این ویژگی‌ها تنوریت را به گزینه‌ای مؤثر برای کاربردهای پیشرفته در زمینه‌های الکترونیک، دارورسانی و بهبود پوشش‌های کاتالیستی تبدیل می‌کند (Acikbas, & Calis Acikbas, 2022; Balasubramanian et al., 2023; MubarakAli et al., 2015).

سرامیکی زیست‌سازگار متمرکز شده است تا کارایی این داروها در برابر باکتری‌های مقاوم بهبود یابد (Nicolosi et al., 2015; Rakhshani et al., 2021; You et al., 2022).

سرامیک‌های زیستی، به‌ویژه شیشه‌های زیستی بر پایه‌ی سیلیکا، به دلیل ویژگی‌های برجسته‌شان در تعامل با بافت‌های زنده و توانایی تحریک بازسازی استخوان شناخته‌شده هستند. این مواد، که در دسته‌ی نسل دوم و سوم سرامیک‌های زیستی قرار دارند، نه تنها به دلیل قابلیت پیوند با استخوان و هدایت رشد استخوانی (استئوکنداکشن)، بلکه به دلیل فعال‌سازی فرایندهای بازسازی بافت (استئواینداکشن) شناخته می‌شوند. آنچه این سرامیک‌ها را در حوزه‌ی دارورسانی متمایز می‌کند ساختار متخلخل و امکان تنظیم خواص سطحی آن‌ها است که اجازه می‌دهد به‌مانند حامل‌های دارویی عمل کنند و داروها را به‌صورت کنترل‌شده در محل هدف رهاسازی کنند (Moniri Javadhesari et al., 2022).

میکروکره‌های سیلیکای متخلخل، به‌عنوان حامل‌های دارویی نوین، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود از جمله سطح ویژه بالا، اندازه‌ی منافذ قابل تنظیم و ساختار متخلخل برای کاربردهای دارورسانی و انتقال بار مولکولی بسیار مؤثر شناخته می‌شوند. یکی از موضوعات نوظهور در کاربرد این مواد در پزشکی ساخت میکروذرات با اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر است که قادر به حمل بارهای مولکولی یا نانومقیاس معمولاً دارو هستند. علاوه‌براین، سیلیکای متخلخل، با داشتن حجم آزاد بیش از ۸۰ درصد، قابلیت حمل محموله‌هایی نظیر پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و حتی ژن‌ها را دارد. این حامل‌ها، با ارائه‌ی ساختاری متخلخل و پایداری شیمیایی و فیزیکی بالا در محیط‌های بیولوژیکی، امکان بارگذاری بهینه‌ی دارو را فراهم می‌آورند و از تجزیه‌ی پیش از موعد دارو جلوگیری می‌کنند که نهایتاً به افزایش اثربخشی درمان و کاهش عوارض جانبی منجر می‌شود (Chen et al., 2004).

نانوذرات اکسید مس (CuO)، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و فعالیت ضد میکروبی برجسته، جایگاه ویژه‌ای در حوزه‌ی نانوفناوری و نانوپزشکی دارند و به‌عنوان گزینه‌ای نوین برای توسعه‌ی آنتی‌بیوتیک‌های نسل جدید و عوامل ضد عفونی‌کننده علیه عفونت‌های بیمارستانی مطرح شده‌اند. سنتز این نانوذرات با بهره‌گیری از اصول شیمی سبز و استفاده از عصاره‌های گیاهی، به دلیل سادگی، سازگاری با محیط زیست

سلسیوس ثابت شده بود. محلول حاصل به مدت ۸ ساعت به آهستگی هم زده شد تا تشکیل میکروذرات سیلیکا به طور کامل اتفاق بیفتد. در مرحله‌ی بعد، میکروذرات به وسیله‌ی سانتریفیوژ با اتانول چهار بار شست‌وشو شدند، سپس به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس خشک شدند و نهایتاً در کوره با دمای ۶۲۵ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۶ ساعت و با نرخ گرمایش ۱۵ درجه‌ی سلسیوس بر دقیقه کلسینه شدند. در پایان، پودر سفیدرنگ به عنوان محصول نهایی تهیه و برای استفاده‌های بعدی در دمای ۴ درجه‌ی سلسیوس نگهداری شد ([Zhang et al., 2019](#)).

۲-۳- ایجاد پوشش نانوذرات اکسید مس

برای ایجاد پوشش CuO بر روی میکروکره‌های سیلیکا، تفاوت اصلی با روش سنتز اولیه در تهیه‌ی محلول پوشش‌دهنده بود. در این روش، محلولی یکنواخت شامل TEOS، اتانول و نیترات مس سه‌آبه ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) به مدت یک ساعت هم زده و به صورت قطره‌قطره به مخلوط پیش‌ماده افزوده شد. پس از اتمام افزودن، محصولات به مدت ۱۲ ساعت در خلأ خشک شدند و نهایتاً در دمای ۶۲۵ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۶ ساعت با نرخ گرمایش ۱۵ درجه‌ی سلسیوس بر دقیقه کلسینه شدند، که این روند به تشکیل پودری قهوه‌ای‌رنگ ناشی از پوششی دقیق و یکنواخت از CuO بر روی میکروکره‌های سیلیکا منجر شد ([Ma et al., 2016](#); [Rahimabadi et al., 2022](#); [Yaseen et al., 2022](#)). در شکل ۱، طرح‌واره‌ی روش سنتز میکروکره‌های سیلیکا با پوشش نانوذرات CuO نشان داده شده است.

۲-۴- مشخصه‌یابی میکروکره‌های سیلیکای متخلخل

پوشش داده‌شده با نانوذرات اکسید مس ($\text{Cu}@\text{SiO}_2$)

طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی مادون قرمز^۱ (FTIR) یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی گونه‌های مولکولی، به‌ویژه گونه‌های آلی به شمار می‌رود. با این روش می‌توان گروه‌های عاملی مختلف موجود در ترکیبات مولکولی را شناسایی و در نتیجه ساختار احتمالی ترکیبات را تعیین کرد. این آزمون با قرص‌های شفاف تهیه‌شده از پودر نانوذرات همراه با پتاسیم بروماید و به وسیله‌ی دستگاه طیف‌سنج ۱۰۰ Spectrum ساخت شرکت Perkin Elmer آمریکا در محدوده‌ی طول موج cm^{-1}

در این پژوهش، نانوذرات CuO به شکل فاز تنوریت بر روی سطح میکروکره‌های سیلیکای متخلخل پوشش داده شدند. این سامانه، به عنوان یک سیستم دارورسانی ضدباکتریایی، امکان بارگذاری انواع داروها را فراهم می‌آورد و، به دلیل حضور اکسید مس و رهایش یون‌های مس، خاصیت ضدباکتریایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. از این رو، استفاده از این سیستم می‌تواند در درمان بیماری‌های عفونی، قارچی و نیز در بهبود روند درمان انواع زخم‌ها کاربرد مؤثری داشته باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این پژوهش، برای سنتز میکروکره‌های سیلیکای متخلخل و تهیه‌ی منبع اکسید مس از مواد شیمیایی مختلفی استفاده شده است که همگی از شرکت مرک آلمان تأمین شده‌اند. این مواد شامل تترائیل اورتوسیلیکات (TEOS) به عنوان منبع سیلیکا برای تشکیل ساختار میکروکره‌ها، هیدروکسید آمونیوم (NH_4OH) برای تنظیم pH محیط واکنش و تسریع فرایند سنتز، ستیل‌تری‌متیل‌آمونیوم برومید (CTAB) به عنوان سورفکتانت برای ایجاد ساختار متخلخل در میکروذرات، و مس (II) نیترات سه‌آبه ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) به عنوان منبعی برای تولید اکسید مس در واکنش‌ها هستند. هریک از این مواد نقش مشخصی در فرایند سنتز ایفا می‌کنند؛ TEOS پایه‌ی سیلیکایی را فراهم می‌کند، NH_4OH شرایط شیمیایی را بهینه می‌سازد، CTAB تخلخل را تنظیم می‌کند و مس (II) نیترات سه‌آبه در نهایت به اکسید مس تبدیل می‌شود.

۲-۲- سنتز میکروکره‌های سیلیکای متخلخل

میکروکره‌های سیلیکای متخلخل از طریق روش سل-ژل اصلاح‌شده سنتز شدند. در این فرایند، ابتدا مخلوطی از CTAB (ستیلی تری‌متیل آمونیوم بروماید) به عنوان سورفکتانت در آب دیونیزه‌ی چهار بار تقطیر به مدت ۳۰ دقیقه حل شد. سپس، به منظور تنظیم pH، NH_4OH (هیدروکسید آمونیوم) به آهستگی به محلول افزوده شد تا pH به عدد ۱۲ تنظیم شود. پس از یک ساعت هم زدن محلول در دمای اتاق، TEOS (تترائیل اورتوسیلیکات) به عنوان پیش‌ماده‌ی سیلیکا به صورت قطره‌قطره به محلول افزوده شد، درحالی‌که دمای آن به ۸۵ درجه‌ی

سی سی برداشته و روی پلیت حاوی محیط TSA پخش شد و به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت در دمای 30 ± 2 درجه‌ی سلسیوس انکوبه شد. پس از انکوباسیون، کلونی‌ها با استفاده از شمارشگر کلونی شمارش شدند و مقدار CFU/ml با فرمول ۱ محاسبه شد. در نهایت، بر اساس مقادیر CFU/ml، درصد مرگ‌ومیر و کاهش لگاریتمی باکتری‌ها تعیین شد. این روش امکان ارزیابی دقیق خواص آنتی‌باکتریال نمونه‌ها را فراهم می‌کند (Young & Santra, 2014).

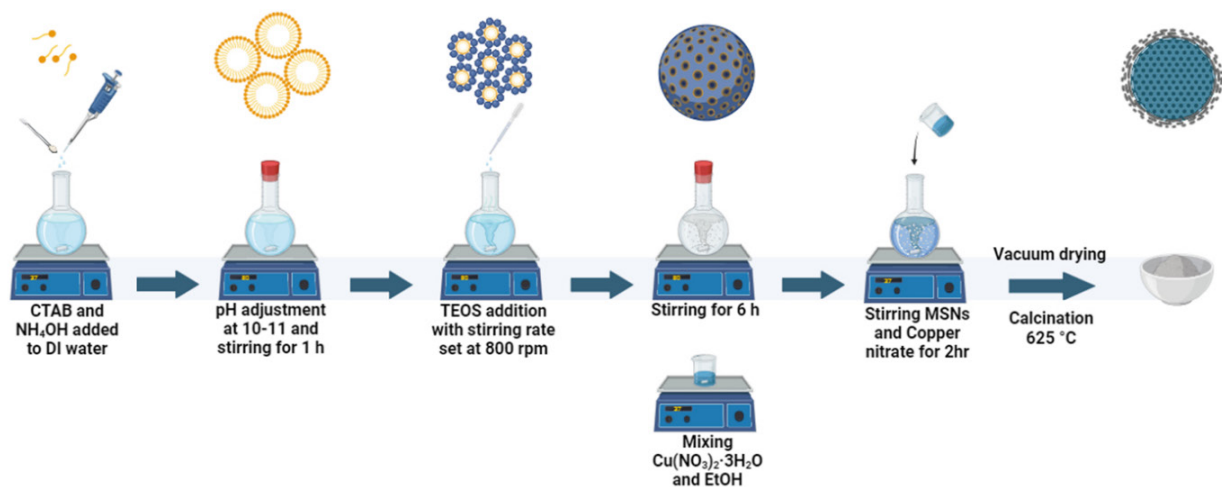
$$\text{CFU/ml} = \frac{\text{تعداد کلونی‌ها} \times \text{ضریب رقیق‌سازی}}{\text{حجم نمونه‌ی کشت داده‌شده}} \quad (1)$$

۳- نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش روش انجام آزمایش شرح داده شد، به منظور تحلیل ساختار شیمیایی و شناسایی فازهای تشکیل شده، به ترتیب از آزمون‌های طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد.

برای بررسی ریزساختار، اندازه‌ی ذرات، ریخت‌شناسی و تأیید حضور اکسید مس (CuO) بر سطح میکروکره‌های سیلیکا از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) به همراه تحلیل پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) بهره گرفته شد. در نهایت، به منظور ارزیابی خاصیت ضدباکتریایی سامانه‌ی $\text{CuO}@SiO_2$ ، از آزمون آنتی‌باکتریال به روش شمارش کلونی باکتری‌ها استفاده شد.

۴۰۰۰-۴۰۰۰ انجام شد. به منظور بررسی ساختار آمورف یا کریستالی در نانوذرات سیلیکای مزومتخلخل از آزمون پراش پرتو ایکس^۱ (XRD) استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۲ (FESEM) معمولاً برای بررسی و ارزیابی ریخت‌شناسی، اندازه و توزیع ساختار نانوذرات استفاده می‌شود. در میکروسکوپ الکترونی روبشی، از طیف‌سنج تفکیک انرژی^۳ (EDS) برای اندازه‌گیری انرژی طیف‌های مشخصه‌ی خارج‌شده از نمونه و شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن استفاده می‌شود. تصویربرداری از نانوذرات سنتز شده با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی Mira3 Tescan ساخت کشور جمهوری چک با تفنگ نشر میدانی ۱۵ کیلوولت انجام شد. برای این منظور، محلول‌های همگن با غلظت مشابه از پودرها با استفاده از اتانول و حمام اولتراسونیک تهیه و یک قطره از آن‌ها روی فویل آلومینیمی تمیز چکانده و خشک شد. سپس، برای بهبود رسانایی نانوذرات و انجام دادن آزمون، لایه‌ای بسیار نازک از نقره روی آن‌ها پوشش داده شد. برای بررسی خواص آنتی‌باکتریال نمونه‌ها به روش شمارش کلونی باکتری (CFU)، ابتدا یک کشت باکتری تازه تهیه شد و سوسپانسیونی با استاندارد ۰/۵ مک‌فارلند (معادل $10^8 \times 1/5$ CFU/ml) با استفاده از محلول رقیق‌کننده مانند سرم فیزیولوژیک یا بافر فسفات آماده شد. این سوسپانسیون برای رسیدن به غلظت سلولی مورد نظر بیشتر رقیق شد. سپس، بسته به مساحت و حجم نمونه، ۰/۴ تا ۱ سی‌سی از سوسپانسیون باکتری روی نمونه‌ها اعمال شد. نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۲۴ ساعت برداشت و کشت داده شدند. از هر نمونه، ۰/۱



شکل ۱. طرح‌واره‌ی روش سنتز میکروکره‌های سیلیکا با پوشش نانوذرات CuO

1. X-ray Diffraction
2. Field emission scanning electron microscopy
3. Energy dispersive X-ray spectroscopy

۳-۱- آنالیز تبدیل فوری‌ی مادون قرمز

در ابتدا طبق شکل ۲، نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) برای دو نمونه از میکروذرات SiO_2 ، که با استفاده از آمونیوم فلوراید و CTAB سنتز شده‌اند، قبل و بعد از فرایند کلسینه کردن به منظور حذف سورفکتانت CTAB ارائه شده است.

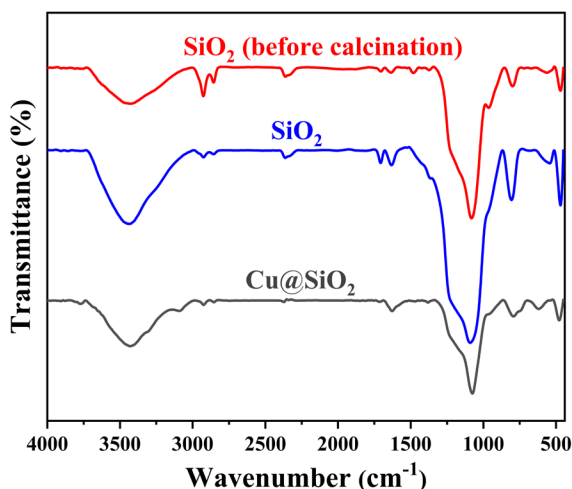
طیف FTIR نمونه‌ی خالص CTAB نیز به‌عنوان گروه کنترل از مطالعه‌های پیشین بررسی شده است. در طیف نمونه‌ی SiO_2 قبل از کلسینه کردن، پیک‌های مشخصه CTAB در محدوده‌ی $2800-3200 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی C-H و گروه‌های متیل و متیلن، 1470 cm^{-1} ارتعاشات خمشی C-H و 960 cm^{-1} ارتعاش خارج از صفحه‌ی CH- در CH_3 قابل مشاهده است. اما این پیک‌ها پس از کلسینه کردن حذف و باندهای جدیدی در 472 cm^{-1} مربوط به ارتعاش نوسانی Si-O در 810 cm^{-1} ، ارتعاش کششی متقارن Si-O-Si و 1082 cm^{-1} ارتعاش کششی نامتقارن Si-O-Si ظاهر می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی سنتز موفق ذرات سیلیکای متخلخل و حذف کامل سورفکتانت CTAB است (Kim & An, 2025; Umegaki et al., 2024). همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، پس از پوشش‌دهی نمونه‌ی سیلیکا با ذرات CuO هیچ‌گونه تأثیر مشخصی در پیک‌های FTIR دیده نمی‌شود.

۳-۲- بررسی فازی پودرها

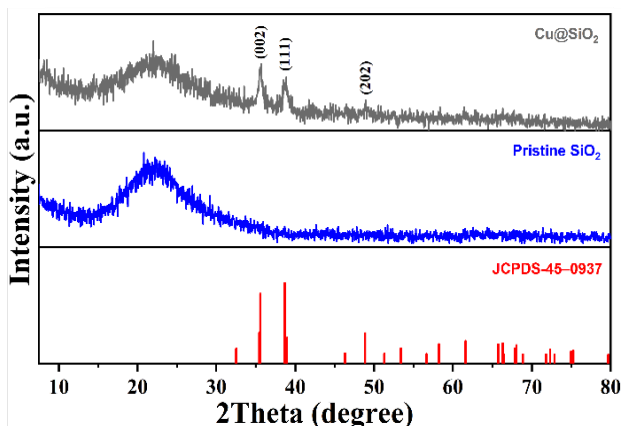
در شکل ۳، نمودار نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) برای دو نمونه‌ی SiO_2 و Cu@SiO_2 ارائه شده است. بر اساس نتایج این آزمون، نمونه‌ی SiO_2 متخلخل دارای ساختاری کاملاً آمورف است. پس از افزودن پودر SiO_2 به محلول نیترات مس حل شده در اتانول، هم‌زدن به مدت ۲۴ ساعت و انجام عملیات حرارتی در دمای 625°C درجه‌ی سلسیوس با نرخ گرمایش بسیار سریع، پودر قهوه‌ای‌رنگ به‌دست‌آمده حاکی از حضور نانوذرات CuO بر سطح میکروذرات SiO_2 است. مطابق با نتایج شکل ۳، فاز کریستالی ایجادشده مربوط به CuO از نوع تنوریت بوده و سه پیک مشخص در زوایای 2θ برابر با 36.7° ، 39.5° و 68.2° درجه به‌ترتیب به صفحات کریستالی (۰۰۲)، (۱۱۱) و (۲۰۲) اختصاص دارند که با کارت مرجع مخصوص فاز تنوریت (JCPDS 45-0937) از نانوذرات CuO تطابق داده شده است. اندازه‌ی نانوذرات تنوریت (اندازه‌ی کریستالیت) با استفاده از فرمول دبای-شرر ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$) محاسبه شد و مقدار آن

حدود ۱۷ نانومتر به دست آمد (Ali et al., 2024; Boudraa et al., 2024).

(al., 2024; Jayanthi et al., 2024).



شکل ۲. نتایج آزمون FTIR برای نمونه‌های SiO_2 پیش از کلسینه کردن، SiO_2 بعد از عملیات حرارتی و سیلیکای پوشش‌داده‌شده با اکسید مس (CuO@SiO_2)

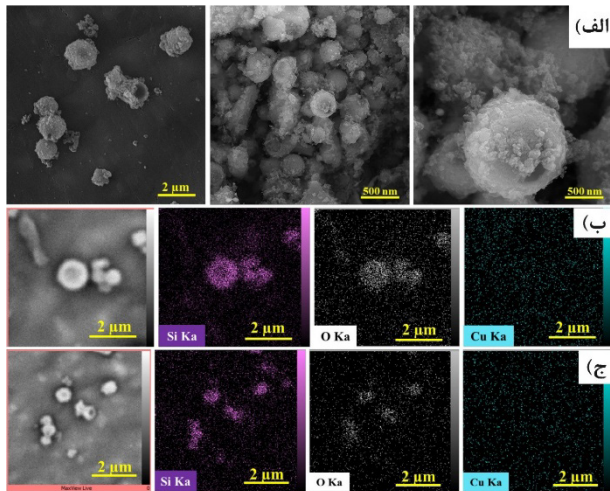


شکل ۳. آزمون XRD برای دو نمونه‌ی SiO_2 و CuO@SiO_2 به همراه کارت مرجع فاز تنوریت

۳-۳- بررسی ریزساختاری

تصاویر FESEM در شکل ۴ (الف) نشان‌دهنده‌ی سیلیکای متخلخل پوشش‌داده‌شده با نانوذرات اکسید مس در فاز تنوریت است. مشاهده می‌شود که ریخت‌شناسی ذرات سیلیکا کروی است. این شکل کروی نتیجه‌ی خودآرایی میسل‌های ستیل‌تری‌متیل‌آمونیوم بروماید (CTAB) در مرحله‌ی ابتدایی سنتز است. اندازه‌ی این ذرات حدود $1/2$ میکرومتر تخمین زده شده است که به شرایط سنتز از جمله هم‌زدن آهسته‌ی محلول هنگام افزودن تترائتوکسی‌سیلان (TEOS) و زمان طولانی اضافه کردن قطره‌قطره‌ی TEOS به محلول حاوی CTAB نسبت داده می‌شود. حضور نانوذرات اکسید مس بر سطح میکروکره‌های

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سیستم دارورسانی سنتز شده در این پژوهش شامل میکروکره‌های سیلیکا با تخلخل‌های بزرگ است که سطح آن‌ها با نانوذرات اکسید مس پوشش داده شده است. این ساختار، با توجه به ویژگی‌های ریخت‌شناختی و توزیع یکنواخت عناصر، پتانسیل بالایی برای کاربردهای دارورسانی دارد.



شکل ۴. الف) تصاویر FESEM از میکروذرات CuO@SiO_2 . ب) و ج) تصاویر مربوط به آزمون نقشه‌برداری عنصری از دو قسمت مختلف نمونه‌ی CuO@SiO_2

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمودارهای EDS برای نمونه‌ی CuO@SiO_2 ارائه شده‌اند. هر یک از این نمودارها از ناحیه‌ای مشخص از پودر CuO@SiO_2 در آزمون SEM استخراج شده است. به‌طور خاص، نمودار ۵ (الف) که حضور ۱۳ درصد جرمی از عنصر مس را نشان می‌دهد با تصویر ۴ (ب) که مربوط به نقشه‌برداری عنصری است مطابقت دارد. همچنین، نمودار ۵ (ب) با تصویر ۴ (ج) که نقشه‌برداری عنصری دیگری را نمایش می‌دهد همخوانی دارد و حضور ۴ درصد جرمی از عنصر مس را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون EDX در شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان حضور ۴ تا ۱۳ درصد وزنی از عنصر مس در ساختار CuO@SiO_2 را تأیید کرد.

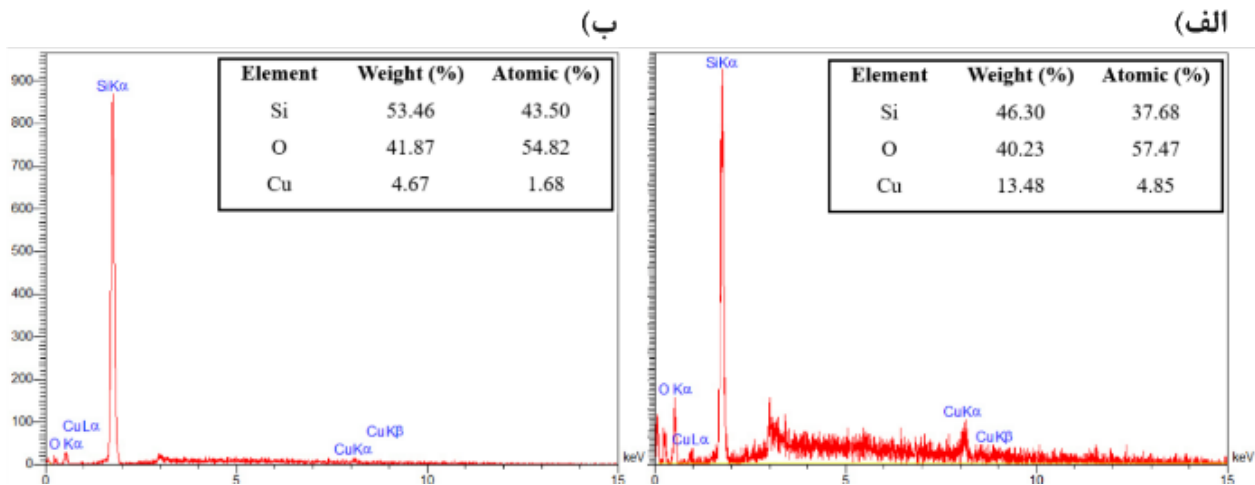
۳-۴- خاصیت آنتی‌باکتریال

سامانه‌های دارورسانی ضدباکتری با ارائه‌ی دوز مناسب و هدفمند دارو در محل عفونت نقش بسیار مهمی در افزایش اثربخشی درمان‌های عفونی دارند.

سیلیکا تغییری در ریخت‌شناسی آن‌ها ایجاد نکرده است. همچنین، تصاویر نقشه‌برداری عنصری در شکل ۴ (ب و ج) نشان می‌دهند که عنصر مس، مشابه سیلیسیم و اکسیژن، به‌صورت یکنواخت روی سطح سامانه پراکنده شده است.

پوشش‌دهی نانوذرات اکسید مس بر سطح ذرات سیلیکا از طریق روش‌های مختلفی انجام می‌شود که یکی از رایج‌ترین آن‌ها فرایند سل-ژل است. در این روش، هیدرولیز و تراکم پیش‌ماده‌هایی مانند TEOS در حضور نانوذرات اکسید مس رخ می‌دهد. این فرایند به تشکیل لایه‌ای از سیلیکا منجر می‌شود که یک رابط پایدار Cu-O-SiO_x از طریق پیوندهای شیمیایی با مس ایجاد می‌کند. این رابط از نظر ترمودینامیکی پایدار است و می‌توان آن را به‌صورت تتراهدرهای $[\text{SiO}_4]$ بر سطح مس مدل‌سازی کرد، به‌طوری که هر اتم سیلیکون دارای یک پیوند Si-O-Cu و سه پیوند Si-O-Si است (Chen et al., 2010).

علاوه‌براین، سازوکارهایی مانند جذب سطحی نیز می‌توانند در این فرایند نقش داشته باشند. در جذب سطحی، نانوذرات اکسید مس به‌دلیل اندازه‌ی کوچک و سطح ویژه‌ی بالا، از طریق نیروهای الکترواستاتیک، پیوندهای هیدروژنی یا نیروهای واندروالس به سطح میکروکره‌های سیلیکا متصل می‌شوند. یون‌های مس هیدراته (Cu^{2+}) در $\text{pH}=7$ به‌دلیل قابلیت کیلاسیون گروه‌های سیلانول ($-\text{Si-OH}$) و سیلانولات ($-\text{Si-O}^-$) روی سطح سیلیکای متخلخل جذب می‌شوند. گروه‌های سیلانولات با بار منفی، یون‌های مس با بار مثبت را از طریق جذب الکترواستاتیک به سطح می‌کشند و سپس اتم‌های اکسیژن این گروه‌ها، با تشکیل پیوندهای کوئوردینانسی، کمپلکس‌های پایداری مانند $\text{Cu}(\text{Si-O})_2$ ایجاد می‌کنند (Rahimabadi et al., 2022). در مرحله‌ی عملیات حرارتی در دمای 620°C درجه‌ی سلسیوس، مس موجود بر سطح میکروکره‌های سیلیکا اکسید و فاز تنوریت تشکیل می‌شود. نرخ گرمایش سریع (15°C درجه‌ی سلسیوس بر دقیقه) مانع خروج منظم CTAB از ساختار می‌شود و در نتیجه ساختار متخلخل منظم شکل نمی‌گیرد. بررسی دقیق تصاویر FESEM نشان‌دهنده‌ی وجود تخلخل‌های بزرگ در مرکز ذرات سیلیکا است که این امر به خروج کند و نامنظم CTAB نسبت داده می‌شود (Sharma & Basu, 2021; Takeuchi et al., 2024).



شکل ۵. نمودارهای آزمون EDS برای نمونه CuO@SiO_2 ، (الف) ۱۳ درصد و (ب) ۴ درصد عنصر مس

آزادسازی مداوم یون‌های مس از سطح نانوذرات رسوب شده روی هسته SiO_2 نقش اصلی را در نابودی باکتری‌ها ایفا می‌کند. این یون‌ها با اتصال به DNA میکروبی و ایجاد اختلال در گروه‌های سولفیدریل آنزیم‌های متابولیکی در زنجیره انتقال الکترون، تکثیر و عملکرد طبیعی باکتری‌ها را مختل می‌کنند. از سوی دیگر، فعالیت ضدقارچی این کامپوزیت در سطحی بین تأثیر بر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی قرار دارد که به ترکیب سازوکارهای آزادسازی یون‌ها و تعاملات الکترواستاتیکی نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، این کامپوزیت با بهره‌گیری از آزادسازی یون‌های مس، اختلال در فرایندهای سلولی و جاذبه‌ی الکترواستاتیک آثار ضد میکروبی متمایزی علیه انواع میکروارگانیسم‌ها از خود بروز می‌دهد (Kim et al., 2006; Zhang et al., 2010).

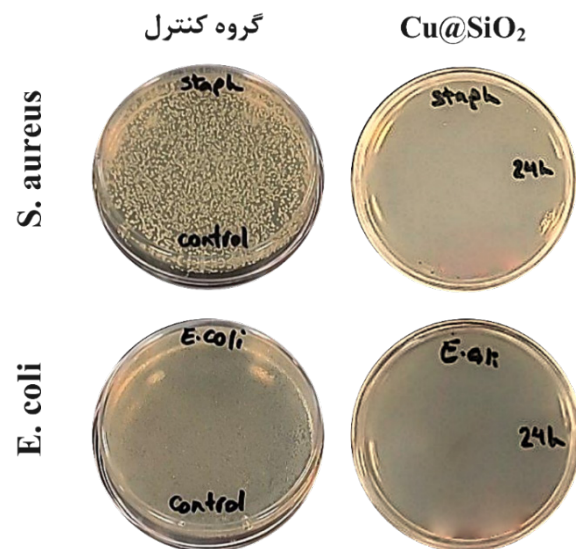
۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پوشش‌دهی نانوذرات اکسید مس (CuO) بر میکروکره‌های سیلیکای متخلخل و بررسی خواص ضدباکتریایی آن انجام شد. نتایج حاصل از مشخصه‌یابی‌ها نشان داد که سیستم CuO@SiO_2 دارای ساختار کروی با اندازه‌ی تقریبی $1/2$ میکرومتر، تخلخل مناسب و توزیع یکنواخت مس (۴ تا ۱۳ درصد وزنی) است.

آزمون XRD فاز کریستالی تنوریت با اندازه‌ی کریستالیت 17 نانومتر را تأیید کرد و تصاویر FESEM و EDS ساختار متخلخل و پراکندگی منظم عناصر را نشان داد. ارزیابی ضدباکتریایی این سامانه کشندگی بالای ۹۹ درصد علیه باکتری‌های $S. aureus$ و $E. coli$ را پس از ۲۴ ساعت اثبات کرد.

از این رو، آزمون‌های آنتی‌باکتریال به‌عنوان ابزاری ضروری برای شناسایی الگوهای حساسیت میکروبی و انتخاب دقیق آنتی‌بیوتیک مناسب در درمان عفونت‌های مقاوم به دارو استفاده می‌شوند. در نتیجه، این ارزیابی‌ها موجب بهبود نتایج درمانی، کاهش نرخ عفونت‌های ناشی از مقاومت‌های دارویی و بهینه‌سازی استفاده از منابع درمانی می‌شوند (Deng et al., 2022; Hedayati Tabari et al., 2023).

نتایج آزمون آنتی‌باکتریال به روش شمارش کلونی باکتری و با غلظت اولیه‌ی باکتری $10^8 \times 1/5$ CFU/ml مطابق با شکل ۶ نشان می‌دهد که کامپوزیت CuO@SiO_2 ، از طریق سازوکارهای متعدد، آثار ضد میکروبی قابل توجهی اعمال می‌کند، به‌طوری که پس از ۲۴ ساعت هر دو گونه‌ی باکتری $S. aureus$ و $E. coli$ را ۱۰۰ درصد کشته است.



شکل ۶. نتایج آزمون آنتی‌باکتریال نمونه CuO@SiO_2 بر روی دو

گونه‌ی باکتری $S. aureus$ و $E. coli$

9. Jayanthi, S., Parangusan, H., babu, A., Balakrishnan, S., & Ponnamma, D. (2024). Fabrication of free standing nano-SiO₂ incorporated solid polymer electrolytes based on poly(vinyl) chloride. *Ionics*, 30(11), 7083–7096. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05787-9>
10. Kim, Y. H., Lee, D. K., Cha, H. G., Kim, C. W., Kang, Y. C., & Kang, Y. S. (2006). Preparation and Characterization of the Antibacterial Cu Nanoparticle Formed on the Surface of SiO₂ Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(49), 24923–24928. <https://doi.org/10.1021/jp0656779>
11. Kim, Y. S., & An, G. S. (2025). Surface engineering of Fe₃O₄@SiO₂ Core-Shell nanoparticles: Role of CTAB/TEOS ratio. *Ceramics International*, 51(1), 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.006>
12. Ma, B., Huang, Y., Zhu, C., Chen, C., Chen, X., Fan, M., & Sun, D. (2016). Novel Cu@SiO₂/bacterial cellulose nanofibers: Preparation and excellent performance in antibacterial activity. *Materials Science and Engineering: C*, 62, 656–661. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.02.011>
13. Moniri Javadhesari, S., Koochi, M., & Jabraili, M. (2022). Nanomaterials: Applications in Regeneration of Damaged Tissues. *Advanced Ceramics Progress*, 8(4), 1–14. <https://doi.org/10.30501/acp.2022.356039.1100>
14. MubarakAli, D., Arunkumar, J., Pooja, P., Subramanian, G., Thajuddin, N., & Alharbi, N. S. (2015). Synthesis and characterization of biocompatibility of tenorite nanoparticles and potential property against biofilm formation. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 23(4), 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2014.11.007>
15. Naz, S., Gul, A., Zia, M., & Javed, R. (2023). Synthesis, biomedical applications, and toxicity of CuO nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(4), 1039–1061. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12364-z>
16. Nicolosi, D., Cupri, S., Genovese, C., Tempera, G., Mattina, R., & Pignatello, R. (2015). Nanotechnology approaches for antibacterial drug delivery: Preparation and microbiological evaluation of fusogenic liposomes carrying fusidic acid. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 45(6), 622–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2015.01.016>
17. Rahimabadi, Z., Bagheri-Mohagheghi, M. M., & Shirpay, A. (2022). Synthesis, characterization, and the study of structural and optical properties of core/shell nanoparticles of SiO₂@CuO for solar absorption collectors application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(10), 7765–7780. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07928-0>
18. Rakhshani, N., Hassanzadeh Nemati, N., Ramezani Saadatabadi, A., & Sadrnezhaad, S. K. (2021). Fabrication and evaluation of controlled release of Doxorubicin loaded UiO-66-NH₂ metal organic frameworks. *International Journal of Engineering*, 34(8), 1874–1881. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.08b.08>
19. Sharma, S., & Basu, S. (2021). Construction of an efficient and durable hierarchical porous CuO/SiO₂ monolith for synergistically boosting the visible-light-driven degradation of organic pollutants. *Separation and Purification Technology*, 279, 119759. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119759>
20. Takele Assefa, E., Shumi, G., Mohammed Gendo, K., Kenasa, G., & Roba, N. (2024). Review on green synthesis, characterization, and antibacterial activity of CuO nanoparticles using biomolecules of plant extract. *Results in Chemistry*, 8, 101606. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101606>

این سیستم دارورسانی، به دلیل ویژگی‌های ساختاری و فعالیت ضدباکتریایی قوی، پتانسیل بالایی به‌عنوان حامل میکروبیاد برای درمان عفونت‌ها و زخم‌ها با قابلیت بارگذاری داروهای متنوع ارائه می‌دهد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری آزمایشگاه‌های دانشگاه علم و صنعت ایران، که با فراهم کردن تجهیزات و حمایت‌های مورد نیاز ما را در انجام این پژوهش یاری رساندند، سپاسگزاری کنند.

مراجع

1. Acikbas, G., & Calis Acikbas, N. (2022). Copper oxide- and copper-modified antibacterial ceramic surfaces. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(2), 873–887. <https://doi.org/10.1111/jace.18149>
2. Ali, K., Sajid, M., Abu Bakar, S., Younus, A., Ali, H., & Zahid Rashid, M. (2024). Synthesis of copper oxide (CuO) via coprecipitation method: Tailoring structural and optical properties of CuO nanoparticles for optoelectronic device applications. *Hybrid Advances*, 6, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100250>
3. Balasubramanian, S., Rangasamy, S., Vivekanandam, R., & Perumal, E. (2023). Acute exposure to tenorite nanoparticles induces phenotypic and behavior alterations in zebrafish larvae. *Chemosphere*, 339, 139681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139681>
4. Boudraa, R., Talantikite-Touati, D., Souici, A., Djermoune, A., Saidani, A., Fendi, K., Amrane, A., Bollinger, J.-C., Tran, H. N., & Mouni, L. (2024). Breaking new grounds: Solid-state synthesis of TiO₂-La₂O₃-CuO nanocomposites for degrading brilliant green dye under visible light. *Journal of Cleaner Production*, 481, 144126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144126>
5. Chen, J. F., Ding, H. M., Wang, J. X., & Shao, L. (2004). Preparation and characterization of porous hollow silica nanoparticles for drug delivery application. *Biomaterials*, 25(4), 723–727. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00566-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00566-0)
6. Chen, C. K., Chen, Y. W., Lin, C. H., Lin, H. P., & Lee, C. F. (2010). Synthesis of CuO on mesoporous silica and its applications for coupling reactions of thiols with aryl iodides [10.1039/B918117B]. *Chemical communications*, 46(2), 282–284. <https://doi.org/10.1039/B918117B>
7. Deng, C., Dong, D., Wang, T., Hu, M., Sun, L., Zhang, X., Wang, S., Xiong, H., Chen, Y., & Liang, J. (2022). Promotion of diabetic wound healing using novel Cu₂O/Pt nanocubes through bacterial killing and enhanced angiogenesis in rats. *Biomaterials Advances*, 134, 112552. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112552>
8. Hedayati Tabari, F., Hamidnezhad, H., Karimian, M., & Nazifi, E. (2023). Synthesis and Characterization of Chitosan/Poly(Vinyl Alcohol) Polymer Nanofibers Containing Chicory Extract by Electrospun Method and Evaluation of Its Antibacterial Properties. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 11(4), 31–44. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2023.378386.1261>

21. Takeuchi, Y., Toyoda, Y., Gotoh, K., & Ohkubo, T. (2024). Structure-directing synthesis of porous CuO-SiO₂ nanocomposites using carbon nitride [10.1039/D4CE00183D]. *CrystEngComm*, 26(23), 3044–3053. <https://doi.org/10.1039/D4CE00183D>
22. Umegaki, T., Imai, H., Xu, Q., & Kojima, Y. (2024). In-situ synthesis of porous silica-ruthenium composite catalyst for hydrolysis of ammonia borane. *Journal of Porous Materials*, 31(6), 2043–2052. <https://doi.org/10.1007/s10934-024-01652-2>
23. Yaseen, M., Farooq, S., Khan, A., Shah, N., Shah, L. A., Bibi, S., Khan, I. U., & Ahmad, S. (2022). CuO-SiO based nanocomposites: Synthesis, characterization, photocatalytic, antileishmanial, and antioxidant studies. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 69(9), 1637–1653. <https://doi.org/10.1002/jccs.202200182>
24. You, K., Gao, B., Wang, M., Wang, X., Okoro, K. C., Rakhimbekzoda, A., & Feng, Y. (2022). Versatile polymer-based strategies for antibacterial drug delivery systems and antibacterial coatings [10.1039/D1TB02417E]. *Journal of Materials Chemistry B*, 10(7), 1005–1018. <https://doi.org/10.1039/D1TB02417E>
25. Young, M., & Santra, S. (2014). Copper (Cu)-Silica Nanocomposite Containing Valence-Engineered Cu: A New Strategy for Improving the Antimicrobial Efficacy of Cu Biocides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(26), 6043–6052. <https://doi.org/10.1021/jf502350w>
26. Zeinali Heris, S., Oghazian, F., Khademi, M., & Saeedi, E. (2015). Simulation of Convective Heat Transfer and Pressure Drop in Laminar Flow of Al₂O₃/water and CuO/water Nanofluids Through Square and Triangular Cross-Sectional Ducts. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 2(1), 6–18. <https://doi.org/10.30501/jree.2015.70065>
27. Zhang, N., Gao, Y., Zhang, H., Feng, X., Cai, H., & Liu, Y. (2010). Preparation and characterization of core-shell structure of SiO₂@Cu antibacterial agent. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 81(2), 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.07.054>
28. Zhang, Y., Yue, Q., Zagho, M. M., Zhang, J., Elzatahry, A. A., Jiang, Y., & Deng, Y. (2019). Core-Shell Magnetic Mesoporous Silica Microspheres with Large Mesopores for Enzyme Immobilization in Biocatalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(10), 10356–10363. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b18721>