

Fabrication of TiO₂/CoFe₂O₄ Nanocomposite for Water Purification and Removal of Methyl Orange Organic Dye

Sayed Ali Hassanzadeh-Tabrizi^{1*}, Saeid Jabbarzare²

¹ Professor, Department of Materials Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

² Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

*Corresponding Author's Email: hassanzadeh@iau.ac.ir (Sayed Ali Hassanzadeh-Tabrizi)

Paper History:

Received: 2025-03-02

Revised: 2025-04-27

Accepted: 2025-08-26

Keywords:

Nanocomposite,
TiO₂,
CoFe₂O₄,
Methyl Orange

Abstract Contaminated water is considered one of the major problems facing societies in recent years, leading to the increasing need for new purification systems, which has consequently become a leading area of research among scientists. Photocatalysts and Advanced Oxidation Processes (AOPs) are recognized as effective techniques for water purification and pollutant removal. These methods are particularly applicable in reducing both organic and inorganic contaminants in wastewater. The development of new technologies and nanostructures can enhance the efficiency of these processes and make them more suitable for broader use in water treatment. In the present study, a TiO₂/CoFe₂O₄ nanocomposite was synthesized using the sol-gel method. X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and UV-visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-vis DRS) were employed to analyze the synthesized composite. The photocatalytic activity of the produced composite was studied through the degradation of methyl orange. The X-ray diffraction analysis indicated that titania was in the anatase phase while cobalt ferrite exhibited a cubic spinel structure. The average particle size of the nanoparticles was approximately 100 nm. The synthesized composite demonstrated effective degradation performance without the addition of oxidants. The photocatalytic degradation of titania increased followed by the addition of cobalt ferrite. The band gap energy of the samples decreased from 2.3 eV to 2.91 eV following the inclusion of CoFe₂O₄. The kinetic rate constants for the degradation of methyl orange for pure titania and composite samples were 0.0082 and 0.0143, respectively. Scavenger tests were conducted to investigate the photocatalytic degradation mechanism, which showed that superoxide and hydroxyl radicals were the most active species in the photocatalytic degradation process.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.510098.1322>

URL: https://www.jamt.ir/article_229110.html

1. INTRODUCTION

One of the most critical current topics in industrial wastewater treatment is identifying the most effective method to convert industrial wastewater pollutants into less harmful forms. Industrial wastewater contains various types of pollutants that must be removed from water streams. This can be achieved through physical, chemical, biological, or combined processes. Discharging untreated wastewater undoubtedly impacts the environment, particularly limited water resources. Any contamination in one source ultimately affects others. Pollution of groundwater by pathogens, inorganic, as well as organic pollutants, is one of the most significant challenges facing humanity. Given the long lifespan and high pollutant release potential of factories, their removal remains one of the most challenging problems confronting human societies ([Morin-Crini et al., 2022](#)).

Titanium dioxide is a light-sensitive semiconductor that can be used as a photocatalyst to decompose organic compounds and toxic pollutants in wastewater and air. UV radiation on TiO₂ leads to the formation of valence band holes and conduction band electrons, creating an oxidative and reductive environment where toxic materials and organic pollutants are decomposed into

simple, non-toxic molecules such as carbon dioxide and water, which do not require additional disposal or recycling. However, this material is only activated by high-energy UV radiation, which significantly limits its practical application. Research has therefore focused on integrating TiO₂ with other materials to control electron-hole recombination and enhance limited solar light absorption. In addition, smaller and nano-sized particles are preferred to enhance the photocatalytic activity of this semiconductor, as a higher surface area improves photocatalytic activity ([Peiris et al. 2021](#)). However, this poses some problems in separating the catalyst from treated water. Fixing the semiconductor using supports results in a significant reduction in surface area. To benefit from the high surface area of nano-sized TiO₂ photocatalyst particles and achieve effective catalyst recovery, use of titanium dioxide composite with magnetic nano-powders can be considered as an alternative option. Among various magnetic materials, cobalt ferrite nanoparticles were selected as the catalyst in this study. These magnetic particles possess strong anisotropy, high coercivity, and good magnetism along with chemical stability ([Heydaryan & Almasi Kashi, 2023](#)). Therefore, the objective of this research is to synthesize a titanium dioxide-cobalt ferrite

Please cite this article as: Hassanzadeh-Tabrizi, S. A. & Jabbarzare, S. (2025). Fabrication of TiO₂/CoFe₂O₄ nanocomposite for water purification and removal of methyl orange organic dye. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 14, No. 2, 26-36. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.510098.1322>.



nanocomposite to enhance the catalytic activity of the composite. The synthesized composite was characterized through different methods, and its capability for methyl orange degradation was then evaluated.

2. MATERIALS AND METHODS

The raw materials for synthesizing cobalt ferrite powder included cobalt nitrate, iron nitrate salts, and citric acid. Nickel ferrite nanoparticles were synthesized via a self-combustion sol-gel method. Initially, cobalt nitrate, iron nitrate salts, and citric acid were separately dissolved in distilled water. After complete dissolution, the solution was stirred continuously for one hour. The mixture was then heated under stirring to 80°C until the water completely evaporated, forming a thick gel. The resulting brown gel was heated at 250°C to initiate the combustion reaction.

The burnt powders were mechanically ground in a mortar to remove agglomerates and subsequently calcined at 800°C for one hour to obtain cobalt ferrite spinel structures. Mesoporous titanium dioxide particles were synthesized using the sol-gel method, with titanium tetra-isopropoxide (TTIP) as the titanium precursor and P123 as a surfactant. Specifically, 0.9 g of P123 was dissolved in 60 mL of absolute ethanol under stirring. TTIP was then added dropwise to the resulting clear solution and stirred for three hours to achieve uniform dispersion. Subsequently, 36 mL of distilled water was gradually added to the mixture and aged for 24 hours to form a gel. Meanwhile, ammonia solution was added to adjust the pH to 10. The resulting gel was repeatedly washed with distilled water and dried under vacuum at 80°C for five hours. It was then calcined at 200°C and 450°C for two and three hours, respectively, to produce mesoporous TiO₂ powder. Mesoporous TiO₂-CoFe₂O₄ composites were prepared by adding CoFe₂O₄, obtained from the self-combustion sol-gel process, into the TiO₂ gel under stirring. The gel

underwent thermal treatment similar to that of pure TiO₂ to produce the composite material.

X-ray diffraction analysis was used to examine the phases of the obtained composite. For this purpose, a Philips X'Pert model device was employed. The morphology of the powder and the surface of the composite components was investigated using a MIRA3 TESCAN scanning electron microscope (SEM). For imaging, the components and powder were coated with gold and then placed inside the SEM chamber. Absorption measurements were conducted using a spectrophotometer (T70 UV/VIS Spectrometer, PG Instruments Ltd), and diffuse reflectance spectroscopy (DRS) was performed using an Avantes-Avaspec-2048 spectrophotometer.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The produced composite was analyzed using X-ray diffraction (XRD) after the calcination process to investigate its phases, and the results are presented in Figure 1. The diffraction peaks at angles of 25.35°, 36.88°, 37.78°, 38.50°, 48.08°, 53.92°, 55.12°, 68.59°, 70.36°, and 75.09° correspond to the crystal planes (101), (103), (004), (112), (200), (105), (211), (116), (220), and (215), respectively. They indicate the formation of titanium dioxide with an anatase structure (Liu & Fu, 2020). In this structure, anatase has a tetragonal crystal system where titanium atoms are located at the corners and center of the unit cell along the c-axis, while oxygen atoms are arranged in an octahedral configuration, resulting in a distorted structure. This unique arrangement enhances the photocatalytic activity of anatase. Moreover, peaks at angles of 18.28°, 30.08°, 35.4°, 37.05°, 43.05°, 56.9°, 62.41°, 70.50°, and 78.7° correspond to the crystal planes (111), (220), (311), (222), (400), (511), (440), (620), and (444), respectively, indicating the formation of CoFe₂O₄ with a cubic spinel structure and an inverse spinel configuration.

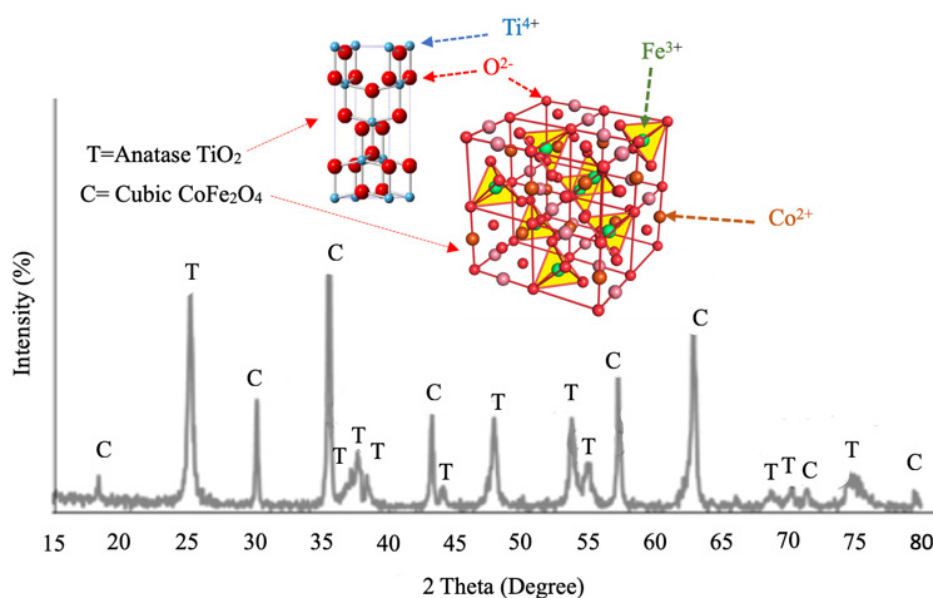


Figure 1. X-ray diffraction pattern of calcined composite.

The photocatalytic efficiency of the samples over time was investigated. The results showed that, as time passes, methyl orange is degraded; however, the degradation is more pronounced in the composite sample compared to pure titanium dioxide. The higher photocatalytic activity of the composite sample can be attributed to the interaction between the two semiconductors which reduces electron-hole recombination. In other words, when light is applied to the photocatalytic system, electrons are transferred from the valence band to the conduction band, creating a hole in the valence band. The generated electron-hole pairs participate in reactions with water, producing free radicals. The generated free radicals attack the organic dye adsorbed on the surface of the photocatalyst, decomposing it into harmless species like water and carbon dioxide.

4. CONCLUSION

In the present study, a titanium dioxide-cobalt ferrite photocatalyst was synthesized using the sol-gel method. The resulting material was examined in terms of its phase and crystallite size. The synthesized nanoparticles were approximately spherical in shape, with an average particle size of about 100 nanometers. The bandgap energy of titanium dioxide decreased with the addition of cobalt ferrite. The photocatalytic activity results indicated that compositing titanium dioxide with cobalt ferrite enhances the degradation of methyl orange. Further investigations revealed that superoxide and hydroxyl radicals are the primary active species responsible for the photocatalytic activity of this composite system.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their gratitude to Islamic Azad University of Najafabad for its support in conducting this research.

REFERENCES

1. Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaram, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., et al. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
2. Peiris, S., de Silva, H. B., Ranasinghe, K. N., Bandara, S. V., & Perera, I. R. (2021). Recent development and future prospects of TiO₂ photocatalysis. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(5), 738-769. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000465>
3. Heydaryan, K., & Almasi Kashi, M. (2023). Characterization and Magnetic Properties of CoFe₂O₄ Nanoparticles Synthesized under Gas Atmosphere: Effect of Ferrofluid Concentration on Hyperthermia Properties. *Advanced Ceramics Progress*, 9(2), 45-52. <https://doi.org/10.30501/acp.2023.402618.1126>
4. Liu, X., & Fu, J. (2020). Electronic and elastic properties of the tetragonal anatase TiO₂ structure from first principle calculation. *Optik*, 206, 164342. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164342>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

ساخت نانوکامپوزیت $TiO_2/CoFe_2O_4$ برای تصفیه‌ی آب و حذف رنگ آلی متیل اورانژسیدعلی حسن‌زاده تبریزی^{۱*}، سعید جبار زارع^۲^۱استاد، گروه مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران^۲استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

کلیدواژه‌ها:

نانوکامپوزیت،

 TiO_2 , $CoFe_2O_4$

متیل اورانژ

چکیده آب‌های آلوده و بحران‌های محیط زیستی مربوط به آن یکی از معضلات بزرگ جوامع در سال‌های اخیر است و در نتیجه به سیستم‌های تصفیه‌ی جدید یکی از زمینه‌های تحقیقاتی پیشرو در بین محققان نیاز است. فوتوکاتالیست‌ها و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) به‌عنوان تکنیک‌های مؤثر در تصفیه‌ی آب و حذف آلاینده‌ها شناخته می‌شوند. این روش‌ها به‌ویژه در کاهش آلاینده‌های آلی و معدنی در پس‌آب‌ها کاربرد دارند. توسعه‌ی فناوری‌های جدید و نانو ساختارها می‌تواند به افزایش کارایی این فرایندها کمک کند و آن‌ها را برای استفاده‌ی گسترده‌تر در تصفیه‌ی آب مناسب‌تر سازد. در تحقیق حاضر، نانوکامپوزیت $TiO_2/CoFe_2O_4$ با استفاده از روش سل-ژل ساخته شد. پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی انعکاسی ماوراءبنفش-مرئی (UV-vis DRS) برای شناسایی کامپوزیت تولیدی استفاده شدند. فعالیت فوتوکاتالیستی کامپوزیت تولیدی با استفاده از تخریب رنگ آلی متیل اورانژ مطالعه شد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس نشان داد که تیتانیا در فاز آاناتاز و فریت کبالت با ساختار اسپینل مکعبی تشکیل شده است. اندازه‌ی متوسط دانه‌ها حدود ۱۰۰ نانومتر بود. محصولات تولیدی بدون استفاده از اکسیدان‌ها عملکرد تخریب مناسبی را نشان دادند. تخریب فوتوکاتالیستی نمونه‌ی تیتانیا پس از کامپوزیتی شدن افزایش یافت. شکاف انرژی پس از کامپوزیت شدن از ۳/۲ الکترون ولت به ۲/۹۱ الکترون ولت کاهش یافت. ثابت سرعت سینتیک به‌دست‌آمده در تخریب متیل اورانژ برای نمونه‌ی تیتانیای خالص و نمونه‌ی کامپوزیتی به‌ترتیب برابر ۰/۰۸۲ و ۰/۱۴۳ به دست آمد. آزمایش‌های اسکونج‌گذاری برای بررسی سازوکار تخریب فوتوکاتالیستی انجام شد که نشان داد رادیکال‌های سوپراکسید و هیدروکسیل به‌ترتیب فعال‌ترین گونه‌ها در فرایند تخریب فوتوکاتالیستی هستند.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.510098.1322>URL: https://www.jamt.ir/article_229110.html

۱-مقدمه

در یک منبع در نهایت منابع دیگر را تحت‌تأثیر قرار خواهد داد. آلودگی منابع آب زیرزمینی توسط موجودات بیماری‌زا، آلاینده‌های معدنی و آلی یکی از مهم‌ترین مسائل برای انسان خواهد بود. با توجه به طول عمر و پتانسیل بالای آزادسازی این آلودگی‌ها توسط کارخانه‌ها، حذف آن‌ها یکی از چالش‌برانگیزترین مشکلات جوامع بشری است (Pournajaf & Hassanzadeh-Tabrizi, 2018; Morin-Crini et al., 2022; Kumar et al. 2022). روش‌های شیمیایی و فیزیکی شامل انعقاد، جذب سطحی، جذب، رسوب و جداسازی غشایی همگی دچار

یکی از مهم‌ترین بحث‌های کنونی در زمینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب صنعتی یافتن مؤثرترین روش برای تبدیل آلاینده‌های فاضلاب صنعتی به گونه‌های کمتر مضر است. فاضلاب‌های صنعتی منابع مختلفی از گونه‌های آلاینده هستند که باید از جریان آب حذف شوند. این کار از طریق یکی از روش‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی یا فرایندهای ترکیبی انجام می‌شود. تخلیه‌ی این فاضلاب‌های تصفیه‌نشده بدون شک در محیط زیست ما و به‌ویژه منابع آب محدود تأثیر خواهد گذاشت. هرگونه آلودگی

عهده‌دار مکاتبات: سیدعلی حسن‌زاده تبریزی

نشانی: گروه مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

پیام‌نگار: hassanzadeh@iaua.ac.ir

نانویی TiO_2 و همچنین بازیابی مؤثر کاتالیست، استفاده از تیتانیای کامپوزیت‌شده با پودرهای مغناطیسی نانویی می‌تواند گزینه‌ای جایگزین در نظر گرفته شود ([Khasawneh & Palaniandy, 2021](#); [Mao et al., 2024](#)).

در میان انواع مواد ذرات مغناطیسی، در این تحقیق، نانوذرات فریت کبالت به‌عنوان کاتالیست انتخاب شد. این ذرات مغناطیسی دارای ناهمسانگردی قوی، وادارندگی بالا و مغناطیس خوب به همراه پایداری شیمیایی هستند ([Heydaryan & Almasi Kashi, 2023](#)). بنابراین، هدف از این تحقیق ایجاد یک نانوکامپوزیت اکسید تیتانیم-کبالت فریت کبالت است تا بتوان فعالیت کاتالیستی کامپوزیت را افزایش داد. ترکیب ساخته‌شده توسط روش‌های مختلف مشخصه‌یابی شد و سپس توانمندی آن برای تخریب رنگ متیل اورانژ ارزیابی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه و روش ساخت نمونه‌ها

مواد اولیه برای ساخت پودر فریت کبالت شامل نمک‌های نیترات کبالت و نیترات آهن و همچنین اسید سیتریک استفاده شد. واکنشگرهای شیمیایی برای سنتز TiO_2 مزوپور شامل تیتانیم تترا ایزوپروپوکسید، پلورنیک ۱۲۳ (Pluronic P123)، اتانول و آمونیاک بودند و بدون خالص‌سازی بیشتر استفاده شدند. متیل اورانژ به‌عنوان رنگ آزو استفاده شد. همچنین، بی‌کربنات پتاسیم (PB, Potassium bicarbonate)، اسید اسکوربیک (AS, Ascorbic acid)، پتاسیم پرسولفات (PP, Potassium persulfate) و اگزالات آمونیوم (AO, Ammonium oxalate) تهیه شدند تا گونه‌های واکنش‌دهنده، که مسئول تخریب نوری هستند، بیشتر بررسی شوند. نانوذرات نیکل فریت از طریق مسیر سل-ژل خود احتراقی سنتز شدند. ابتدا، نمک‌های نیترات کبالت و نیترات آهن و اسید سیتریک جداگانه در آب دوبار تقطیرشده حل شدند. پس از حل شدن کامل مواد اولیه، محلول به‌مدت یک ساعت به‌طور مداوم هم زده شد. سپس، pH محلول با افزودن تدریجی محلول آمونیاک روی ۷ تنظیم شد. مخلوط تحت هم زدن تا دمای ۸۰ درجه‌ی سلسیوس گرم شد تا آب کاملاً حذف شود و ژل غلیظی به دست آید. ژل قهوه‌ای در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سلسیوس نگه داشته شد تا واکنش احتراق آغاز شود. پودرهای سوخته‌ی مکانیکی در هاون آسیاب شدند تا توده‌های تجمع‌یافته حذف شوند و در دمای ۸۰۰ درجه‌ی

مشکلاتی از قبیل تشکیل زباله‌های جامد هستند که به فرایند دفع یا بازیافت اضافی نیاز دارند. از سوی دیگر، آلودگی‌های غیرقابل تجزیه‌ی زیستی فرایندهای تجزیه‌ی بیولوژیکی را محدود می‌کنند. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته شامل فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر رادیکال‌های آزاد، تابش UV، فوتوکاتالیستی، ازوناسیون، اکسیداسیون فنتون، اکسیداسیون الکتروشیمیایی، اکسیداسیون کاتالیزوری و غیره در حذف آلاینده‌ها از فاضلاب بسیار کارآمدتر هستند. در این تکنیک‌ها، رادیکال‌هایی تشکیل می‌شوند که در اکسیداسیون آلودگی‌های آلی در آب آلوده بسیار فعال هستند. از میان همه، تکنیک فوتوکاتالیسی به‌دلیل کارایی بالا، هزینه‌ی کم و پایداری کاتالیست‌ها در برابر منابع مختلف خوردگی مورد توجه ویژه قرار دارد ([Kordbacheh & Heidari, 2023](#); [Hairom et al., 2021](#)).

دی‌اکسید تیتانیم نیمه‌رسانایی حساس به نور است که می‌تواند به‌عنوان فوتوکاتالیست‌ها برای تجزیه‌ی ترکیبات آلی و آلودگی‌های سمی در فاضلاب و هوا استفاده شود. همچنین، خواص ضدباکتری برای این ماده گزارش شده است ([Abbasi et al., 2022](#)). تابش UV بر TiO_2 به تشکیل حفره‌های نوار ظرفیت و الکترون‌های نوار رسانایی منجر می‌شود که محیط اکسیدی و احیایی ایجاد می‌کند که در آن مواد سمی و آلودگی‌های آلی به مولکول‌های ساده مانند دی‌اکسید کربن و آب، که سمی نیستند و حتی به مراحل دفع یا بازیافت اضافی نیاز ندارند، تجزیه می‌شوند ([Peiris et al. 2021](#)). باوجود این، این ماده تنها توسط تابش پراورزی UV تحریک می‌شود که این موضوع به‌طور قابل توجهی کاربرد عملی آن را محدود می‌کند. تلاش‌های تحقیقاتی بر روی ادغام TiO_2 با مواد دیگر برای کنترل بازترکیبی الکترون-حفره و افزایش جذب نوری محدود تحت نور خورشید انجام شده است. علاوه‌براین، برای افزایش بیشتر فعالیت فوتوکاتالیستی این نیمه‌هادی، ذرات کوچک و نانویی ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا با افزایش سطح ویژه فعالیت فوتوکاتالیستی بهبود می‌یابد ([Purabgola et al., 2022](#)).

اما این مسئله باعث مشکلات جداسازی در بازیابی کاتالیست از آب تصفیه‌شده می‌شود. ثابت کردن نیمه‌هادی با استفاده از پشتیبان‌ها به کاهش شدید سطح ویژه منجر می‌شود. برای بهره‌مندی از سطح ویژه‌ی بالای ذرات فوتوکاتالیست

وات اندازه‌گیری شد. در هر مرحله، مقدار مشخصی از نمونه‌ها در ۵۰ میلی‌لیتر محلول متیل اورانژ غوطه‌ور و به‌طور مداوم هم زده شدند. پیش از انجام فرایند تخریب، محلول حاوی نمونه‌ها در محیط تاریک و تحت هم زدن برای یک ساعت نگهداری شد تا به تعادل جذب/دفع برسد. سپس، نمونه‌ها تحت تابش قرار گرفتند و مقادیر کوچکی از محلول رنگ به‌صورت دوره‌ای، برای تجزیه و تحلیل، سانتریفیوژ شدند. تعیین غلظت رنگ با اسپکتروسکوپی UV-Vis در $\lambda=506$ نانومتر انجام شد. نرخ تخریب (R) با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد (Behzadi et al., 2020).

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، C_0 غلظت متیل اورانژ در تعادل و C_t به غلظت متیل اورانژ در فاصله‌ی زمانی t اشاره دارد.

۳- نتایج و بحث

کامپوزیت تولیدی پس از فرایند کیناسیون برای بررسی فازهای توسط دستگاه پراش پرتو ایکس بررسی شد و نتایج نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است. قله‌های پراش در زوایای $25/35^\circ$ ، $37/88^\circ$ ، $37/78^\circ$ ، $38/50^\circ$ ، $48/08^\circ$ ، $53/92^\circ$ ، $55/12^\circ$ ، $68/59^\circ$ ، $70/36^\circ$ و $75/09^\circ$ به ترتیب به صفحات بلوری (۱۰۱)، (۱۰۳)، (۰۰۴)، (۱۱۲)، (۲۰۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۱۱۶)، (۲۲۰) و (۲۱۵) مربوط می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی تشکیل فاز اکسید تیتانیم با ساختار آاناتاز است. در این ساختار، آاناتاز دارای سیستم بلوری تتراگونال است (Liu & Fu, 2020). در این ساختار، اتم‌های تیتانیم در گوشه‌ها و مرکز سلول واحد در امتداد محور c قرار دارند. همچنین، اتم‌های اکسیژن در آرایش هشت‌وجهی احاطه شده‌اند و ساختاری اعوجاج‌یافته را ایجاد کرده‌اند. این آرایش منحصربه‌فرد سبب می‌شود که در آاناتاز فعالیت فوتوکاتالیستی بالا ایجاد شود. علاوه‌براین، قله‌ها در زوایای $18/28^\circ$ ، $30/08^\circ$ ، $35/4^\circ$ ، $37/05^\circ$ ، $43/05^\circ$ ، $56/9^\circ$ ، $62/41^\circ$ ، $70/50^\circ$ ، $77/8^\circ$ که به صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، (۶۲۰) و (۴۴۴) مربوط شوند و نشان‌دهنده‌ی تشکیل ساختار $CoFe_2O_4$ است. این ساختار مربوط به گروه اسپینل‌های مکعبی و با ساختار اسپینل معکوس است (Hou et al., 2010). در این ساختار، مکان‌های چهاروجهی شامل یون‌های آهن هستند. مکان‌های هشت‌وجهی

سلسیوس به مدت یک ساعت کلسینه شدند تا ساختارهای اسپینل فریت کبالت به دست آید. ذرات دی‌اکسید تیتانیم مزوپور با استفاده از روش سل-ژل و تترا ایزوپروپوکسید تیتانیم به‌عنوان پیش‌ماده‌ی تیتانیم و $P123$ به‌عنوان سورفکتانت سنتز شدند. به‌طور دقیق، $0/9$ گرم $P123$ در ۶۰ میلی‌لیتر اتانول مطلق تحت هم زدن حل شد. تیتانیم تترا ایزوپروپوکسید قطره‌قطره به محلول شفاف حاصل اضافه شد و به مدت ۳ ساعت هم زده شد تا پراکندگی یکنواخت حاصل شود. سپس، ۳۶ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر به تدریج به مخلوط اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت برای تشکیل ژل عملیات پیرسازی انجام شد. در همین حال، محلول آمونیاک به ژل اضافه شد تا pH به مقدار ۱۰ برسد. ژل حاصل به‌طور مکرر با آب دوبار تقطیر شسته شد و در خلأ در دمای ۸۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۵ ساعت خشک شد و سپس در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس و ۴۵۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۲ و ۳ ساعت به ترتیب کلسینه شد تا پودر دی‌اکسید تیتانیم مزوپور به دست آید. کامپوزیت‌های TiO_2 مزوپور و $CoFe_2O_4$ با اضافه کردن $CoFe_2O_4$ به دست‌آمده توسط فرایند سل-ژل خود احتراقی به ژل TiO_2 تحت هم زدن تهیه شدند. سپس، این ژل مانند مراحل ساخت TiO_2 خالص عملیات حرارتی شد و کامپوزیت با ۶۰ درصد وزنی تیتانیا و ۴۰ درصد وزنی فریت کبالت به دست آمد.

۲-۲- مشخصه‌یابی نمونه‌ها

از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی فازی کامپوزیت به دست‌آمده استفاده شد. برای این منظور، از دستگاه مدل فیلیپس X-pert استفاده شد. ریخت‌شناسی پودر و سطح قطعات کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی MIRA3 TESCAN بررسی شد. به منظور نمونه‌سازی برای تصویربرداری، قطعات و پودر با استفاده از طلا پوشش‌دهی شدند و سپس داخل محفظه‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. اندازه‌گیری‌های جذب توسط اسپکتروفتومتر (T70 UV/VIS Spectrometer, PG Instruments Ltd) انجام شد و اسپکتروسکوپی انعکاسی (DRS) با استفاده از اسپکتروفتومتر Avantes-Avaspec-2048 انجام شد.

۳-۲- اندازه‌گیری فعالیت فوتوکاتالیستی نمونه‌ها

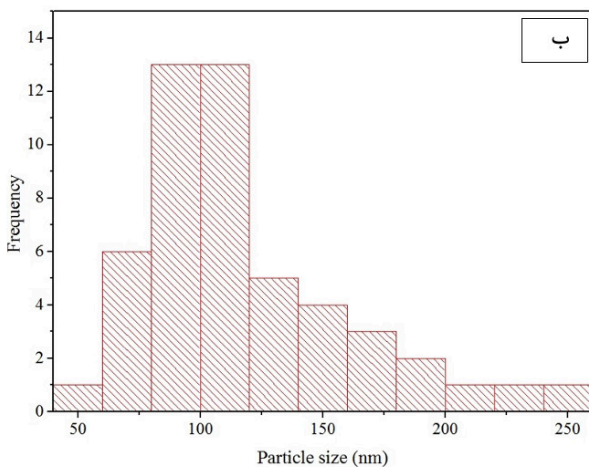
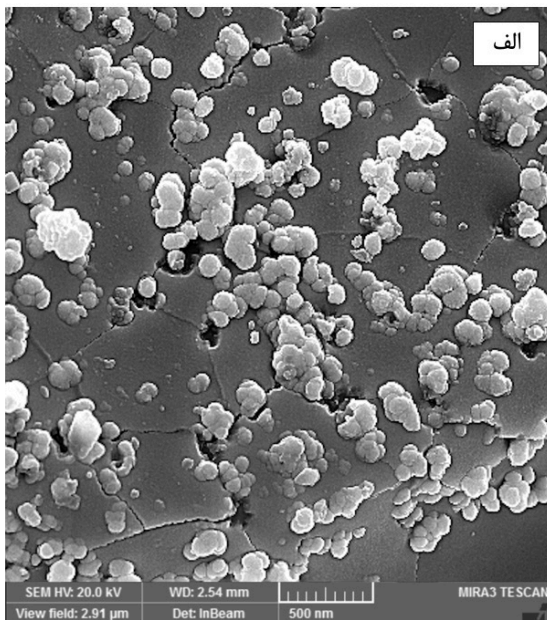
کارایی فوتوکاتالیست‌ها با استفاده از تخریب متیل اورانژ به‌عنوان مدل رنگ در راکتور ساخته‌شده‌ی مجهز به دو لامپ زنون ۳۵۰

تغییرات غیریکنواخت شبکه بستگی دارد، میکروکنش شناخته می‌شود (Dolabella et al., 2022).

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (۳)$$

کنش شبکه برای دو فاز آناتاز و فریت کبالت محاسبه شد. این کنش برای آناتاز برابر ۰/۰۰۴۳۴ و برای فاز فریت کبالت ۰/۰۱۳ است. کمتر بودن کنش داخلی فاز فریت کبالت می‌تواند به رهايش استرس شبکه به‌دلیل دیفوزیون اتم‌ها در دمای کلسیناسیون بالاتر مربوط به فاز فریت منجر شود.

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و همچنین هیستوگرام اندازه‌ی دانه‌ی نمونه‌ی تیتانیا-فریت کبالت را نشان می‌دهد.

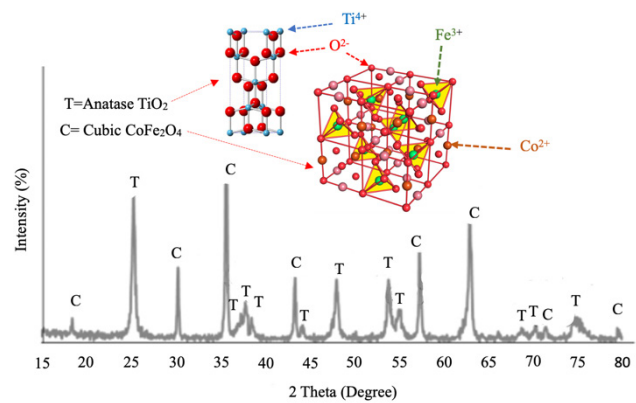


شکل ۲. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی و ب) هیستوگرام اندازه‌ی دانه‌های نمونه‌ی کامپوزیتی تیتانیا-فریت کبالت

شامل ترکیبی از یون‌های کبالت و باقی‌مانده‌ی یون‌های آهن هستند. این توزیع کاتیون‌ها در ساختار اسپینل معکوس باعث ایجاد خواص مغناطیسی در این ماده می‌شود. برای محاسبه‌ی اندازه‌ی بلورک‌ها در نمونه‌ها، با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس، از رابطه‌ی شرر ۲ استفاده شد (Elsayed et al., 2024).

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (۲)$$

در این رابطه، d اندازه‌ی بلور، λ طول موج، θ زاویه‌ی پراش و β پهنای پیک در نصف شدت بیشینه است.

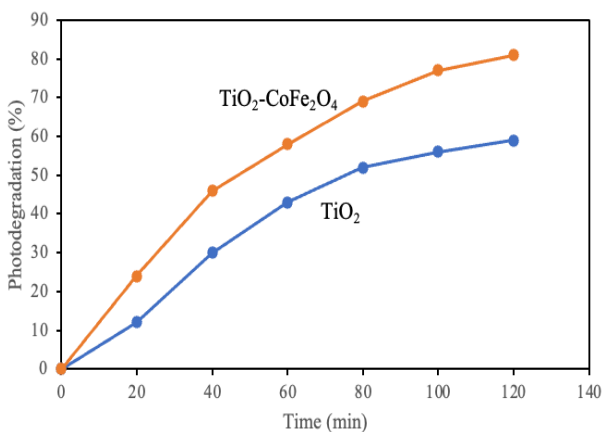


شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی کلسینه‌شده‌ی کامپوزیتی

از پیک حدود ۲۵ درجه برای فاز آناتاز و از پیک حدود ۳۵ درجه برای تعیین پهنای پیک در نصف شدت ماگزیمم فاز فریت کبالت استفاده شد. اندازه‌ی بلورک برای آناتاز حدود ۱۹ نانومتر و برای فریت کبالت حدود ۴۶ نانومتر محاسبه شد. همان‌طور که مشخص است، ذرات فریت ابعاد بزرگ‌تری از دانه‌های آناتاز دارند که این موضوع به روش ساخت و دمای عملیات حرارتی آن‌ها نسبت داده می‌شود. علت رشد بیشتر بلورک‌ها فریت کبالت به دمای بالاتر کلسیناسیون آن است؛ زیرا دمای کلسیناسیون بالاتر می‌تواند به فعال شدن سازوکارهای دیفوزیون اتمی شود (Waje et al., 2010). در واقع، نانوذرات تمایل دارند تا انرژی سطحی خود را با کاهش سطح کاهش دهند (Nanda et al., 2003). با افزایش بیشتر دمای کلسیناسیون، با فعال شدن سیستم‌های نفوذ این امکان بیشتر فراهم و در نتیجه رشد بیشتری ایجاد می‌شود.

کنش شبکه (ε) با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد. نزدیک به یک نقص مانند نابعی، شبکه‌ی بلوری به‌صورت الاستیک تحت کنش یا خمیدگی قرار می‌گیرد. قله‌های پراش، به‌دلیل چنین کنش‌های الاستیکی شبکه، پهن می‌شوند. این اثر، که به

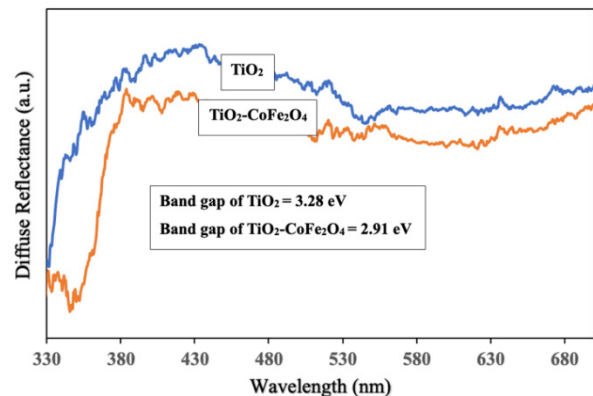
در این رابطه، طول موج (λ) همان لبه‌ی جذب نمونه‌ها است. c سرعت نور و h ثابت پلانک است. این مقدار برای نمونه‌ی تیتانیای خالص حدود $3/28$ الکترون ولت به دست آمد، درحالی‌که شکاف انرژی نمونه‌ی کامپوزیتی حدود $2/91$ الکترون ولت تخمین زده شد. این کاهش شکاف انرژی می‌تواند جذب بهتر نور در طول موج‌های بلندتر در محدوده‌ی نور مرئی را افزایش دهد که در نتیجه خواص فوتوکاتالیستی نمونه را بهبود خواهد داد. شکل ۴ کارایی فوتوکاتالیستی نمونه‌ها را در زمان مختلف نشان می‌دهد. از محلول 20 ppm متیل اورانژ و $0/1$ گرم از فوتوکاتالیست استفاده شد. با گذشت زمان متیل اورانژ تخریب می‌شود. با وجود این، تخریب بر روی نمونه‌ی کامپوزیتی بیشتر از نمونه‌ی تیتانیای خالص است. علت بالاتر بودن قدرت فوتوکاتالیستی نمونه‌ی کامپوزیتی را می‌توان به برهم‌کنش دو نیمه‌هادی نسبت داد که باعث می‌شود تا باز ترکیب الکترون-حفره کاهش یابد. به عبارت دیگر، با تابیدن نور به سیستم فوتوکاتالیستی الکترون‌ها از مدار والانس یک مدار هدایت منتقل و یک حفره در مدار والانس ایجاد می‌شود. این الکترون-حفره‌ی ایجاد شده وارد واکنش‌هایی با آب می‌شود و رادیکال‌های آزاد تولید می‌کند. رادیکال‌های آزاد تولید شده به رنگ آبی جذب شده بر روی سطح فوتوکاتالیست حمله می‌کنند و آن‌ها را به گونه‌های بی‌خطر مثل آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌کنند.



شکل ۴. منحنی تخریب نوری نمونه‌های تیتانیای خالص و تیتانیا-فریت کبالت

در تحقیقی، کامپوزیت تیتانیا-فریت کبالت با روش هیدروترمال سنتز شد و نتایج نشان داد که کامپوزیت تولیدی توانایی تخریب رنگ‌ها و آلاینده‌های مختلف را دارد (Ibrahim et al., 2022). نتایج این تحقیق نشان داد که ۴۵ درصد رنگ

از تصویر میکروسکوپی مشخص است که اکثر دانه‌ها تقریباً کروی شکل هستند. همچنین، مقداری پدیده‌ی آگلومره شدن ذرات در عکس مشاهده می‌شود که به علت سطح ویژه‌ی بالای ذرات نانو است، به طوری که این ذرات به یکدیگر می‌چسبند و آگلومره را تشکیل می‌دهند تا سطح انرژی خود را کاهش دهند (Pang et al., 2021). هیستوگرام اندازه‌ی دانه‌ها نشان می‌دهد که اکثر ذرات متوسط اندازه‌ی دانه‌ی ۱۰۰ نانومتر دارند. علاوه بر این، می‌توان توزیع نسبتاً نرمال اندازه‌ی ذرات را مشاهده کرد. توزیع نرمال تضمین می‌کند که ذرات دارای اندازه‌ی کنترل شده‌ای هستند که این ویژگی برای دستیابی به خواص و عملکرد یکنواخت در کاربردهای مختلف بسیار مهم است (Jensen et al., 2006). خواص نوری و به ویژه جذب فوتون اهمیت بالایی برای تعیین و کارایی رفتار فوتوکاتالیستی دارد. شکل ۳ طیف‌های UV-Vis نمونه‌های اکسید تیتانیم خالص و اکسید تیتانیم کامپوزیت شده با فریت کبالت را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. طیف UV-Vis نمونه‌ی تیتانیای خالص و نمونه‌ی تیتانیا-فریت کبالت

همان‌طور که مشخص است، اکسید تیتانیم دارای لبه‌ی جذب در محدوده‌ی نور ماوراءبنفش است که این کاربرد این ماده را به عنوان فوتوکاتالیست کاهش می‌دهد. با کامپوزیت کردن این ماده با فریت کبالت، لبه‌ی جذب به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود که ناشی از هم‌پوشانی شکاف انرژی یا همان باند گپ آن‌ها است. از داده‌های طیف‌سنجی UV-Vis همچنین می‌توان برای تعیین انرژی شکاف انرژی (Eg) کامپوزیت اکسید تیتانیم-فریت کبالت استفاده کرد. برای این منظور، از رابطه‌ی ۴ استفاده شد (Upadhyay et al., 2012).

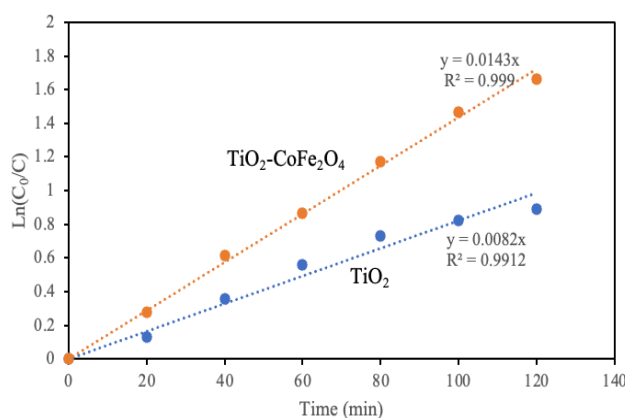
$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \text{ eV} \quad (4)$$

سازوکار تخریب فوتوکاتالیستی با استفاده از چهار نوع اسکونجر برای تعیین عوامل مؤثر تخریب یعنی گونه‌های OH^\bullet ، $h\nu^+$ ، e_{cb}^- و $O_2^{\bullet-}$ بررسی شد (شکل ۶). این اسکونجرها برای پیش‌بینی غیرمستقیم انتقال الکترون بین واکنش‌دهنده‌ها و کاتالیست استفاده می‌شوند. در این تحقیق، برای بررسی اینکه آیا رادیکال هیدروکسیل، رادیکال‌های سوپراکسید، حفره‌ها یا الکترون‌ها گونه‌های مسئول واکنش‌های تخریب متیل اورانژ بر روی کامپوزیت تیتانیا-فریت کبات هستند، عملیات فوتوکاتالیستی در حضور بی‌کربنات پتاسیم (اسکونجر رادیکال‌های هیدروکسیل)، اگزالات آمونیوم (اسکونجر حفره‌ها)، پرسولفات پتاسیم (اسکونجر الکترون‌ها) و اسید آسکوربیک (اسکونجر رادیکال‌های سوپراکسید) انجام شد. فعالیت فوتوکاتالیستی نمونه‌ی تیتانیا-فریت کبات قبل از استفاده از اسکونجرها ۸۱ درصد بود. استفاده از پرسولفات پتاسیم تأثیر چشمگیری در عملکرد نمونه‌ی ساخته‌شده نداشت که این امر نشان‌دهنده‌ی این است که گونه‌های فعال اصلی الکترون‌ها نبودند. پس از پرسولفات پتاسیم، اگزالات آمونیوم کمترین اثر را در تخریب دارد. این موضوع نشان می‌دهد که حفره‌ها نیز نقش مهمی در تخریب ندارند. در حضور بی‌کربنات پتاسیم فعالیت فوتوکاتالیستی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. همچنین، با استفاده از اسید آسکوربیک، نرخ تخریب متیل اورانژ به ۲۱ درصد کاهش یافت. بنابراین، مهم‌ترین گونه‌های فعال غالب برای تجزیه‌ی متیل اورانژ رادیکال‌های سوپراکسید هستند. بر اساس این نتایج، می‌توان گفت که الکترون و حفره ابتدا وارد واکنش‌های تشکیل رادیکال‌های سوپراکسید و هیدروکسیل می‌شوند و از این طریق متیل اورانژ را تخریب می‌کنند. تشکیل رادیکال‌های سوپراکسید ($O_2^{\bullet-}$) و هیدروکسیل (OH^\bullet) شامل چندین مرحله است. در ابتدا فتورانگیختگی رخ می‌دهد. وقتی کامپوزیت ساخته‌شده تحت تابش نور قرار می‌گیرد، الکترون‌ها در نوار ظرفیت تحریک‌شده و به نوار رسانایی منتقل می‌شوند و حفره‌های مثبت (h^+) در نوار ظرفیت باقی می‌مانند. سپس، گونه‌های اکسیژن واکنشی (ROS) تشکیل می‌شوند. الکترون‌های تحریک‌شده در نوار رسانایی می‌توانند با اکسیژن مولکول حل‌شده در آب واکنش و رادیکال‌های سوپراکسید را تشکیل دهند (واکنش ۶). حفره‌های مثبت در نوار ظرفیت نیز با

متیل اورانژ توسط این کامپوزیت تخریب می‌شود. در تحقیقی دیگر، نانوکامپوزیت تیتانیا-فریت کبات به روش سل-ژل و فناوری الکترواسپینینگ ساخته شد. نتایج مطالعه‌ی این تحقیق نشان داد که این کامپوزیت می‌تواند ۹۵ درصد رنگ متیلن بلور را تخریب کند (Li et al., 2012). محققان همچنین فریت کبات را بر روی تیتانیا پوشش دادند و این سیستم کامپوزیتی را به‌صورت هسته-پوسته تولید کردند (Mourão et al., 2010). نتایج نشان داد که، در تخریب رنگ‌دانه‌ی رودامین بی، سیستم تک‌جزئی بهتر از نمونه‌ی کامپوزیتی تخریب انجام می‌دهد. تولید این کامپوزیت به روش هم‌رسوبی نیز گزارش شده است (Sathishkumar et al., 2013). نتایج این تحقیق نشان داد تیتانیا-فریت کبات ساخته‌شده به روش هم‌رسوبی به‌خوبی و بهتر از سیستم تک‌جزئی توانسته رنگ‌دانه‌ی ری‌اکتیور رد ۱۲۰ را تخریب کند. از رابطه‌ی سینتیکی ۵ می‌توان ثابت سینتیکی تخریب آلاینده روی نمونه‌ها را محاسبه کرد (Zawadzki et al., 2018).

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = kt \quad (5)$$

در این رابطه، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ و C غلظت رنگ در زمان t و k ثابت سینتیکی واکنش است. با رسم نمودار و تعیین شیب خط می‌توان ثابت سینتیکی واکنش را تعیین کرد (شکل ۵). ثابت سرعت سینتیکی به‌دست‌آمده برای نمونه‌ی تیتانیای خالص و نمونه‌ی کامپوزیتی به‌ترتیب برابر 0.0082 و 0.0143 به دست آمد. همان‌طور که قبلاً بحث شد، فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتر این نمونه را می‌توان به شکاف باند کمتر و برهم‌کنش بین دو نیمه‌هادی نسبت داد.

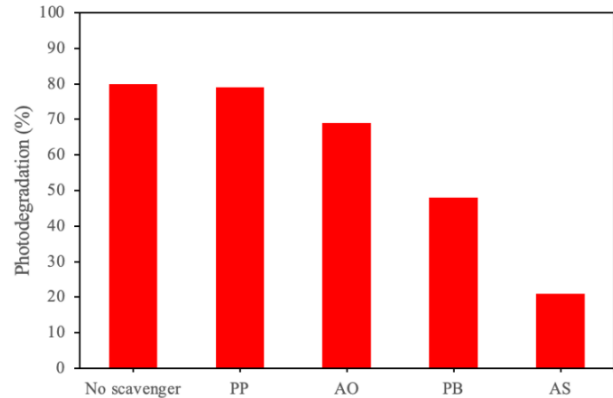


شکل ۵. منحنی سینتیکی تخریب نمونه‌های تیتانیای خالص و تیتانیا-فریت کبات

مراجع

- Behzadi, S., Nonahal, B., Royace, S. J., & Asadi, A. A. (2020). TiO₂/SiO₂/Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles Synthesis and Application in Methyl Orange UV Photocatalytic Removal. *Water Science and Technology*, 82(11), 2432–2445. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.509>
- Dolabella, S., Aurelio Borzi, A. D., & Neels, A. (2022). Lattice Strain and Defects Analysis in Nanostructured Semiconductor Materials and Devices by High-resolution X-ray Diffraction: Theoretical and Practical Aspects. *Small Methods*, 6(2), 2100932. <https://doi.org/10.1002/smt.202100932>
- Elsayed, Y. M. H., Yusoff, M. Z. M., Kamil, S. A., Idris, M. H. M., Mohamad, S. A. S., Yahya, M. S., & Yap, M. F. A. A. H. (2024). Characterizations of ZnO nanoparticles green synthesized using flaxseeds extract for biomedical applications. *Trends in Sciences*, 21(8), 7923–7923. <https://doi.org/10.48048/tis.2024.7923>
- Hairom, N. H. H., Soon, C. F., Mohamed, R. M. S. R., Morsin, M., Zainal, N., Nayan, N. et al. (2021). A review of nanotechnological applications to detect and control surface water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102032. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102032>
- Heydaryan, K., & Almasi Kashi, M. (2023). Characterization and Magnetic Properties of CoFe₂O₄ Nanoparticles Synthesized under Gas Atmosphere: Effect of Ferrofluid Concentration on Hyperthermia Properties. *Advanced Ceramics Progress*, 9(2), 45–52. <https://doi.org/10.30501/acp.2023.402618.1126>
- Abbasi, H., Ali Noori, R., & Doudi, M. (2022). Evaluation of the Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on MDR Bacteria In Vitro and Male Wistar Rats Liver In Vivo. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 11(1), 55–68. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2021.265267.1149>
- Hou, Y. H., Zhao, Y. J., Liu, Z. W., Yu, H. Y., Zhong, X. C., Qiu, W. Q., et al. (2010). Structural, electronic and magnetic properties of partially inverse spinel CoFe₂O₄: a first-principles study. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(44), 445003. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/44/445003>
- Ibrahim, I., Belessiotis, G. V., Elseman, A. M., Mohamed, M. M., Ren, Y., Salama, T. M., & Mohamed, M. B. I. (2022). Magnetic TiO₂/CoFe₂O₄ photocatalysts for degradation of organic dyes and pharmaceuticals without oxidants. *Nanomaterials*, 12(19), 3290. <https://doi.org/10.3390/nano12193290>
- Jensen, H., Pedersen, J. H., Jørgensen, J. E., Pedersen, J. S., Joensen, K. D., Iversen, S. B., & Søgaard, E. G. (2006). Determination of size distributions in nanosized powders by TEM, XRD, and SAXS. *Journal of Experimental Nanoscience*, 1(3), 355–373. <https://doi.org/10.1080/17458080600752482>
- Khasawneh, O. F. S., & Palaniandy, P. (2021). Removal of organic pollutants from water by Fe₂O₃/TiO₂ based photocatalytic degradation: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101230. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101230>
- Kordbacheh, F., & Heidari, G. (2023). Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, 2(2), 139–153. <https://doi.org/10.22128/mch.2023.684.1039>
- Kumar, R., Qureshi, M., Vishwakarma, D. K., Al-Ansari, N., Kuriqi, A., Elbeltagi, A., & Saraswat, A. (2022). A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100219>

مولکول‌های آب یا یون‌های هیدروکسید واکنش می‌دهند و رادیکال‌های هیدروکسیل را تشکیل می‌دهند (واکنش ۷).



شکل ۶. تخریب نوری متیل اورانژ نمونه‌ی تیتانیا-فریت کبالت در حضور پرسولفات پتاسیم (PP)، اگزالات آمونیوم (AO)، بی‌کربنات پتاسیم (PB) و اسید اسکوربیک (AS)

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، فوتوکاتالیست تیتانیا-فریت کبالت به روش سل-ژل ساخته شد. محصول تولیدی از نظر فازی و اندازه‌ی بلورک‌های آن بررسی شد. برای مشخصه‌یابی نمونه‌ها از آنالیزهای پراش پرتو ایکس میکروسکوپ الکترونی روبشی و UV-Vis استفاده شد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس نشان داد که دو آناتاز و فریت کبالت با موفقیت تشکیل شده‌اند. ابعاد بلورک‌های فریت کبالت بزرگ‌تر از فاز آناتاز بود، درحالی‌که کرنش شبکه‌ی فریت کبالت کمتر بود. نانوذرات تولیدی تقریباً کروی‌شکل بود و متوسط اندازه‌ی دانه‌های آن حدود ۱۰۰ نانومتر بود. شکاف انرژی تیتانیا با افزودن فریت کبالت کاهش یافت. نتایج فعالیت فوتوکاتالیستی نشان داد که کامپوزیت کردن تیتانیا با فریت کبالت سبب بهبود تخریب رنگ متیل اورانژ می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که رادیکال‌های سوپراکسید و هیدروکسیل گونه‌ای اصلی فعالیت فوتوکاتالیستی این سیستم کامپوزیتی هستند.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد در پیشبرد این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

13. Li, C. J., Wang, J. N., Wang, B., Gong, J. R., & Lin, Z. (2012). A novel magnetically separable TiO₂/CoFe₂O₄ nanofiber with high photocatalytic activity under UV-vis light. *Materials Research Bulletin*, 47(2), 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.11.012>
14. Liu, X., & Fu, J. (2020). Electronic and elastic properties of the tetragonal anatase TiO₂ structure from first principle calculation. *Optik*, 206, 164342. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164342>
15. Mao, T., Hu, Y., Zha, J., Cheng, Y., Fang, C., & Luo, X. (2024). Research progress of magnetic TiO₂ photocatalyst in wastewater treatment. *Composite Interfaces*, 31(11), 1291-1308. <https://doi.org/10.1080/09276440.2024.2338636>
16. Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaram, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., et al. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
17. Mourão, H. A., Malagutti, A. R., & Ribeiro, C. (2010). Synthesis of TiO₂-coated CoFe₂O₄ photocatalysts applied to the photodegradation of atrazine and rhodamine B in water. *Applied Catalysis A: General*, 382(2), 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.05.007>
18. Nanda, K. K., Maisels, A., Kruis, F. E., Fissan, H., & Stappert, S. (2003). Higher surface energy of free nanoparticles. *Physical review letters*, 91(10), 106102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.106102>
19. Pang, W., Li, Y., DeLuca, L. T., Liang, D., Qin, Z., Liu, X. et al. (2021). Effect of metal nanopowders on the performance of solid rocket propellants: a review. *Nanomaterials*, 11(10), 2749. <https://doi.org/10.3390/nano11102749>
20. Peiris, S., de Silva, H. B., Ranasinghe, K. N., Bandara, S. V., & Perera, I. R. (2021). Recent development and future prospects of TiO₂ photocatalysis. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(5), 738-769. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000465>
21. Pournajaf, R., & Hassanzadeh-Tabrizi, S. A. (2018). Polyacrylamide synthesis of nanostructured copper aluminate for photocatalytic application. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 5(4), 12-19. <https://sanad.iau.ir/en/Article/981429>
22. Purabgola, A., Mayilswamy, N., & Kandasubramanian, B. (2022). Graphene-based TiO₂ composites for photocatalysis & environmental remediation: synthesis and progress. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32305-32325. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18983-9>
23. Sathishkumar, P., Mangalaraja, R. V., Anandan, S., & Ashokkumar, M. (2013). CoFe₂O₄/TiO₂ nanocatalysts for the photocatalytic degradation of Reactive Red 120 in aqueous solutions in the presence and absence of electron acceptors. *Chemical engineering journal*, 220, 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.036>
24. Upadhyay, R. K., Sharma, M., Singh, D. K., Amritphale, S. S., & Chandra, N. (2012). Photo degradation of synthetic dyes using cadmium sulfide nanoparticles synthesized in the presence of different capping agents. *Separation and purification technology*, 88, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.040>
25. Waje, S. B., Hashim, M., Yusoff, W. D. W., & Abbas, Z. (2010). X-ray diffraction studies on crystallite size evolution of CoFe₂O₄ nanoparticles prepared using mechanical alloying and sintering. *Applied Surface Science*, 256(10), 3122-3127. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.11.084>
26. Zawadzki, P., Kudlek, E., & Dudziak, M. (2018). Kinetics of the photocatalytic decomposition of bisphenol a on modified photocatalysts. *Journal of Ecological Engineering*, 19(4). <https://doi.org/10.12911/22998993/89651>