



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۴، پیاپی ۴  
زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۷۸-۷۱

## "مقاله پژوهشی"

# بررسی کارایی نانوذرات نیکل اکسید در حذف اسید قرمز ۹۷ به عنوان یک آلاینده محیط زیست از محیط‌های آبی

فرانک صادقی\*

دانش آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: f\_sadeghi77@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱)

## چکیده

در این کار تحقیقی حذف اسید قرمز ۹۷ (AR97) به عنوان یک آلاینده مدل از صنایع نساجی با استفاده از نانوذرات NiO از محیط‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا اندازه و خلوص نانوذرات NiO به ترتیب با استفاده از تکنیک‌های TEM و XRD مشخص گردید. در ادامه کارایی نانوذرات NiO برای جذب سطحی و حذف AR97 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات NiO جاذب موثری برای حذف AR97 از محیط‌های آبی می‌باشند. بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی نظیر دما، pH، مقدار جاذب و غلظت اولیه آلاینده (AR97) در کارایی جذب سطحی نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بهینه بدست آمده از بررسی این پارامترها (دما، pH، مقدار جاذب و غلظت اولیه AR97) به ترتیب عبارتند از ۲۵ °C، ۲، ۴ g L<sup>-1</sup> و ۱۰ mg L<sup>-1</sup> می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** اسید قرمز ۹۷، جذب سطحی، نانوذرات NiO، پارامترهای عملیاتی

## مقدمه

آلودگی آب به معنای تغییر در مواد محلول یا معلق، دما و سایر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن است، به گونه‌ای که آب برای مصرف مورد نظر، زیان‌آور یا نامناسب شود. مواد آلوده‌کننده آب شامل هر نوع ماده یا عامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند که باعث آلودگی یا افزایش آن می‌شوند. این آلودگی‌ها بسیار متنوع بوده و از منابع مختلف و از طریق راه‌های گوناگون وارد آب می‌شوند و اثرات هر کدام بستگی به نوع و مقدار ماده آلوده‌کننده دارد. در سال‌های اخیر، رشد فزاینده فعالیت‌های صنعتی، مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به وجود آورده و آلاینده‌های خطرناکی را وارد اکوسیستم کرده است. ورود پساب‌های صنعتی به محیط، نیازمند تصفیه‌های اولیه است. از آنجا که این امر هزینه‌بر است، باید تلاش کرد تا با کاهش حجم پساب، غلظت آلاینده‌ها، یکنواخت‌سازی و خنثی‌سازی آن، این هزینه‌ها را کاهش داد. از جمله این آلاینده‌ها می‌توان به پساب کارخانجات تولید مواد رنگی و نساجی اشاره کرد (۳-۱). در طی سال‌های اخیر فرآیندهای زیادی برای حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: اسمز معکوس، مبادله یون، الکترولیز و جذب سطحی (۴). در مورد پساب صنایع رنگ و نساجی، بیش‌تر از روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های مختلف استفاده می‌شود. در این فرآیند، آلاینده‌ها در سطح جاذب جذب شده و با حذف جاذب از محیط، آلاینده نیز حذف می‌شود. مواد سمی، یون‌های خطرناک و رنگ‌های موجود در فاضلاب‌های صنعتی، ارتباط مستقیمی با سلامت محیط زیست و

انسان دارند. با استفاده از جاذب‌های جامد می‌توان سمیت پساب‌ها را کاهش داد و مواد آلی مضر را از فاضلاب‌های صنعتی حذف کرد. پساب‌های صنعت رنگ حاوی مقادیر بالایی از گونه‌های رنگی هستند که برای برخی از ارگانیزم‌ها سمی بوده و برای موجودات آبی مضر هستند. بنابراین، حذف رنگ‌ها از محیط‌های آبی ضروری است. در میان روش‌های مختلف تصفیه، جذب سطحی یکی از مؤثرترین و معتبرترین روش‌ها به شمار می‌رود. تمایل زیادی به استفاده از مواد ارزان‌قیمت و در دسترس برای تصفیه فاضلاب ایجاد شده است. مواد متنوعی مانند خاک‌های معدنی، تفاله‌های نیشکر، چوب و زغال سنگ به عنوان جایگزین کربن فعال به کار می‌روند. اگرچه ظرفیت جذبی این مواد نسبت به کربن فعال کم‌تر است، اما جاذب‌های جدید با ظرفیت بالا در حال توسعه هستند. از جمله جاذب‌های مورد استفاده می‌توان به کربن فعال، نانوذرات اکسیدی مانند تیتانیوم دی‌اکسید، نیکل اکسید، منیزیم اکسید و گرافن اکسید اشاره کرد (۱۳-۵).

در این تحقیق، هدف ما استفاده از نانوذرات تجاری نیکل اکسید (NiO) به عنوان جاذب در جذب سطحی اسید قرمز ۹۷ (AR97) و بررسی پارامترهای عملیاتی مؤثر در راندمان حذف است.

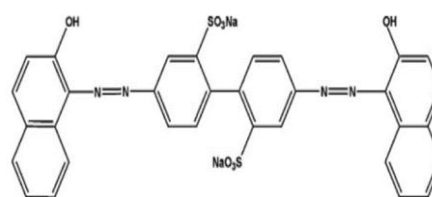
## بخش تجربی

## - مواد مورد استفاده

AR97 از شرکت Sigma-Aldrich و نانوذرات NiO از شرکت نانوطب تهیه شدند. به منظور بررسی ساختار و مشخصه‌یابی نانوذرات NiO از تکنیک‌های

<sup>1</sup> C.I. Acid Red 97

پراش اشعه X (XRD) و TEM استفاده شد. AR97 به عنوان رنگ در صنایع نساجی کاربرد دارد و ساختار شیمیایی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. طول موج جذبی حداکثر این ترکیب در ۴۹۸ نانومتر قرار دارد و از همین طول موج برای تعیین غلظت محلول‌های مجهول و رسم منحنی کالیبراسیون استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی AR97

دقیقه یک‌بار، حدود ۵ میلی‌لیتر از محلول نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشته شده بلافاصله در سانتریفیوژ (Hettich EBA 3S) قرار گرفتند و پس از جداسازی جاذب از آلاینده، جاذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج حداکثر (۴۹۸ نانومتر) قرائت شد. با استفاده از نمودار کالیبراسیون و جاذب بدست آمده، غلظت نمونه مورد نظر محاسبه شد. برای محاسبه درصد حذف نیز از معادله (۱) استفاده گردید.

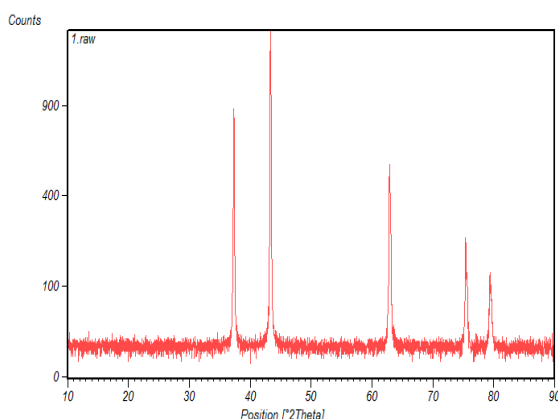
$$R\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$C_0$  و  $C_t$  به ترتیب غلظت اولیه و غلظت آلاینده در لحظه مورد نظر ( $\text{mg L}^{-1}$ ) می‌باشد.

## نتایج و بحث

### - مشخصه‌یابی نانوذرات NiO

به منظور تعیین ساختار کریستالی نانوذرات NiO از روش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شده است. طیف XRD مربوط به نانوذرات NiO در شکل (۲) نشان داده شده است.



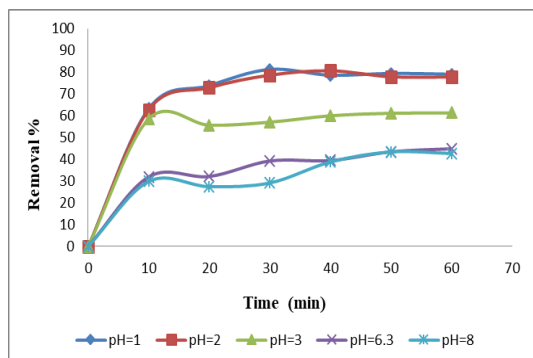
شکل (۲): طیف XRD نانوذرات NiO

با استناد به کارت استاندارد NiO (JCPDS Card No. 00-004-0835)، وجود پیک‌هایی در  $2\theta$  های

### - بررسی کارایی نانوذرات NiO در حذف AR97 از محیط‌های آبی

برای انجام آزمایش، ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول AR97 با غلظت‌های معین (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و  $60 \text{ mg L}^{-1}$ ) از محلول مادر تهیه شد و به عنوان محلول آلاینده در ارلن ۲۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. با استفاده از pH متر (WTW، مدل ۷۱۱۰)، pH محلول در مقدار مشخص (۲، ۳، ۶/۳، pH طبیعی محلول) و ۸ تنظیم گردید. سپس، میزان جذب اولیه این محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis (Shimadzu، مدل UV mini-1240) اندازه‌گیری شد. در ادامه، مقادیر مشخصی از نانوذرات NiO (۰/۵، ۱، ۲، ۳ و  $4 \text{ g L}^{-1}$ ) پس از توزین با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم (AND) به عنوان جاذب به محلول اضافه گردید. سپس محتویات ارلن در داخل شیکر حاوی حمام آب (Julabo، مدل SW-20C) با دمای ثابت (۲۵ و ۴۵ سانتی‌گراد) با سرعت ۱۴۰ rpm هم‌زده شد. هر ۱۰

پس از آن تغییر چشم‌گیری در میزان جذب مشاهده نمی‌شود.



شکل (۴): تأثیر pH بر فرآیند جذب سطحی AR97 توسط

نانوذرات NiO

شرایط آزمایش:  $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{NiO} = 4 \text{ g L}^{-1}$

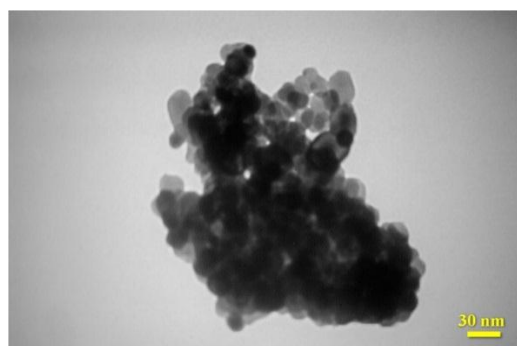
$T \approx 25^\circ\text{C}$

تأثیر مثبت pH های اسیدی بر راندومان فرایند را می‌توان با توجه به بار سطحی جاذب و مقدار  $\text{pH}_{\text{ZPC}}$  آن توضیح داد. در شرایطی که  $\text{pH} < \text{pH}_{\text{ZPC}}$  است، سطح جاذب در نتیجه جذب سطحی یون‌های پروتون بار مثبت پیدا می‌کند و در  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{ZPC}}$  در حضور یون‌های هیدروکساید سطح جاذب پروتون‌زدایی شده و سطح جاذب بار منفی خواهد داشت. با توجه به  $\text{pH}_{\text{ZPC}}$  نانوذرات NiO که حدود ۸ است (۱۴)، در pH های کم‌تر از این مقدار، سطح جاذب دارای بار مثبت است. از آنجا که AR97 دارای بار منفی است، در pH های پایین به دلیل جاذبه الکترواستاتیک بیش‌تر بین جاذب و ماده جذب شونده، میزان جذب سطحی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (۱۵).

- بررسی اثر مقدار جاذب

شکل (۵) نتایج بررسی اثر مقدار جاذب بر جذب سطحی AR97 توسط نانوذرات NiO را نشان می‌دهد.

$79/48^\circ$  و  $75/28^\circ$ ،  $62/88^\circ$ ،  $43/28^\circ$ ،  $37/28^\circ$  نشان دهنده کریستال‌های خالص مکعبی شکل NiO است. هرچه شدت این پیک‌ها بیشتر باشد، نشان می‌دهد که نانوذرات بلورینگی بیشتری دارند و هر چقدر پهنای پیک‌های حاصله بیشتر باشد، نشان‌دهنده ریزتر بودن نانوذرات است. تصویر TEM نانوذرات NiO نیز در شکل (۳) ارائه شده است. این تصویر وجود ذراتی در ابعاد نانو را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تصویر TEM نانوذرات NiO

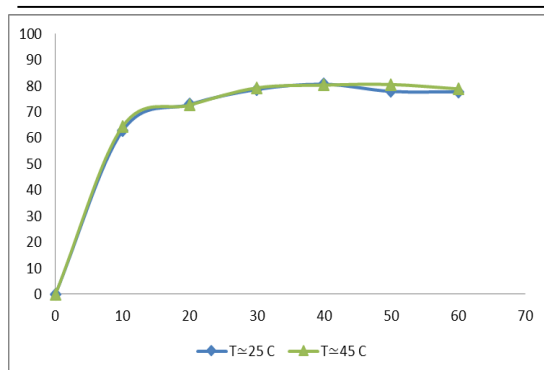
- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر راندومان جذب

سطحی AR97 بر روی نانوذرات NiO

- بررسی اثر pH

نتایج مربوط به بررسی اثر pH بر روند جذب سطحی AR97 بر روی نانوذرات NiO در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که pH مطلوب جهت حذف AR97 توسط نانوذرات NiO، pH های ۱ و ۲ می‌باشد. از آنجایی که اختلاف بین میزان جذب سطحی در pH های ۱ و ۲ ناچیز است، pH برابر با ۲ به عنوان pH بهینه انتخاب گردید. همچنین شکل (۴) به‌خوبی نشان می‌دهد که فرآیند جذب سطحی در حدود ۴۰ دقیقه به تعادل می‌رسد و

<sup>2</sup> Zero Point Charge



شکل (۶): تأثیر دما بر فرآیند جذب سطحی AR97 بر روی

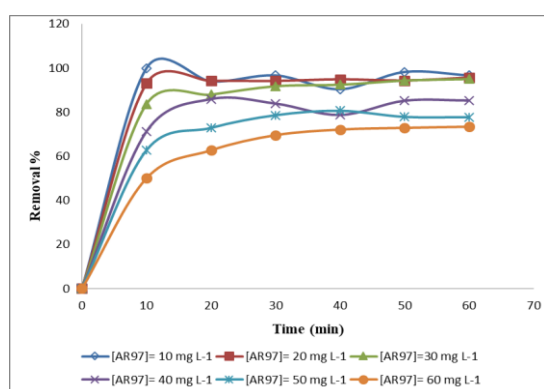
نانوذرات NiO

شرایط آزمایش:  $\text{pH} = 2$ ,  $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{NiO} = 4 \text{ g L}^{-1}$

NiO =

#### - بررسی اثر غلظت اولیه AR97

شکل (۷) اثر غلظت اولیه AR97 بر جذب سطحی آن توسط نانوذرات NiO را نشان می‌دهد.

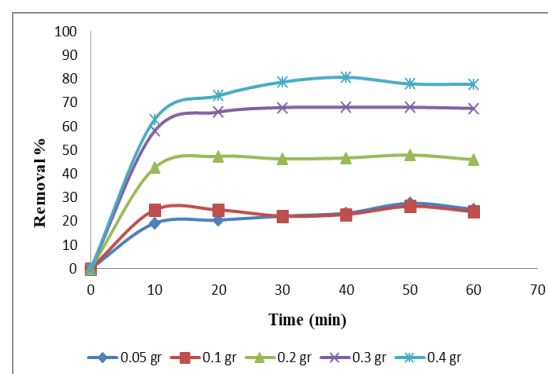


شکل (۷): تأثیر غلظت اولیه AR97 بر فرآیند جذب سطحی آن

بر روی نانوذرات NiO

شرایط آزمایش:  $\text{pH} = 2$ ,  $T \approx 25^\circ\text{C}$ ,  $\text{NiO} = 4 \text{ g L}^{-1}$

نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش غلظت اولیه آلاینده (AR97)، درصد حذف آن کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با افزایش غلظت اولیه آلاینده، جایگاه‌های فعال جاذب به سرعت اشغال شده و جاذب قادر به جذب سطحی بیش‌تر آلاینده نیست. به عبارت دیگر، اشباع شدن سطح جاذب و محدودیت



شکل (۸): تأثیر مقدار نانوذرات NiO به عنوان جاذب بر جذب

سطحی AR97

شرایط آزمایش:  $\text{pH} = 2$ ,  $[\text{AR97}]_0 \approx 50 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $T \approx 25^\circ\text{C}$

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب سطحی AR97 نیز افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به افزایش سطح در دسترس برای جذب سطحی آلاینده و وجود جایگاه‌های جذبی بیش‌تر برای غلظت معینی از ماده جذب‌شونده نسبت داد (۱۶). بر اساس این نتایج، مقدار جاذب بهینه ۰/۴ گرم ( $4 \text{ g L}^{-1}$ ) انتخاب شد، زیرا افزایش بیش‌تر از این مقدار، تأثیر چشم‌گیری بر حذف نداشته و از نظر اقتصادی استفاده از مقادیر بیش‌تر NiO به عنوان جاذب مقرون به صرفه نمی‌باشد.

#### - بررسی اثر دما

نتایج بررسی اثر دما بر جذب سطحی AR97 توسط نانوذرات NiO در دماهای ۲۵ و ۴۵ سانتی‌گراد در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دما به میزان ۲۰ درجه تأثیر قابل توجهی بر فرآیند جذب سطحی ندارد. بنابراین، دمای ۲۵ سانتی‌گراد برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب شد.

- [4] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 33. (in Persian)
- [5] Ghorbani-Khosrowshahi, S., Behnajady, M.A., 2016, Chromium (VI) adsorption from aqueous solution by prepared biochar from *Onopordom Heteracanthom*, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 1803.
- [6] Behnajady, M.A., Yavari, Sh., Modirshahla, N., 2014, Investigation on adsorption capacity of TiO<sub>2</sub>-P25 nanoparticles in the removal of a mono-azo dye from aqueous solution: A comprehensive isotherm analysis, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 20, 97.
- [7] Sattarfard, R., Behnajady, M.A., Eskandarloo, H., 2018, Hydrothermal synthesis of mesoporous TiO<sub>2</sub> nanotubes and their adsorption affinity toward Basic Violet 2, *Journal of Porous Materials*, 25, 359.
- [8] Behnajady, M.A., Bimeghdar, S., 2013, Synthesis of mesoporous NiO nanoparticles and their application in the adsorption of Cr(VI), *Chemical Engineering Journal*, 239, 105.
- [9] Mahmoudi, E., Behnajady, M.A., 2018, Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@NiO core-shell nanocomposite by the precipitation method and investigation of Cr(VI) adsorption efficiency, *Colloids and Surfaces A*, 538, 287.
- [10] Galvani, G.M., Zito, C.A., Perfecto, T.M., Malafatti, J.O.D., Paris, E.C., Volanti, D.P., 2022, Two-dimensional NiO nanosheets for efficient Congo Red adsorption removal, *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126591.
- [11] Tahir, H., Anwer, M., Khan, S., Saad, M., 2024, Enhancement of adsorption and photocatalytic activity of MgO nanoparticles for the treatment of textile dye using ultrasound assisted process by Response Surface Methodology, *Desalination and Water Treatment*, 319, 100429.
- [12] Feng, Y., Xie, T., Gong, W., Xu, J., Lu, Y., Gao, L., Xu, S., Liu, B., 2025, A novel calcination-quenching synthesis of octahedral MgO crystals with highly exposed (111) facets for enhanced adsorption performance,

تعداد جایگاه‌های فعال، مانع از جذب سطحی بیش‌تر می‌شود (۱۷).

### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که نانوذرات NiO می‌توانند به عنوان یک جاذب موثر برای حذف AR97 از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرند. بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مختلف نشان داد که غلظت اولیه AR97، مقدار جاذب و pH تاثیر قابل توجهی در راندمان فرایند دارند، در حالی که دما تاثیر چندانی ندارد. نتایج نشان داد که کاهش غلظت اولیه آلاینده، کاهش pH و افزایش مقدار جاذب باعث افزایش راندمان حذف AR97 می‌شود. همچنین، pH بهینه برای انجام این فرایند برابر با ۲ است.

### تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

### منابع

- [1] Wang, W., Huang, G., An, C., Zhao, S., Chen, X., Zhang, P., 2018, Adsorption of anionic azo dyes from aqueous solution on cationic gemini surfactant-modified flax shives: Synchrotron infrared, optimization and modeling studies, *Journal of Environmental Management*, 172, 1986.
- [2] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(1), 1. (in Persian)
- [3] Airemlou, L., 2024, Synthesis of ZnO/SnO<sub>2</sub> nanocomposite loaded with silver via liquid impregnation method and investigation of its photocatalytic activity in removing an environmental pollutant under visible light irradiation, *Environmental Pollution and Sustainable Urban Development*, 1(2), 85. (in Persian)

Separation and Purification Technology, 362, 131800.

[13] Gharbani, P., 2024, Investigating the efficiency of graphene oxide in the adsorption of 2-chlorophenol from aqueous solutions as an environmental pollutant, Environmental Pollution and Sustainable Urban Development, 1(3), 63. (in Persian)

[14] Sheela, T., Nayaka, Y.A., 2012, Kinetics and thermodynamics of cadmium and lead ions adsorption on NiO nanoparticles, Chemical Engineering Journal, 191, 123.

[15] Belessi, V., Romanos, G., Boukos, N., Lambropoulou, D., Trapalis, C., 2009, Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO<sub>2</sub> nanoparticles, Journal of Hazardous Materials, 170, 836.

[16] Rasoulifard, M.H., Haddadi Esfahlani, F., Mehrizadeh, H., Sehati, N., 2010, Removal of C.I. Basic Yellow 2 from aqueous solution by low-cost adsorbent: Hardened paste of Portland cement, Environmental Technology, 31, 277.

[17] Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P., Kushwaha, P., 2011, Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of Malachite Green onto chemically modified rice husk, Desalination, 265, 159.

**“Research article”**

**Investigation of the efficiency of nickel oxide nanoparticles in removing C.I. Acid Red 97 as an environmental pollutant from aqueous environments**

**Faranak Sadeghi\***

Department of Chemistry, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding author: f\_sadeghi77@yahoo.com

(Received: 16 February 2025, Accepted: 1 March 2025)

**Abstract**

This study investigates the removal of C.I. Acid Red 97 (AR97) as a model pollutant from textile industries using NiO nanoparticles in aqueous environments. The size and purity of NiO nanoparticles were initially determined using TEM and XRD techniques, respectively. The adsorption and removal efficiency of NiO nanoparticles for AR97 was then evaluated. The results indicated that NiO nanoparticles serve as effective adsorbent for AR97 removal. The effects of key operational parameters, including temperature, pH, amount of adsorbent, and initial pollutant concentration, on the adsorption efficiency of NiO nanoparticles were examined. The optimal conditions for AR97 removal were found to be a temperature of 25°C, pH of 2, adsorbent dosage of 4 g L<sup>-1</sup>, and an initial AR97 concentration of 10 mg L<sup>-1</sup>.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** C.I. Acid Red 97, Adsorption, NiO nanoparticles, Operational parameters