

Research Paper

Modeling of Odor Dispersion and Elimination Strategies Using Advanced Technologies in Water SystemsSeyed Mehdi Hashemi
Doulabi^{1, ,}Gholamreza Nabi
Bidhend^{2*}Nasser
Mehrdadi²Mohammad Javad
Amiri³Maryam
Daneshfar⁴

¹ Ph.D. Candidate, Department of Environmental Planning, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemid@ut.ac.ir

² Prof., Department of Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ghghendi@ut.ac.ir (Corresponding Author), mehrdadi@ut.ac.ir

³ Assistant Prof., Department of Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. mjamiri@ut.ac.ir

⁴ Research assistance, Department of Environmental Planning, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. Maryamdaneshfar1371@gmail.com



10.22125/iwe.2025.552175.1899.

Received:
August 8, 2025
Accepted:
November 9, 2025
Available online:
December 25, 2025

Keywords:
Ferrite Nanoparticles,
Antibacterial Activity,
Heterogeneous
Catalyst, Odor
Removal, Drinking
Water

Abstract

The presence of various bacteria and fungi in water leads to the formation of unpleasant odors. In this study, ferrite nanocatalysts were synthesized to eliminate these microorganisms. Different ferrite nanoparticles, including CuFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , and NiFe_2O_4 , were prepared using the co-precipitation method, and their structures were identified and confirmed. Structural characterization of these nanoparticles was carried out using various techniques such as X-ray diffraction (XRD), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and vibrating sample magnetometry (VSM). The antibacterial activity of these nanoparticles was investigated against *Escherichia coli* (Gram-negative), *Staphylococcus aureus* (Gram-positive), as well as some fungi. Among the studied nanoparticles, CuFe_2O_4 exhibited the most effective antibacterial performance. The minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of CuFe_2O_4 against *E. coli* were 400 and 800 $\mu\text{g/mL}$, respectively—representing the lowest values among the tested samples. Therefore, the synthesized ferrite nanoparticles are safe, cost-effective, and stable compounds with strong potential for antibacterial applications.

* **Corresponding Author: Gholamreza Nabi Bidhend**

Address: Department of Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran, IRAN

Email: ghghendi@ut.ac.ir

Tel: 09122781725

1. Introduction

The use of nanocatalysts as antibacterial agents has been proposed as one of the significant advances in nanotechnology. Nanoparticles such as silver (Aliero et al., 2025), zinc oxide (Yancey-Gray et al., 2025), titanium oxide (Kaur et al., 2025; Świąch et al., 2025), gold and copper can have an effective function in destroying microorganisms by taking advantage of their specific physical and chemical properties.

2. Materials and Methods

All materials used in this study were obtained from Merck and used without any additional purification process. FT-IR spectra of the samples were recorded using an ABB Bomem MB-100 FT-IR spectrometer. In order to investigate the morphology and size distribution of nanoparticles, a MIRA3 TESCAN-RMRC field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and a TECNAI F20 transmission electron microscope (TEM) was used. Magnetic measurements were also performed at ambient temperature using an AGFM magnetometer.

2-1 Synthesis method of nickel/copper/cobalt ferrite magnetic nanoparticles (NiFe_2O_4 / CuFe_2O_4 / CoFe_2O_4)

A flask containing 100 mL of 0.2 M iron (III) chloride solution and 100 mL of 0.1 M nickel (II)/cobalt (II)/copper (II) chloride solution was stirred at 60 °C using a magnetic magnet. Then, a 3 M sodium hydroxide solution was added dropwise while stirring until the pH reached about 12-13. Then, three drops of oleic acid as a surfactant were added to the rotating sample to prevent the aggregation of the nanoparticles, and the mixture was allowed to stir for 2 hours at the same temperature. Then, the mixture was placed in a fixed place for one hour to allow the precipitates to settle. After this time, the excess water was poured off and the precipitate was washed three times with distilled water and then placed in an oven at 90 °C to dry. Finally, in order to calcine the catalyst, the precipitates were placed in an oven at 500 °C for 3 hours. In order to identify and confirm the catalyst structure, FT-IR and XRD tests were performed on the sample and TEM and SEM images were also obtained.

3. Results

The antibacterial activity of these nanoparticles was investigated against *E. coli* (gram-negative) and *S. aureus* (gram-positive) bacteria as well as fungi. Among them, CuFe_2O_4 showed the best antibacterial performance.

The MIC and MBC values for the CuFe_2O_4 catalyst against *E. coli* were 400 and 800 $\mu\text{g/mL}$, respectively, which are the lowest values among the samples.

The bactericidal effect of nanoparticles may be due to their small size; decreasing the size of nanoparticles and increasing the surface area to volume ratio increases the antibacterial activity of nanomaterials.

4. Discussion and Conclusion

In this study, in order to address the serious and troublesome problem of microbial water contamination, ferrite nanocatalysts were synthesized and studied with high precision and sensitivity. Nanoparticles of the CuFe_2O_4 , CoFe_2O_4 and NiFe_2O_4 types were prepared using an efficient and relatively simple co-precipitation method. Then, using a set of advanced identification techniques, such as X-ray diffraction (XRD), elemental analysis (EDS), scanning electron microscopy (SEM), infrared spectroscopy (FTIR) and magnetic properties analysis (VSM), the structure, composition and physical and chemical properties of these nanoparticles were comprehensively and accurately confirmed.

The results of laboratory studies clearly showed that the synthesized nanoparticles have effective and significant antibacterial properties. Among these nanoparticles, the CuFe_2O_4 compound showed a much better and more significant performance than other samples. This nanoparticle not only significantly inhibited the growth of Gram-negative (*E. coli*) and Gram-positive (*S. aureus*) bacteria, but also succeeded in achieving a lethal effect at lower concentrations than other samples. The MIC and MBC values for CuFe_2O_4 were 400 and 800 $\mu\text{g/mL}$, respectively, indicating the high potency of this compound in inactivating pathogens.

On the other hand, the unique properties of ferrite nanoparticles, such as chemical stability, relative safety, mass production capability, and relatively low manufacturing cost, make them attractive and efficient options for use in biomedical applications, water purification, and other disinfection fields. Overall, it can be

concluded that the use of ferrite nanocatalysts, especially CuFe_2O_4 , is an innovative, scientific and promising path to combat microbial contamination in aquatic environments. It is suggested that future research should investigate the effect of these nanoparticles under real environmental conditions as well as in the presence of more complex microbial compounds to pave the way for the development of sustainable and efficient antibacterial products.

5. Six important references

- 1) Aliero, A. S., Hasmoni, S. H., Haruna, A., Isah, M., Malek, N. A. N. N., & Zawawi, N. A. 2025. Bibliometric exploration of green synthesized silver nanoparticles for antibacterial activity. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100411.
- 2) Horta, A. C., Poças, A., Amaral, J. S., & Amorim, C. O. 2025. Fine-Tuning of Mn-Ferrite nanoparticle size using a Dual-Base coprecipitation method. *Materials Science and Engineering: B*, 314, 118058.
- 3) Ismael, M., & Wark, M. 2024. A simple sol–gel method for the synthesis of Pt co-catalyzed spinel-type CuFe_2O_4 for hydrogen production; the role of crystallinity and band gap energy. *Fuel*, 359, 130429.
- 4) Kaur, N., Kaur, A., Pathak, L., Vyas, P., Singh, S., & Kaur, R. 2025. Antibacterial Potential of Titanium-Doped Zirconium Ferrite Nanoparticles. *Ceramics International*.
- 5) Świąch, D., Palumbo, G., Jabłoński, P., Gajewska, M., Golda, A., Koziel, J., Mingo, B., Piergies, N., & Engelberg, D. L. 2025. Titanium coated with gold nanoparticles: a multifaceted investigation through electrochemical, spectroscopic, and biological approaches. *Applied Surface Science*, 164032.
- 6) Yancey-Gray, D., Nyamwihura, R., Arslan, Z., & Ogungbe, I. V. 2025. Antibacterial activities of copper, silver, and zinc-derived Nanoparticles and their capacity to enhance the antimicrobial activities of antibiotics. *Current Nanoscience*, 21(3), 423-456.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل سازی انتشار بو و راهکارهای حذف آن با استفاده از فناوری های نوین در آب

سید مهدی هاشمی دولابی^۱، دکتر غلامرضا نبی بیدهندی^{۲*}، دکتر ناصر مهرداد^۳، دکتر محمدجواد امیری^۴، مریم دانشفر^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

حضور انواع باکتری ها و قارچ ها در آب موجب ایجاد بوی نامطبوع می شود. در این پژوهش، نانوکاتالیزگرهای فریتی به منظور حذف این میکروارگانیسم ها سنتز شدند. نانوذرات فریتی مختلف شامل CuFe_2O_4 ، CoFe_2O_4 و NiFe_2O_4 با استفاده از روش هم رسوبی تهیه گردیدند و ساختار آن ها مورد شناسایی و تأیید قرار گرفت. شناسایی ساختاری این نانوذرات با استفاده از روش های مختلفی همچون پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز عنصری (EDS)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی فرورسرخ (FTIR) و آنالیز سیرشدگی مغناطیسی (VSM) انجام شد. فعالیت آنتی باکتریال این نانوذرات علیه باکتری های *E. coli* (گرم منفی) و *S. aureus* (گرم مثبت) و نیز برخی قارچ ها مورد بررسی قرار گرفت. در میان نانوذرات مورد مطالعه، CuFe_2O_4 عملکرد آنتی باکتریایی بهتری از خود نشان داد. مقادیر حداقل غلظت بازدارنده (MIC) و حداقل غلظت کشنده (MBC) برای CuFe_2O_4 علیه باکتری *E. coli* به ترتیب ۴۰۰ و ۸۰۰ میکروگرم بر میلی لیتر بودند که کمترین مقادیر در بین نمونه ها محسوب می شوند. بنابراین، نانوذرات فریتی تهیه شده، ترکیباتی ایمن، مقرون به صرفه و پایدار هستند و قابلیت استفاده در کاربردهای قوی ضدباکتریایی را دارند.

واژه های کلیدی: نانوذرات فریتی، خاصیت آنتی باکتریال، کاتالیزگر ناهمگن، حذف بو، آب آشامیدنی

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی، گروه برنامه ریزی محیط زیست، پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران. mehdi.hashemid@ut.ac.ir
^۲ استاد، گروه برنامه ریزی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. ghhendi@ut.ac.ir ، mehrdadi@ut.ac.ir
^۳ استادیار، گروه برنامه ریزی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. mjamiri@ut.ac.ir
^۴ دستیار تحقیقاتی گروه برنامه ریزی محیط زیست، پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Maryamdaneshfar1371@gmail.com



مقدمه

فریت‌ها

به‌طور کلی، کاتالیزگرها را بر اساس نوع فازی که در آن بر هم‌کنش‌های شیمیایی اتفاق می‌افتند، می‌توان به دو دسته همگن^۲ و ناهمگن^۳ تقسیم‌بندی نمود (Harraz et al., 2025; Mahal et al., 2024).

نانوذرات مغناطیسی

بارزترین ویژگی نانوذره‌های مغناطیسی این است که می‌توانند به راحتی توسط یک میدان مغناطیسی خارجی جمع‌آوری شوند. این دسته از نانوذرات شامل عناصر مغناطیسی مانند آهن، نیکل، کبالت و ترکیب‌های شیمیایی همراه آن‌ها می‌باشد (Lu et al., 2004). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این کاتالیزگرها بیشتر از همه به روش سنتز و ساختار شیمیایی آن‌ها وابسته است و اندازه‌ی آن‌ها به طور معمول بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد که در نتیجه می‌توان آن‌ها را جزء مواد دارای خاصیت ابرمغناطیسی^۴ طبقه‌بندی نمود (Lu et al., 2007). نانوذرات مغناطیسی به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: اکسیدها (فریت^۵)، ترکیب‌های فلزی^۶ و مواد هسته-پوسته^۷.

جداسازی نانوذرات مغناطیسی از محیط با اعمال

میدان مغناطیسی

یک مزیت و برتری مهم نانوذراتی که به عنوان کاتالیزگر ناهمگن استفاده می‌شوند این است که پس از استفاده می‌توان آن‌ها را با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی جذب و جمع‌آوری نمود و مورد استفاده مجدد قرار داد. هر چه بزرگی میدان مغناطیسی اعمالی و رفتارپذیری مغناطیسی میدان اعمالی و ذره‌ها بزرگ‌تر باشد، نیروی بیشتری به نانوذرات کاتالیزگر وارد می‌شود و جمع‌آوری آن‌ها بهتر انجام خواهد گرفت (Latham & Williams, 2008).

سنتز نانوذره‌های فرواسپینل

تاکنون روش‌های متنوعی برای ساخت این فرواسپینل‌ها گزارش شده‌اند که از آن جمله می‌توان به تخریب گرمایی^۸ (Mamdooh et al., 2025)، مایسل معکوس^۹ (Chernukha et al., 2025)، سل-ژل^{۱۰} (Ismael & Wark, 2024)، گرمایی^{۱۱} (Zhang et al., 2025)، سنتز در میکروامولسیون^{۱۲} (Kumar et al., 2024) و روش هم‌رسوبی^{۱۳} اشاره نمود (Lu et al., 2007).

روش هم‌رسوبی، یکی از اصلی‌ترین و ابتدایی‌ترین روش‌ها برای ساخت انواع مختلف نانوذره‌ها می‌باشد. اصول این روش سنتزی در بسیاری از روش‌های دیگر سنتز از فاز محلول نیز تکرار می‌شود. به‌طور عمومی، تشکیل محصول-های کم محلول از فاز آبی اساس این روش است. فرآیند رسوب‌گیری شیمیایی، مراحل هسته‌زایی و رشد را در بر دارد. کنترل همین دو مرحله است که منجر به تولید محصول‌های با کیفیت می‌گردد. بسیاری از ترکیب‌هایی که

^۸ Thermal Decomposition^۹ Reverse Micelle^{۱۰} Sol-Gel^{۱۱} Solvothermal and Hydrothermal^{۱۲} Microemulsion^{۱۳} Co-precipitationhomogeneous^۲heterogeneous^۳Supermagnetic^۴Ferrite^۵Metallic^۶Metallic with a shell^۷

روش سنتز نانوذرات مغناطیسی نیکل/مس/کبالت فریت (NiFe₂O₄/CuFe₂O₄/CoFe₂O₄)

یک بالن حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۲ مولار آهن(III) کلرید و ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ مولار نیکل(II) / کبالت(II) / مس(II) کلرید، در دمای ۶۰°C با استفاده از یک آهنربای مغناطیسی هم زده شد. سپس یک محلول سود ۳ مولار، قطره قطره و در حال هم خوردن به آن اضافه گردید تا pH آن به حدود ۱۳-۱۲ برسد. سپس سه قطره اولئیک‌اسید به عنوان سورفکتانت به نمونه در حال چرخش اضافه شد تا از تجمع نانوذرات مربوطه جلوگیری شود و در ادامه به مخلوط اجازه داده شد که به مدت ۲ ساعت در همین دما هم بخورد. سپس، مخلوط به مدت یک ساعت در محلی ثابت قرار داده شد تا رسوب‌های تشکیل‌شده، ته‌نشین گردند. پس از اتمام این زمان، آب اضافه، سرریز شده و رسوب حاصل سه مرتبه با آب مقطر شسته شد و در ادامه در آن در دمای ۹۰°C قرار گرفت تا خشک شود. در نهایت به منظور کلسینه شدن کاتالیزگر، رسوب‌ها در کوره‌ی ۵۰۰°C به مدت ۳ ساعت قرار داده شدند. در ادامه برای شناسایی و تایید ساختار کاتالیزگر، تست‌های FT-IR، XRD روی نمونه صورت گرفته و نیز تصاویر TEM و SEM از آن تهیه گردید.

یافته‌ها و بحث

سنتز و شناسایی نانوذرات مغناطیسی فریتی

به منظور شناسایی و تایید ساختار و تعیین اندازه ذرات به دست آمده، در ادامه از آنالیزهای XRD و FT-IR استفاده شد. همچنین، تصاویر SEM و TEM این ترکیب نیز تهیه شدند که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

طیف FT-IR نانوذرات مس فریت

طیف FT-IR نانوذرات مغناطیسی مس فریت در گستره 450 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} در شکل نشان داده شده است. پیک موجود در 3434 cm^{-1} مربوط به ارتعاش مولکول‌های آب جذب شده در سطح کاتالیزگر است و

با این روش (خصوصاً در دماهای پایین) ایجاد می‌شوند، حالت بی‌شکل^{۱۴} دارند. لذا برای به دست آوردن محصول‌هایی با ساختار بلوری مناسب، انجام فرآیندهای گرمایی ثانویه هم‌چون کلسینه شدن^{۱۵} یا بازپخت^{۱۶} ضروری است. این روش در کل کم‌هزینه و آسان می‌باشد که این عوامل باعث استفاده گسترده از آن شده‌اند (Horta et al., 2025; Phor et al., 2025; Ramesh et al., 2025). استفاده از نانوکاتالیزگرها به عنوان عوامل آنتی‌باکتریال، به عنوان یکی از پیشرفت‌های قابل توجه در نانوفناوری مطرح شده است. نانوذراتی مانند نقره (Aliero et al., 2025)، اکسید تیتانیوم (Yancey-Gray et al., 2025)، اکسید طلا و مس با بهره‌گیری از خواص فیزیکی و شیمیایی خاص خود می‌توانند عملکردی مؤثر در نابودی میکروارگانیسم‌ها داشته باشند. با این حال، برای استفاده گسترده و ایمن از این نانومواد، نیاز به بررسی‌های دقیق زیست‌سازگاری، دوز مؤثر و ارزیابی اثرات بلندمدت زیست‌محیطی وجود دارد (Mahal et al., 2024; Yancey-Gray et al., 2025).

مواد و روش‌ها

تمامی مواد مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک (Merck) تهیه شده و بدون انجام هرگونه فرآیند خالص‌سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند. طیف‌های FT-IR نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج FT-IR مدل ABB Bomem MB-100 ثبت شدند. به منظور بررسی ریخت‌شناسی و توزیع اندازه ذرات نانوذرات، از میکروسکوپ الکترونی روبشی با نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 TESCAN-RMRC و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل TECNAI F20 استفاده شد. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نیز در دمای محیط با استفاده از مگنتومتر AGFM انجام گرفت

^{۱۴} Post Annealing

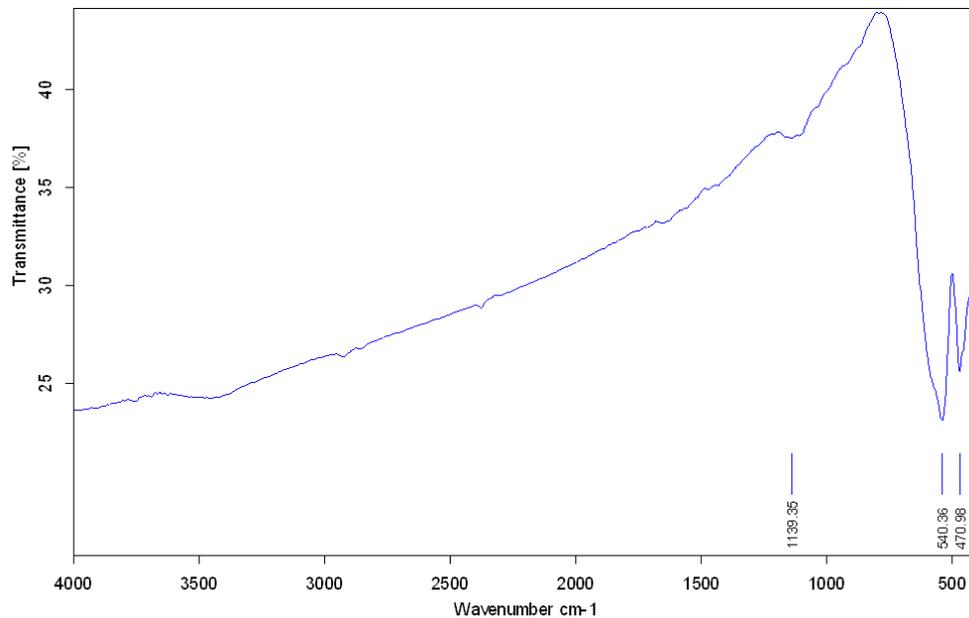
^{۱۵} Amorphous

^{۱۶} Calcination



پیوند Cu-O نسبت داد که تایید کننده ساختار کاتالیزگر مورد نظر می‌باشند.

پیک‌های موجود در 540 cm^{-1} و 470 cm^{-1} را نیز می‌توان به ترتیب به ارتعاش‌های کششی پیوند Fe-O و کششی



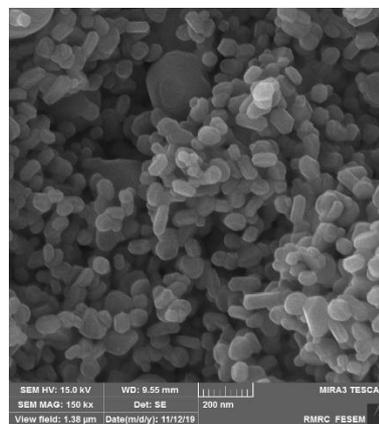
شکل (۱): طیف FT IR نانوذرات مس فریت

پراکندگی و توزیع نانوذرات سنتزی در این مورد خوب بوده و مجتمع شدن در مورد آنها دیده نمی‌شود (شکل

تصاویر SEM نانوذرات مس فریت

تصاویر SEM نانوذرات مس فریت نشان می‌دهد

.)



شکل (۲): تصویر SEM مربوط به نانوذرات مس فریت

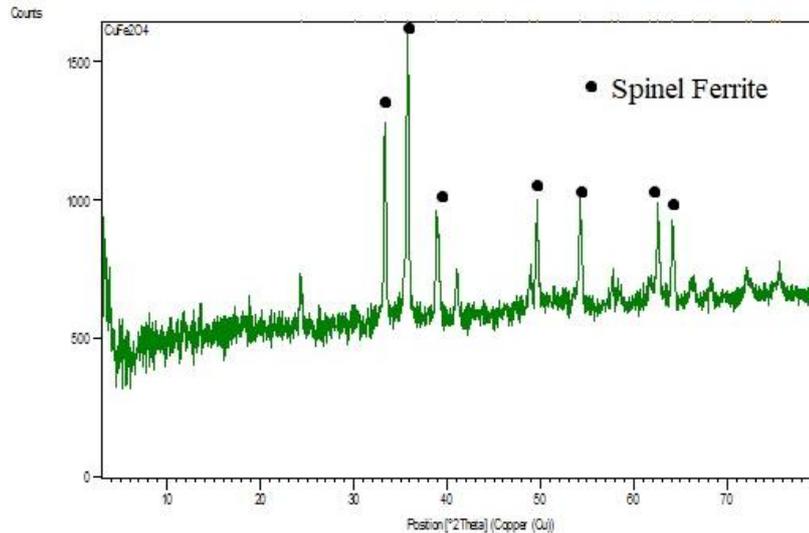
$$D = (0.9 \times) / \beta \cos \theta$$

D اندازه کریستالیت، β عرض پیک در نصف شدت بیشینه، θ زاویه براگ مربوط به پیک، λ طول موج پرتو ایکس است. با توجه به رابطه ی شرر می‌توان دریافت که هرچه اندازه ی ذرات ماده کوچک تر باشد، پیک پهن تر و شدت آن کمتر است، یعنی پیک نانوذرات در مقایسه با مواد معمولی شدت کمتر و پهنای بیشتری دارند. بنابراین طبق این رابطه اندازه نانوذرات ۴۷/۷ نانومتر در بلندترین

نتایج XRD نانوذرات مس فریت

شکل ساختار بلوری نانوذرات مس فریت را که در آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. ساختار اسپینل کاتالیزگر ساخته شده در اینجا هم با پیک‌های مربوط به ساختار اسپینل منطبق می‌باشند. رابطه شرر (فرمول زیر) رابطه ای برای محاسبه اندازه متوسط بلورها براساس داده های نمودار طیف پراش ایکس (XRD) نمونه است.

پیک (۳۵/۷۵) $\theta = 2$ محاسبه شد.

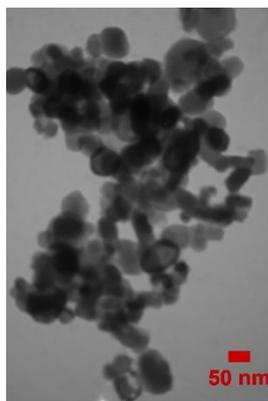


شکل (۳): طیف XRD مربوط به نانوذرات مس فریت

در شکل می‌باشد که توزیع و پراکندگی ذرات را در داخل ساختار کاتالیزگر نشان می‌دهد. اندازه نانوذرات ۵۰ نانومتر گزارش شد که تطابق خوبی با پراش ایکس (XRD) آنالیز دارد.

تصویر TEM نانوذرات مس فریت

تصویر عکس برداری میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM برای نانوذرات مس فریت به صورت نشان داده شده

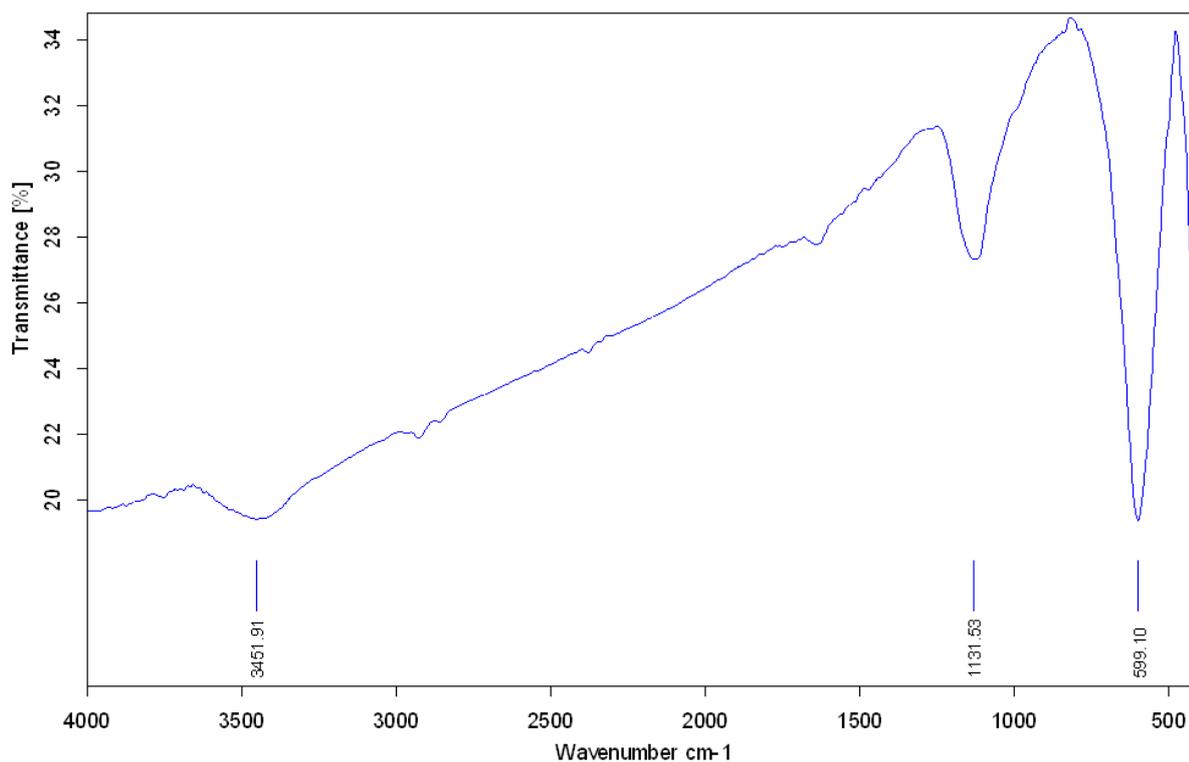


شکل (۴): تصویر TEM ثبت شده از نانوذرات مس فریت

ارتعاش مولکول‌های آب می‌باشد و پیک‌های موجود در cm^{-1} ۵۹۹^۱ و cm^{-1} ۴۰۱ را به ترتیب می‌توان به ارتعاش کششی پیوند Fe-O و کششی پیوند Ni-O نسبت داد که تاییدی بر ساختار کاتالیزگر می‌باشند

طیف FT-IR نانوذرات نیکل فریت

طیف FT-IR نانوذرات نیکل فریت همانند سایر فریت‌ها در گستره عدد موجی cm^{-1} ۴۵۰-۴۰۰ در شکل نشان داده شده است. پیک‌های موجود در cm^{-1} ۳۴۵۱ مربوط به

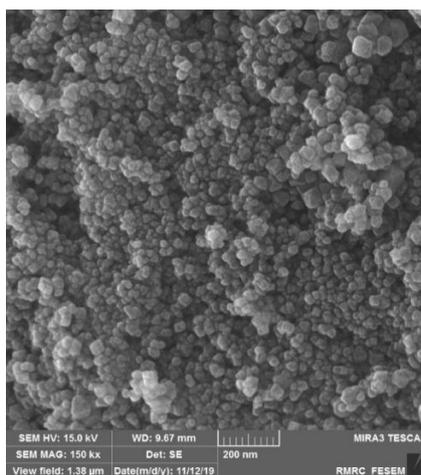


شکل (۵): طیف FT-IR نانوکاتالیزگر نیکل فریت

استفاده شد. همچنین، ذرات از پراکندگی و توزیع خوبی برخوردار بوده و مجتمع شدن در مورد آنها دیده نمی‌شود (شکل).

تصاویر SEM نانوذرات نیکل فریت

از آنالیز SEM به منظور تعیین اندازه ذرات نانوکاتالیزگر و چگونگی پراکندگی و توزیع آنها در نمونه

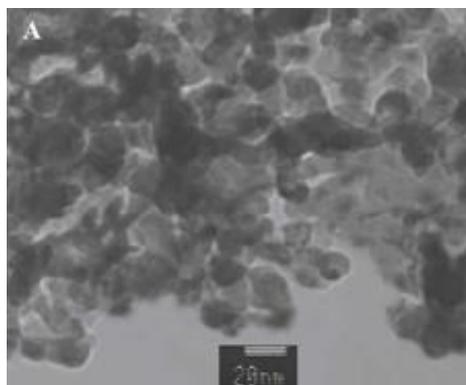


شکل (۶): تصویر SEM نانوذرات نیکل فریت

است. طبق این تصاویر، توزیع اندازه ذرات و پراکندگی آنها در عمق ساختار نیز یکنواخت و خوب می‌باشد

تصاویر TEM نانوذرات نیکل فریت

تصویر عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM برای نانوذرات نیکل فریت در شکل نشان داده شده

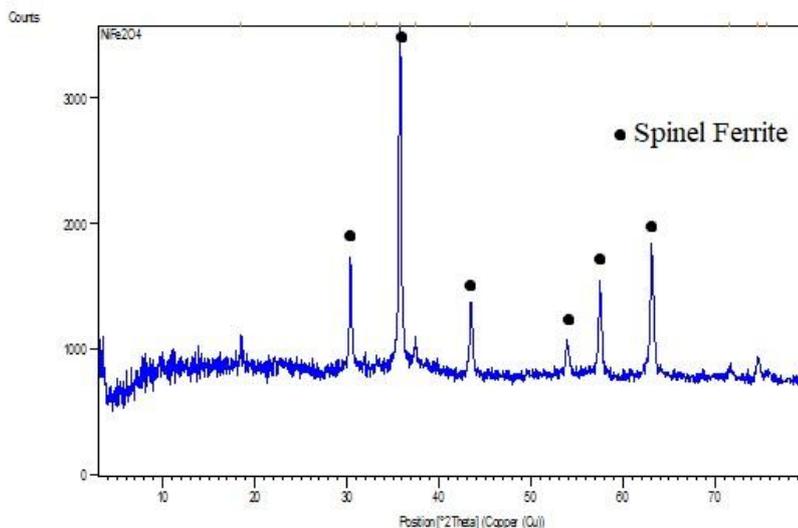


شکل (۷): تصویر TEM نانوذرات نیکل فریت

همان گونه که مشاهده می شود، پیک های موجود در این شکل با پیک های مربوط به ساختار اسپینل منطبق می باشد. طبق رابطه شرر اندازه نانوذرات ۵۲/۵ نانومتر در بلندترین پیک ($2\theta = 35/77$) محاسبه شد

نتایج XRD برای نانوذرات نیکل فریت

به منظور تعیین ساختار بلوری نمونه های تهیه شده، از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد (شکل).

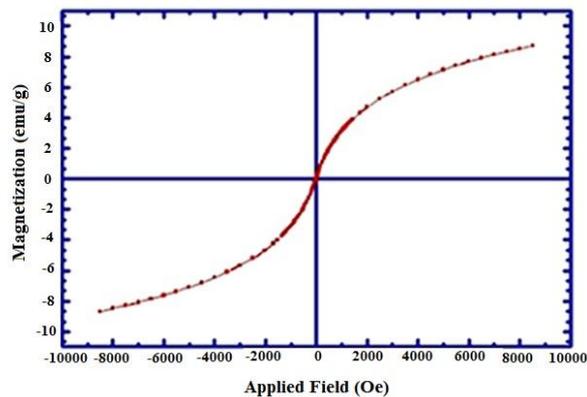


شکل (۸): طیف پراش پرتو ایکس نانوکاتالیزگر نیکل فریت

نمودار و مقادیر شاخص های مربوطه بر روی نمودار برمی آید، این نانوذرات خاصیت ابرپارامغناطیس را از خود نشان می دهند (شکل).

آزمون مغناطیس سنجی

آزمون مغناطیس سنجی یا آنالیز VSM نیز بر روی نانوذرات نیکل فریت انجام گرفت که همان گونه که از شکل

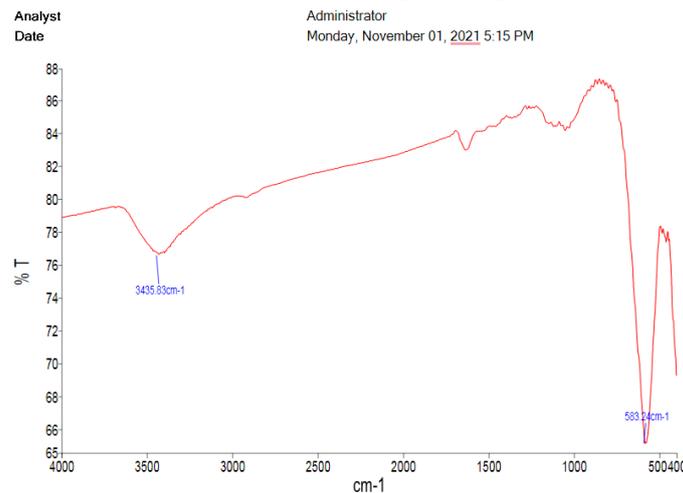


شکل (۹): تست مغناطیس سنجی مربوط به نانوذرات نیکل فریت

مولکول‌های آب و پیک موجود در 2923 cm^{-1} مربوط به کربن‌دی‌اکسید می‌باشد. پیک‌های موجود در 595 cm^{-1} و 416 cm^{-1} را نیز می‌توان به ترتیب به ارتعاش‌های کششی پیوند Fe-O و کششی پیوند Co-O نسبت داد که تایید کننده ساختار کاتالیزگر مورد نظر می‌باشند.

طیف FT-IR نانوذرات کبالت فریت

طیف FT-IR نانوذرات مغناطیسی کبالت فریت که در شکل نشان داده شده است تا حد زیادی به طیف نیکل فریت شباهت دارد. پیک‌های موجود در 3412 cm^{-1} و 1645 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی و خمشی

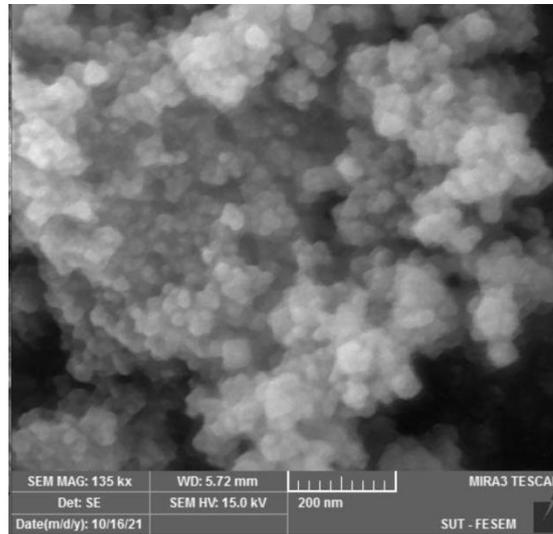


شکل (۱۰): طیف FT IR نانوذرات کبالت فریت

و توزیع کاملاً خوبی برخوردار بوده و مجتمع شدن در مورد آنها دیده نمی‌شود (شکل).

تصاویر SEM نانوذرات کبالت فریت

آنالیز SEM در مورد نانوذرات کبالت فریت نیز انجام گرفت که بر طبق تصاویر به دست آمده، ذرات از پراکندگی

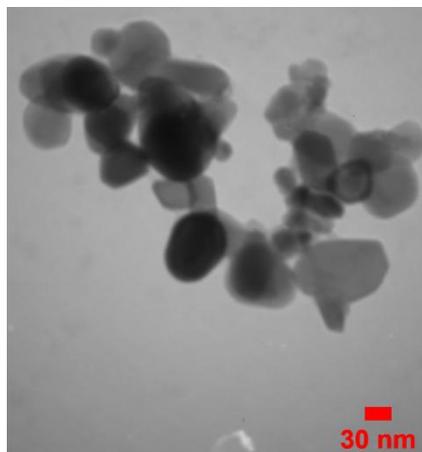


شکل (۱۱): تصویر SEM نانوذرات کبالت فریت

TEM برای نانوذرات کبالت فریت به صورت نشان داده شده در شکل می باشد که توزیع و پراکندگی ذرات را در داخل ساختار کاتالیزگر نشان می دهد

تصاویر TEM نانوذرات کبالت فریت

تصویر عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری یا



شکل (۱۲): تصویر TEM ثبت شده از نانوذرات کبالت فریت

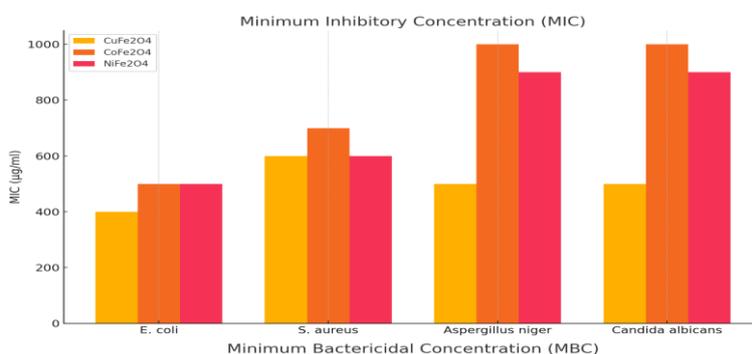
میکروگرم بر میلی لیتر بودند که کمترین مقادیر در بین نمونه هاست (شکل ۱۳ و ۱۴).
اثر باکتری کشی نانوذرات ممکن است به دلیل اندازه کوچک آن ها باشد، کاهش اندازه نانوذرات و افزایش نسبت سطح به حجم، موجب افزایش فعالیت آنتی باکتریال نانومواد می شود

فعالیت آنتی باکتریال این نانوذرات علیه باکتری های *E. coli* (گرم منفی) و *S. aureus* (گرم مثبت) و همچنین قارچ ها بررسی شد (جدول ۱ و ۲). در این بین $CuFe_2O_4$ بهترین عملکرد آنتی باکتریال را نشان داد
مقادیر MIC و MBC برای کاتالیزگر $CuFe_2O_4$ علیه باکتری *E. coli* به ترتیب ۴۰۰ و ۸۰۰



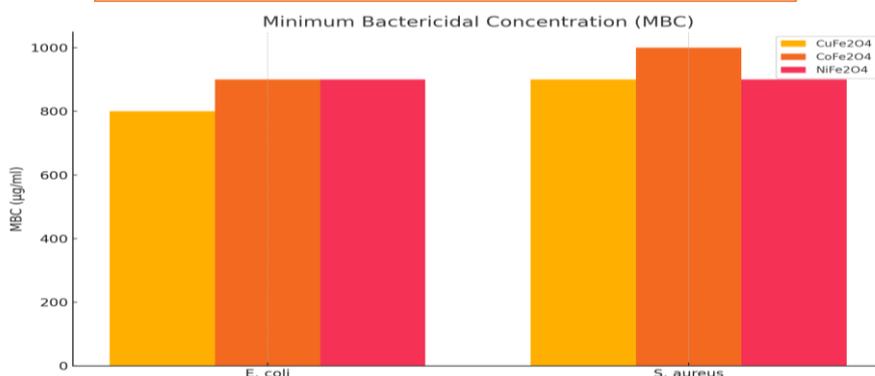
جدول (۱): بررسی فعالیت آنتی‌باکتریالی (MIC) نانوذرات سنتز شده علیه میکروارگانیسم‌ها

	Antibacterial MIC (µg/ml)		Antifungal MIC (µg/ml)	
	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Candida albicans</i>
CuFe₂O₄	400	600	500	500
CoFe₂O₄	500	700	1000	1000
NiFe₂O₄	500	600	900	900



شکل (۱۳): نمودار حداقل غلظت مهار کنندگی نانوکاتالیزگرهای سنتز شده علیه میکروارگانیسم‌ها
جدول (۲): بررسی فعالیت آنتی‌باکتریالی (MBC) نانوذرات سنتز شده علیه میکروارگانیسم‌ها

	Antibacterial MBC (µg/ml)	
	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>
CuFe₂O₄	800	900
CoFe₂O₄	900	1000
NiFe₂O₄	900	900



شکل (۱۴): نمودار حداقل غلظت کشندگی نانوکاتالیزگرهای سنتز شده علیه میکروارگانیسم‌ها

نتیجه گیری

در این پژوهش، با هدف مقابله با مشکل جدی و آزاردهنده آلودگی میکروبی آب، نانوکاتالیزگرهای فریتی با دقت و حساسیت بالا سنتز و بررسی شدند. نانوذراتی از نوع CuFe_2O_4 ، CoFe_2O_4 و NiFe_2O_4 با استفاده از روش کارآمد و نسبتاً ساده‌ی هم‌رسوبی تهیه شدند. سپس با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از تکنیک‌های پیشرفته‌ی شناسایی، نظیر پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز عنصری (EDS)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) و آنالیز خواص مغناطیسی (VSM)، ساختار، ترکیب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این نانوذرات به صورت جامع و دقیق تأیید شد. نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی، به روشنی نشان داد که نانوذرات سنتز شده دارای خاصیت ضدباکتریایی مؤثر و قابل توجهی هستند. در میان این نانوذرات، ترکیب CuFe_2O_4 عملکردی بسیار بهتر و قابل ملاحظه‌تر از سایر نمونه‌ها از خود نشان داد. این نانوذره نه تنها توانست رشد باکتری‌های گرم منفی (*E. coli*) و گرم مثبت (*S.*

aureus) را به شکل چشمگیری مهار کند، بلکه موفق شد در غلظت‌های پایین‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها اثر کشندگی نیز داشته باشد. مقادیر MIC و MBC برای CuFe_2O_4 به ترتیب برابر با ۴۰۰ و ۸۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی قدرت بالای این ترکیب در غیرفعال‌سازی عوامل بیماری‌زا می‌باشد. از سوی دیگر، ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات فریتی نظیر پایداری شیمیایی، ایمنی نسبی، قابلیت تولید انبوه و هزینه‌ی نسبتاً پایین ساخت، آن‌ها را به گزینه‌هایی جذاب و کارآمد برای استفاده در کاربردهای زیست‌پزشکی، تصفیه‌ی آب و سایر حوزه‌های ضد عفونی‌کننده تبدیل می‌کند. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوکاتالیزگرهای فریتی، به ویژه CuFe_2O_4 ، یک مسیر نوآورانه، علمی و آینده‌دار برای مقابله با آلودگی‌های میکروبی در محیط‌های آبی به شمار می‌آید. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثر این نانوذرات در شرایط محیطی واقعی و نیز در مواجهه با ترکیبات پیچیده‌تر میکروبی مورد بررسی قرار گیرد تا راه برای توسعه‌ی محصولات ضدباکتریایی پایدار و کارآمد هموارتر گردد

منابع

- Aliero, A. S., Hasmoni, S. H., Haruna, A., Isah, M., Malek, N. A. N. N., & Zawawi, N. A. 2025. Bibliometric exploration of green synthesized silver nanoparticles for antibacterial activity. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100411.
- Brabers, V. A. 2007. Ferrimagnetic insulators. *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*.
- Chernukha, A., Zirnik, G., Matveev, K., Boleiko, Y., Markin, T., Anannikov, E., Loshkarev, A., Gudkova, S., & Vinnik, D. 2025. Reverse micelle synthesis of metal oxides. *Journal of Structural Chemistry*, 66(3), 569-585.
- Harraz, D. M., Lodaya, K. M., Tang, B. Y., & Surendranath, Y. 2025. Homogeneous-heterogeneous bifunctionality in Pd-catalyzed vinyl acetate synthesis. *Science*, 388(6742), eads7913.
- Horta, A. C., Poças, A., Amaral, J. S., & Amorim, C. O. 2025. Fine-Tuning of Mn-Ferrite nanoparticle size using a Dual-Base coprecipitation method. *Materials Science and Engineering: B*, 314, 118058.



- Ismael, M., & Wark, M. 2024. A simple sol–gel method for the synthesis of Pt co-catalyzed spinel-type CuFe_2O_4 for hydrogen production; the role of crystallinity and band gap energy. *Fuel*, 359, 130429.
- Jasrotia, R., Prakash, J., Saddeek, Y. B., Alluhayb, A. H., Younis, A. M., Lakshmaiyya, N., Prakash, C., Aly, K., Sillanpää, M., & Ismail, Y. A. 2025. Cobalt ferrites: Structural insights with potential applications in magnetics, dielectrics, and Catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 522, 216198.
- Kaur, N., Kaur, A., Pathak, L., Vyas, P., Singh, S., & Kaur, R. 2025. Antibacterial Potential of Titanium-Doped Zirconium Ferrite Nanoparticles. *Ceramics International*.
- Kumar, S., Singhal, S., & Chanana, A. 2024. Employing the Microemulsion Synthesis Technique to Investigate the Structural and Magnetic Properties of Multicomponent Ferrite Nanoparticles. *Crystal Research and Technology*, 59(3), 2300269.
- Latham, A. H., & Williams, M. E. 2008. Controlling transport and chemical functionality of magnetic nanoparticles. *Accounts of chemical research*, 41(3), 411-420.
- Lu, A. H., Salabas, E. e. L., & Schüth, F. 2007. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(8), 1222-1244.
- Lu, A. H., Schmidt, W., Matoussevitch, N., Bönnemann, H., Spliethoff, B., Tesche, B., Bill, E., Kiefer, W., & Schüth, F. 2004. Nanoengineering of a magnetically separable hydrogenation catalyst. *Angewandte Chemie*, 116(33), 4403-4406.
- Lu, H., Li, X., Li, G., Hong, X., & Tsang, S. C. E. 2025. Na-decorated binary spinel ferrite catalysts for the hydrogenation of CO_2 to olefins. *Catalysis Science & Technology*, 15(7), 2229-2237.
- Mahal, A., Mahal, E., Al-Mutlaq, S., Daham, A. H., Sadiq, J. Z., Zinad, D. S., Alotaibi, H. F., & Mohapatra, R. K. 2024. Green synthesis and antimicrobial activity of copper nanoparticles (Cu-NPS) by Piper longum fruit extract. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 38(6), 1653-1666.
- Mamdooh, N. W., Ibrahim, I. M., & Al Rashid, S. N. (2025). Hydrothermal synthesis of spinel ferrite nanoparticles and study its effect on optical, structural and magnetic characterization. *AIP Conference Proceedings*,
- Phor, L., Saini, S., Afzal, M., Meena, V., Singh, A., Kumar, A., & Chahal, S. 2025. Investigations on the structural, magnetic and spin interactions of $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Er}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ferrites synthesized by co-precipitation method. *Materials Science and Engineering: B*, 317, 118234.
- Ramesh, T., Madhavi, V., Rao, P. V., Vagdevi, K., Basavegowda, N., & Baek, K.-H. 2025. Impact of ultrasonic-assisted co-precipitation synthesis and ultrasonication duration on cobalt ferrite nanostructures: A comparative study of structural, morphological, optical and magnetic properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 114035.
- Świąch, D., Palumbo, G., Jabłoński, P., Gajewska, M., Golda, A., Koziel, J., Mingo, B., Piergies, N., & Engelberg, D. L. 2025. Titanium coated with gold nanoparticles: a multifaceted

investigation through electrochemical, spectroscopic, and biological approaches. *Applied Surface Science*, 164032.

Yancey-Gray, D., Nyamwihura, R., Arslan, Z., & Ogungbe, I. V. 2025. Antibacterial activities of copper, silver, and zinc-derived Nanoparticles and their capacity to enhance the antimicrobial activities of antibiotics. *Current Nanoscience*, 21(3), 423-456.

Zhang, Y., Wei, Z., Batuk, M., Hadermann, J., Filatov, A. S., Chang, J., Han, H., Abakumov, A. M., & V Dikarev, E. 2025. Lithium-rich, oxygen-deficient spinel obtained through low-temperature decomposition of heterometallic molecular precursor. *Energy materials*, 5(7), 1-16.