



## سنتز نانو جاذب مغناطیسی نیکل فریت به عنوان یک جاذب قابل بازیافت در حذف آلاینده آلی از محیط آبی

زهرایازی<sup>۱</sup>، سیده بهاره عظیمی<sup>۲\*</sup>، زهرا منصف خوشحساب<sup>۳</sup>، معصومه عسگری<sup>۳</sup>

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- گروه ارزیابی و مخاطرات محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

۳- دانشگاه پیام نور، گروه شیمی، قزوین، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	<b>مقدمه:</b> امروزه با توجه به کمبود آب و جایگاه ویژه آب در زندگی روزمره انسان‌ها، معضل آلودگی منابع آبی یک مشکل زیست محیطی بسیار مهم می‌باشد. آلودگی‌ها معمولاً ناشی از ورود آلاینده‌های مختلف به منابع آبی به‌خصوص رودخانه‌ها بوده که یک خطر جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده و خصوصاً آبزیان به شمار می‌رود. آلاینده‌های آلی به دلیل کاربرد زیادی که در صنایع مختلف دارند و همچنین به دلیل حلالیت بالای برخی از آن‌ها در آب، جزء آلاینده‌های معمول آب بوده که عمدتاً سمی نیز می‌باشند. برای حذف ترکیبات آلی از آب، روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر یک مزایا و معایبی دارد. یکی از فنون کارآمد برای تصفیه پساب و حذف آلاینده‌ها، فرایند جذب سطحی است که به دلیل سهولت اجرا و هم چنین تنوع جاذب‌ها و هزینه نسبی پایین، به طور ویژه جهت کاربردهای مقیاس وسیع، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های استفاده از فرآیند جذب سطحی جداسازی جاذب در انتهای فرآیند می‌باشد که امروزه استفاده از جاذب‌های مغناطیسی راه حلی برای این چالش است. در تحقیق حاضر جداسازی و حذف رنگینه کریستال بنفش از محیط‌های آبی با استفاده از نانو ذرات مغناطیسی نیکل فریت ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) به عنوان جاذب مورد بررسی قرار گرفته است.
تاریخچه مقاله:	<b>مواد و روش:</b> در این کار رنگ کریستال بنفش به عنوان یک آلاینده معمول رنگی استفاده شده و مواد شیمیایی، آمونیاک، نیترات نیکل، نیترات آهن برای سنتز نانو فریت نیکل استفاده شده است. به منظور مشخصه‌یابی نانوجاذب فریت نیکل از میکروسکوپ الکترونی عبوری، طیف سنج پراش اشعه ایکس، دستگاه تجزیه حرارتی و طیف سنجی مادون قرمز و برای اندازه‌گیری غلظت نمونه‌ها از روش اسپکتروفوتومتر UV-Vis استفاده شده است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر pH، غلظت اولیه رنگ، مقدار وزن جاذب و زمان تماس جاذب با محلول کریستال بنفش بر میزان جذب رنگ آزمایش شده است. نانوجاذب مغناطیسی مربوطه به روش هم‌رسوبی سنتز شده و به منظور استفاده در فرایند مقدار مشخصی از آن را به محلول اضافه کرده و بعد از اتمام فرایند، نمونه برداری شده و جاذب مورد استفاده به راحتی با استفاده از آهنربا از محیط آبی جداسازی می‌شود.
دریافت:	
۱۴۰۴/۰۲/۲۲	
پذیرش:	
۱۴۰۴/۰۵/۰۹	
کلیمات کلیدی:	<b>نتایج:</b> نتایج شناسایی جاذب نشان داد که جاذب سنتز شده ذرات نیکل فریت با خاصیت مغناطیسی بوده و ابعاد نانو ذرات سنتز شده بر اساس نتایج میکروسکوپ الکترونی عبوری و محاسبات دبای شرر حاصل از نتایج پراش اشعه ایکس، حدود ۱۵ نانومتر می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که برای غلظت اولیه رنگ به میزان $10 \text{ mg/l}$ در $\text{pH}=8$ و مقدار جاذب $0.5$ گرم در $50$ میلی‌لیتر در زمان $90$ دقیقه بازده حذف رنگ حدود
نانو نیکل فریت، جاذب مغناطیسی	

۹۵ درصد به دست می‌آید.

بحث: ابعاد ذرات سنتز شده در محدوده نانومتری بوده که خاصیت جذب بالایی را برای جاذب محیا می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده، درصد حذف رنگ کریستال بنفش توسط جاذب مغناطیسی نیکل فریت به pH آب حساس بوده و حذف رنگ در محیط قلیایی بهتر از اسیدی است. نیکل فریت، جاذب مناسبی است که میتوان از آن برای حذف رنگ کریستال بنفش از آب‌های آلوده استفاده کرد. از مزایای این روش، مغناطیسی بودن جاذب نیکل فریت است چرا که مغناطیسی بودن باعث می‌شود به آسانی جاذب را از محیط آبی توسط آهنربا جداسازی کرد.

## مقدمه

یکی از معضلات زیست محیطی بسیار مهم آلودگی منابع آب بوده که به طرق مختلف رخ می‌دهد. آلودگی‌ها معمولاً ناشی از ورود آلاینده‌های مختلف به منابع آبی بخصوص رودخانه‌ها بوده که یک خطر جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده و خصوصاً آبزیان به شمار می‌رود. آلاینده‌های آلی به دلیل کاربرد زیادی که در صنایع مختلف دارند و همچنین به دلیل حلالیت بالای برخی از آن‌ها در آب، این ترکیبات جزء آلاینده‌های معمول آب بوده که عمدتاً سمی نیز می‌باشند (Rahmani et al., 2020; Zarei et al., 2017). برای حذف ترکیبات آلی از آب، روش‌های مختلفی از جمله اکسایش فوتوشیمیایی، اکسایش شیمیایی، انعقاد شیمیایی، اکسایش الکتروشیمیایی، روش‌های بیولوژیک و جذب سطحی استفاده می‌شود (Hao et al., 2024; Khakyzadeh et al., 2021; Zhou et al., 2024). روش‌های بیولوژیک ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش جهت حذف آلاینده آلی می‌باشد. امروزه فرآیندهای بیولوژیک به دلیل سهولت بهره‌برداری و دوست‌دار محیط زیست بودن، مورد توجه قرار گرفته‌اند. اما سیستم‌های متداول تصفیه بیولوژیک به دلیل سمیت زیاد برخی از آلاینده‌های آلی برای میکروارگانیسم‌های موجود در این فرآیند و پایداری شیمیایی این آلاینده‌ها برای حذف برخی از ترکیبات آلی از جمله رنگ‌ها رضایت بخش نیستند (Kusumlata et al., 2024; Tharamrajah et al., 2024). روش‌های شیمیایی نیز علی‌رغم همه مزایایی که دارند، مشکلاتی مانند هزینه مواد اولیه مصرفی و تولید آلاینده ثانویه محدودیت دارند (Dehghani et al., 2008). فرآیندهای اکسایش شیمیایی که به عنوان یک روش قدرتمند در تخریب و معدنی‌سازی مواد آلی استفاده می‌شوند، اغلب انرژی زیادی مصرف کرده و پیر هزینه می‌باشند (Özcan et al., 2024).

(al., 2009; Nabizadeh Chianeh et al., 2017).

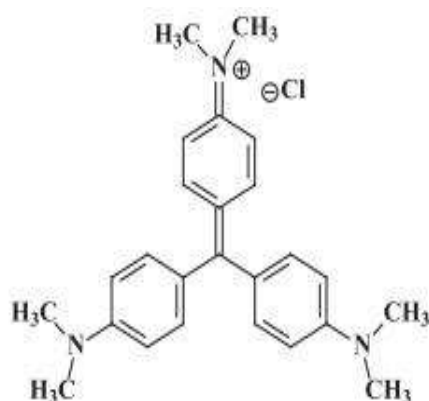
روش‌های فیزیکی حذف آلاینده‌ها شامل فرایندهای فیلتراسیون، اسمز معکوس و همچنین تکنیک‌های جذب سطحی می‌باشد. در بین روش‌های فیزیکی حذف آلاینده‌های آلی از محیط آبی، روش جذب سطحی نسبت به روش‌های دیگر بیشتر مورد توجه است. به طور کلی جذب سطحی فرایند تجمع مواد در فصل مشترک بین دو فاز است. به عبارت دیگر پدیده جذب سطحی می‌تواند به عنوان افزایش غلظت یک جزء خاص بین دو فاز تعریف شود (Azimi, 2024; Bazrafshan et al., 2014; Khakyzadeh et al., 2021). یکی از فنون کارآمد برای تصفیه پساب و حذف آلاینده‌ها، فرایند جذب سطحی است که به دلیل سهولت اجرا و هم‌چنین تنوع جاذب‌ها و هزینه نسبی پایین، به طور ویژه جهت کاربردهای مقیاس وسیع، مورد استقبال پژوهشگران محیط زیست قرار گرفته است (Satyam & Patra, 2024; Wang et al., 2024). در بین جاذب‌های مختلف، نانوجاذب‌ها به دلیل برخورداری از خواص ویژه‌ای که سبب کارایی بیشتر آن‌ها نسبت به مواد معمولی می‌شود، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند (Perumal et al., 2024). در مقایسه با جاذب‌های معمول، نانوذرات به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت سطح به حجم بالایی دارند که ظرفیت جذب و راندمان خیلی بیشتری را فراهم می‌کنند. یکی دیگر از مزایای نانوذرات این است که سطح آن‌ها می‌تواند به سادگی اصلاح شود و امکان جذب گزینشی را فراهم می‌کند. از طرفی استفاده از نانوجاذب‌ها به دلیل مشکل در جداسازی آن‌ها، کاربرد آن‌ها را در مقیاس وسیع هزینه بر و محدود می‌نماید. یکی از روش‌های کارآمد که امروزه برای حل این مشکل مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از نانوجاذب‌های مغناطیسی می‌باشد. نانو جاذب‌های مغناطیسی بعد از انجام فرایند به راحتی با استفاده از یک

در کار حاضر، یک مطالعه پایه‌ای و کاربردی برای بررسی قابلیت نانو جاذب نیکل فریت برای جذب رنگ کریستال بنفش از محلول‌های آبی بررسی شده است. به این منظور نانوجاذب نیکل فریت سنتز و مشخصه یابی شده و تأثیر پارامترهای مختلف نظیر pH، غلظت اولیه رنگ، مقدار جاذب و زمان تماس جاذب با محلول کریستال بنفش، بر میزان جذب رنگ بررسی و بهینه‌سازی شده است.

## مواد و روش‌ها

در این کار رنگ کریستال بنفش به فرمول شیمیایی  $C_{25}N_3H_{30}Cl$  و وزن مولکولی (g/mol)  $407/98$  به عنوان یک آلاینده معمول رنگی مورد استفاده قرار گرفته که ساختار شیمیایی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. کریستال بنفش نه تنها به عنوان رنگ نساجی مورد استفاده قرار می‌گیرد بلکه از آن برای رنگ آمیزی کاغذ و همچنین به عنوان جزئی از جوهرهای آبی و سیاه برای چاپ و پرینترهای جوهر افشان استفاده می‌شود. همچنین برای رنگ آمیزی محصولات متنوعی مانند کودها، ضد یخ‌ها، مواد شوینده و چرم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد شیمیایی آمونیاک، نیترات نیکل، نیترات آهن برای سنتز نانو فریت نیکل استفاده شده است. برای محلول‌سازی، آب مقطر دوبار تقطیر مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور مشخصه‌یابی نانوجاذب فریت نیکل از میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM, PHILIPS XL30 SCANNING، طیف سنج پراش اشعه ایکس، PHILIPS TG-DTA, Perkin، دستگاه تجزیه حرارتی FT-IR, 4200, Elmer Pyris و طیف سنجی مادون قرمز، 4200, Jasco استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری غلظت نمونه‌ها، دستگاه اسپکتروفوتومتر CARY UV-Vis (Conc) 50 و برای اندازه‌گیری pH محلول از pH متر METTLER TOLEDO و برای توزین نمونه‌ها از ترازوی METTLER TOLEDO (AB204-S) با دقت چهار رقم اعشار استفاده شده است.

میدان خارجی از محیط جدا می‌شوند (Shen *et al.*, 2023). فریت‌ها با فرمول عمومی  $MFe_2O_4$  (M عنصر فلزی دوظرفیتی مانند  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  می‌باشد) دسته‌ای از مواد مغناطیسی، با ساختار اسپینلی هستند که خواص بارزی چون مقاومت الکتریکی بسیار بالا و تراوایی بالا، این مواد را کاندیدای مناسبی جهت استفاده در کاربردهای صنعتی قرار داده است (Jacob & Maensiri *et al.*, 2007; Khadar, 2010). بررسی منابع نشان می‌دهد که نیکل فریت به عنوان یک جاذب مناسب برای حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. حذف رنگ متیل اورانژ از محیط‌های آبی با استفاده از نیکل فریت و عوامل تأثیرگذار بر آن توسط یک گروه تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش نبعیت مکانیسم جذب شیمیایی از همدمای لانگمویر و سینتیک جذب از مدل شبه مرتبه دوم گزارش شده است (Sobhanardakani & Zandipak, 2016). در کار دیگری حذف رنگ‌های بازی از محیط‌های آبی با استفاده از نانو ذرات مغناطیسی نیکل فریت مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات نشان داد که منحنی همدمای جذب سطحی رنگ‌زا روی نانو ذره از منحنی همدمای لانگمویر و سینتیک جذب آن از سینتیک مرتبه دوم تبعیت میکند (Mahmoodi, 2013). در مورد دیگری نانوذرات نیکل فریت اصلاح شده برای حذف رنگ مورد استفاده قرار گرفته است. نانوذرات اصلاح‌شده ظرفیت جذب معادل  $384/62$  میلی‌گرم بر گرم برای رنگ کریستال ویوله نشان داد. نتایج نشان داد که فرآیند جذب، گرمازا بوده و از ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیکی شبه درجه دوم پیروی می‌کند. شرایط بهینه برای حداکثر حذف رنگ در  $pH=10$ ،  $50$  دقیقه و دمای  $298$  کلوین حاصل شد. علاوه بر این، جاذب‌های سنتز شده، بازیابی و قابلیت استفاده مجدد عالی را در طول پنج چرخه جذب-واجذب با حداقل افت راندمان نشان دادند (Al-Kadhi *et al.*, 2024).



شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگ کریستال بنفش

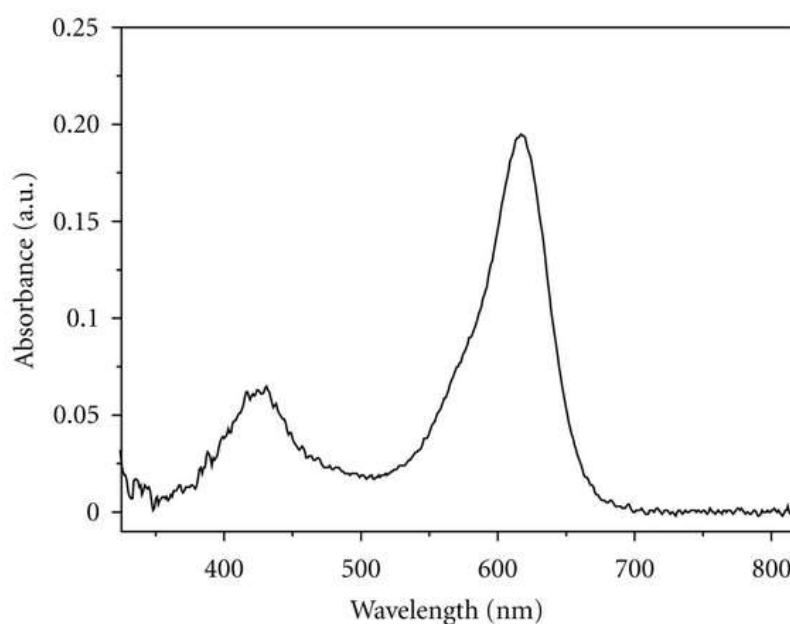
$$q = \frac{C_0 - C}{m} \times V \quad (2)$$

در این معادلات  $C_0$  غلظت اولیه رنگ،  $C$  غلظت رنگ باقیمانده در محلول (میلی گرم بر لیتر)،  $q$  مقدار ماده جذب شده بر واحد جرم جذب،  $V$  حجم محلول (لیتر) و  $m$  جرم جذب (گرم) می‌باشند.

برای تعیین بیشینه طول موج جذبی ( $\lambda_{max}$ )، جذب محلول رنگ کریستال بنفش در محدوده UV-Vis گرفته شد که طیف مربوطه در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که طول موج بیشینه برای این رنگ، ۵۹۴ نانومتر می‌باشد.

برای بررسی قابلیت جذب نانو جاذب نیکل فریت برای حذف رنگ کریستال بنفش، ۵۰ میلی لیتر از رنگ کریستال بنفش با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر با مقدار مشخصی از جاذب مجاور گردید و در مدت زمان معینی با همزن مکانیکی هم زده شد. پس از جدا کردن جاذب از محلول با آهن ربا، طیف ماوراء بنفش- مرئی محلول قبل و بعد از مجاورت با جاذب ثبت شد و با کمک نمودار کالیبراسیون، غلظت رنگ در محلول قبل و بعد از مجاورت با جاذب محاسبه شد سپس درصد جذب ( $R\%$ ) و ظرفیت جذب ( $q$ ) با استفاده از معادلات زیر تعیین شد.

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



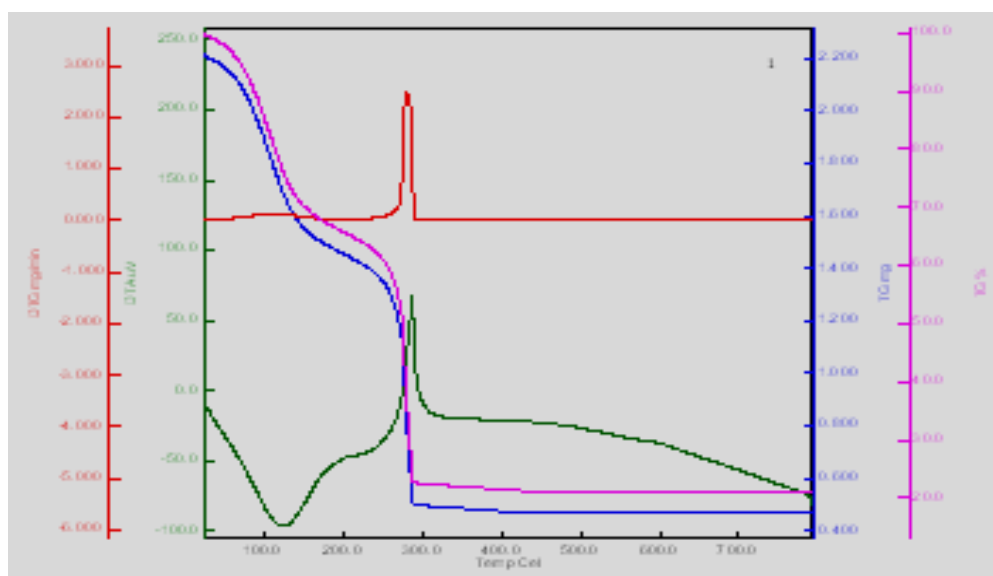
شکل ۲- طیف جذبی رنگ کریستال بنفش

آمده از فرایند هم رسوبی با استفاده از روش‌های تجزیه حرارتی گرما وزن‌سنجی (TGA) و تجزیه حرارتی تفاضلی (DTA) مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بدست آمده در نمودارهای شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار TGA مشاهده می‌شود در اثر افزایش دما تا ۳۰۰ سانتی‌گراد جرم نمونه کاهش یافته و پس از آن تغییری در جرم رسوب دیده نمی‌شود، بنابر این دمای ۳۰۰ سانتی‌گراد برای کلسینه کردن جاذب انتخاب شد. همچنین در نمودار DTA دو پیک مشاهده می‌شود که یکی مینیمم و دیگری ماکزیمم است. پیک مینیمم به علت یک فرایند گرماگیر است و پیک ماکزیمم نتیجه فرایندهای گرمادهی است. با مقایسه نمودارهای TGA و DTG می‌توان، علت کاهش جرم اولی را مربوط به تبخیر آب‌های جذب شده دانست و این با توجه به ظهور یک پیک مینیمم در نمودار DTA که بیانگر یک فرایند گرماگیر است اثبات می‌شود. همچنین کاهش جرم در حوالی ۳۰۰ سانتی‌گراد که با یک پیک گرمازا در نمودار DTA همراه است را می‌توان به تشکیل بلورهای نیکل فریت نسبت داد که احتمالاً همراه با تجزیه حرارتی نیترا‌تها می‌باشد. با توجه به این که طیف XRD تشکیل محصول خالص را نشان می‌دهد و تشکیل بلور نیکل فریت خالص، مستلزم از بین رفتن نیترا‌تهایی است که به عنوان ماده اولیه در سنتز نیکل فریت استفاده شده‌اند.

**سنتز نانو ذرات مغناطیسی  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ :** در این کار نیکل فریت مغناطیسی توسط روش هم رسوبی سنتز شد. بدین صورت که مقدار ۱۴/۴ گرم از نمک  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  وزن شده و درون ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد. سپس در ارلن دیگری مقدار ۲۶/۹ گرم از نمک  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ریخته و مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد. محتوای هر دو ظرف توسط همزن مغناطیسی در دمای ۵۰ سانتی‌گراد حل شدند، سپس محتویات دو ارلن با همدیگر مخلوط شده روی حمام آب قرار گرفت و تا دمای ۵۰-۶۰ سانتی‌گراد به مدت یک ساعت هم زده شد. سپس محلولی حاوی (۲۰ میلی لیتر آمونیاک و ۴۰ میلی لیتر آب) به صورت قطره قطره به محلول قبلی اضافه شد، بعد از رساندن pH محلول به بالای ۱۰ محلول یک ساعت هم خورده و رسوب حاصل را جداسازی کرده و چندین بار توسط آب مقطر شسته شد تا pH به محدوده ۷ رسید. سپس رسوب بدست آمده درون آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و در ادامه به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۳۰۰ درجه کلسینه شد (Sivakumar *et al.*, 2013).

## نتایج

**شناسایی نانوذرات نیکل فریت سنتز شده:** به منظور تعیین دمای مناسب برای کلسینه کردن، رسوب بدست



شکل ۳- نمودار TGA (-Blue , -Pink )/DTA(-Green)/DTG(-Red)

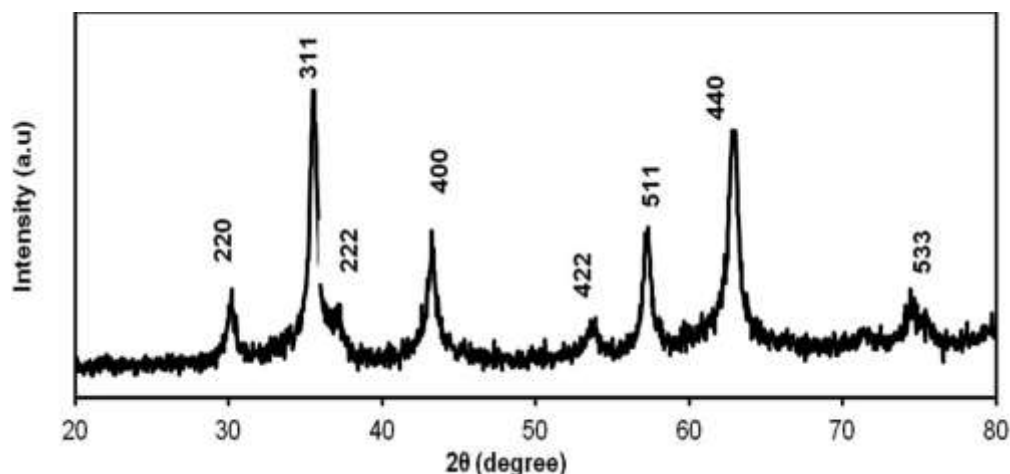
پراش بدست آمده پیک های ظاهر شده در  $2\theta$  های ۳۰/۱۲، ۳۷/۱۲، ۴۳/۲۵، ۴۵/۳۱، ۵۳/۶۸، ۵۷/۲۵، ۶۲/۸۴ و ۷۴/۴۲ که کاملاً منطبق با طیف استاندارد نیکل فریت است (کارت استاندارد شماره: ۱۰-۰۳۲۵) تشکیل  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  خالص با ساختار کریستالی را به خوبی تایید می نماید. همچنین با توجه به فرمول دبای- شرر و داده های XRD، میانگین اندازه ذرات ۱۵ نانومتر است.

شکل ۵ تصویر TEM نانوذره  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  سنتز شده، بعد از کلسینه شدن در دمای ۳۰۰ سانتی گراد به مدت ۲ ساعت را نشان می دهد. در این تصویر، اندازه ذرات در محدوده ۱۰-۱۵ nm است که با نتایج بدست آمده از XRD به خوبی همخوانی دارد.

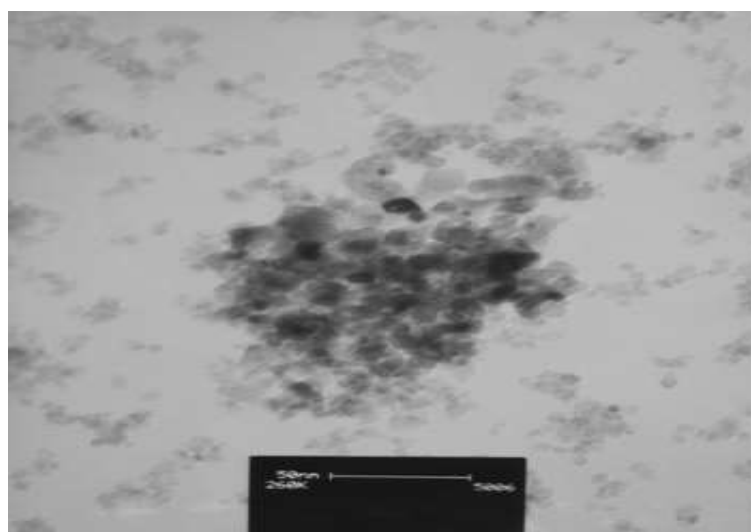
به منظور تعیین ساختار و اندازه ذرات، طیف XRD از نمونه تهیه و بر اساس رابطه دبای- شرر (معادله ۳)، با اندازه گیری عرض پیکها در نیمه ارتفاع (B)، اندازه ذرات به کمک طیف XRD تعیین شد.

$$B = 0.9\lambda / L \cos \theta \quad (3)$$

در این معادله، B: پهنای پیک در نصف ارتفاع، L: طول همگرایی،  $\lambda$ : طول موج تابش X و  $\theta$ : زاویه پراش است. با قرار دادن مقادیر  $\lambda$ ،  $\theta$  و B در معادله دبای- شرر، ابتدا مقدار L محاسبه و سپس با استفاده از رابطه  $L=4/3D$ ، اندازه ذرات (D) تعیین شد. شکل ۴ الگوی XRD نانوذرات  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  تهیه شده به روش همرسوبی را نشان می دهد. با توجه به الگوی



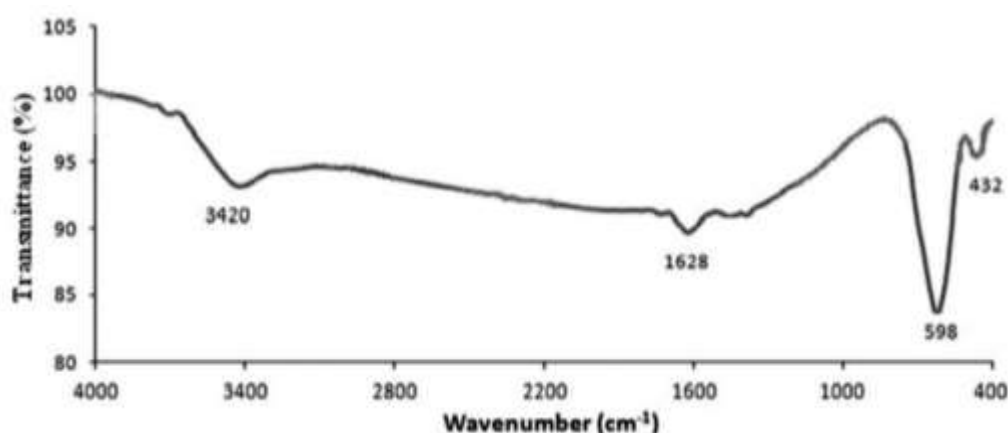
شکل ۴- الگوی پراش پرتو X نمونه  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  تهیه شده به روش همرسوبی



شکل ۵- تصویر TEM از نمونه  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  تهیه شده به روش همرسوبی

ارتعاشات اکسیژن - آهن در مکان‌های چهار وجهی و پیک  $432 \text{ cm}^{-1}$  با ارتعاشات اکسیژن - نیکل در مکان‌های هشت وجهی مرتبط می‌باشد. فریت‌ها معمولاً دارای گروه عاملی OH در سطح خود هستند که این گروه‌های عاملی سبب سرعت بخشیدن به جذب یون‌های فلزی می‌شوند. پیک در  $1628 \text{ cm}^{-1}$  و  $598 \text{ cm}^{-1}$  نشانگر ارتعاشات یون هیدروکسید در فریت‌ها است (Majid *et al.*, 2021; Sivakumar *et al.*, 2013).

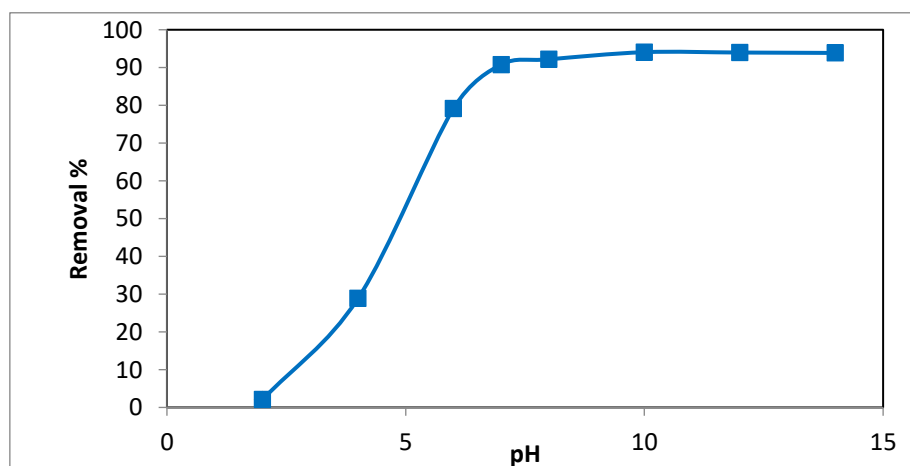
شکل ۶ طیف FT-IR نانو ذره  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  را نشان می‌دهد. همانطور که در طیف دیده می‌شود پیک‌های اصلی در  $432 \text{ cm}^{-1}$ ،  $598 \text{ cm}^{-1}$ ،  $1628 \text{ cm}^{-1}$  و  $3420 \text{ cm}^{-1}$  قرار دارند. در همه اسپینل‌ها به خصوص فریت‌ها، قوی‌ترین پیک مربوط به ارتعاشات اکسیژن - فلز در مکان‌های چهاروجهی و ضعیف‌ترین پیک مربوط به ارتعاشات اکسیژن - فلز در مکان‌های هشت وجهی می‌باشد.  $598 \text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده پیوند آهن با اکسیژن است که به طور معمول به دلیل



شکل ۶- تصویر FT-IR نمونه  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$

جاذب و رنگزا به وجود می‌آید می‌تواند عاملی جهت افزایش ظرفیت و راندمان جذب در شرایط قلیایی باشد. در pH های اسیدی به دلیل وجود نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بین مولکول‌های رنگ کریستال بنفش کاتیونی و جایگاه‌های دارای بار مثبت در سطح جاذب نیکل فریت، عمل جذب چندان مطلوب نیست. به علت اینکه در pH های قلیایی تولید گروه‌های عاملی هیدروکسید در محیط افزایش خواهد یافت، این موضوع موجب منفی شدن بار الکتریکی سطح جاذب می‌شود، بنابراین بر هم کنش و یا حتی نیروی جاذبه بین رنگزا و سطح جاذب ایجاد خواهد شد که باعث افزایش میزان جذب می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج  $\text{pH}=8$  برای ادامه فرآیند مناسب می‌باشد.

**اثر متغیرها:** در این تحقیق، چهار فاکتور شامل اثر غلظت اولیه رنگ، جرم جاذب، زمان تماس جاذب با محلول رنگی و pH محلول، بر حذف رنگ کریستال بنفش مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مهمترین پارامترها در فرایندهای جذب سطحی pH می‌باشد. pH معمولاً به صورت عاملی تأثیرگذار، ظرفیت و راندمان جذب جاذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، افزایش pH باعث افزایش ظرفیت و راندمان جذب جاذب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش pH به بالاتر از ۷، سطح جاذب دارای بار منفی و در pH کمتر از ۷ سطح جاذب دارای بار مثبت است، از آنجا که رنگ کریستال بنفش یک رنگ کاتیونی است، بنابراین نیروی جاذبه الکترواستاتیکی که بین

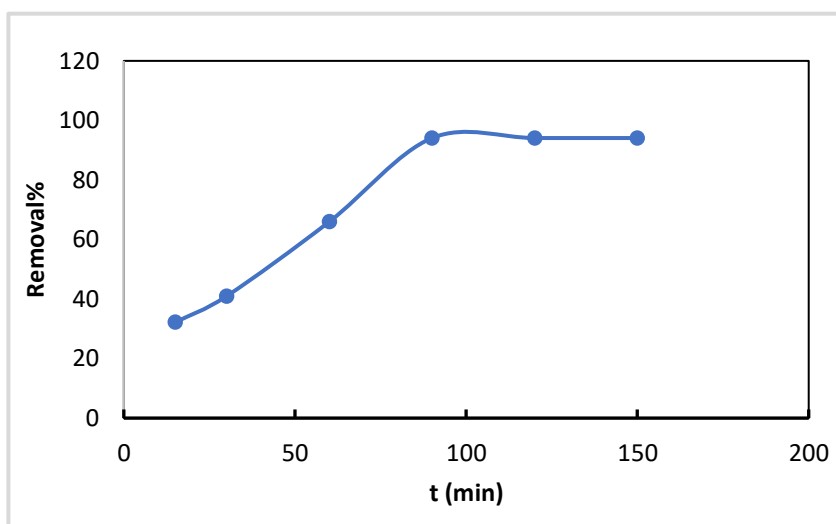


شکل ۷- تأثیر pH بر میزان حذف رنگ

(غلظت اولیه: ۱۰ mg/l، مقدار جاذب: ۰/۰۵ گرم، حجم نمونه: ۵۰ میلی لیتر، زمان تماس: ۹۰ دقیقه)

کریستال بنفش بررسی شد. نتایج مربوطه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرآیند در زمان ۹۰ دقیقه به جذب مطلوب رسیده و پس از آن دیگر مقدار جذب رنگ تغییری نمی‌کند، زیرا ظرفیت جاذب اشباع می‌شود.

برای این‌که یک آزمایش در محیط خارج آزمایشگاه قابلیت اجرا داشته باشد باید از نظر زمان انجام واکنش قابل انجام و به صرفه باشد. زیرا از دیرباز بشر به دنبال کسب روش‌هایی بوده که در کمترین زمان ممکن به نتیجه مطلوب خود دست یابد. در این آزمایش اثر زمان برهمکنش جاذب و محلول رنگی



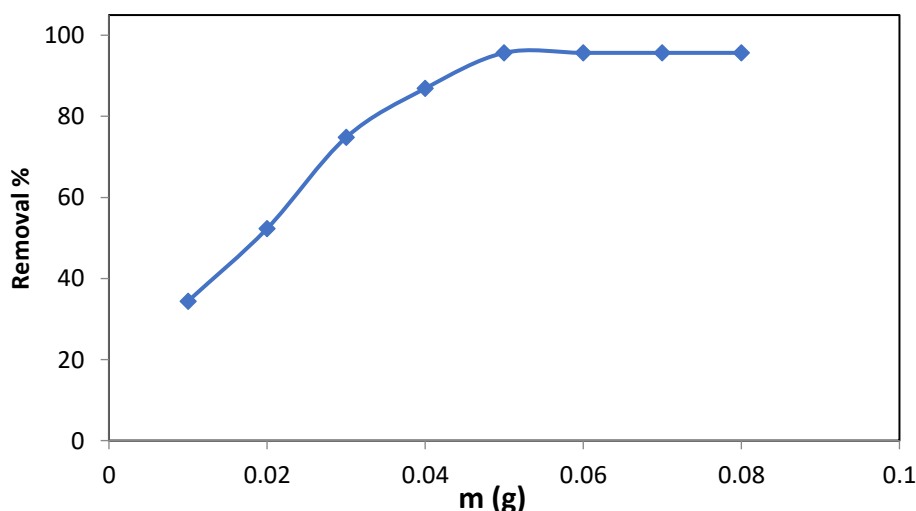
شکل ۸- اثر زمان بر میزان حذف رنگ (غلظت اولیه: ۱۰ mg/l، مقدار جاذب: ۰/۰۵ گرم، pH=۸، حجم نمونه: ۵۰ میلی لیتر)

منظور مقادیر مختلف از جاذب مورد استفاده قرار گرفت که نتایج مربوطه در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که طبق آزمایشات انجام شده وقتی مقدار جاذب به ۰/۰۵ گرم می‌رسد، راندمان جذب رنگ به صورت قابل ملاحظه‌ای بالا

مقدار جاذب از عوامل بسیار مهم در جذب رنگ می‌باشد. زیرا اگر مقدار مصرفی جاذب برای جذب رنگ خیلی زیاد باشد، صرفه اقتصادی نخواهد داشت. لذا جاذب باید ظرفیت مناسبی داشته باشد تا مقدار مصرف آن از لحاظ هزینه نیز به صرفه باشد. به این

استفاده از مقدار زیاد جاذب می‌تواند موجب کاهش سطح قابل دسترس و در نتیجه ثابت ماندن مقدار رنگ جذب شده در واحد حجم جاذب شود.

می‌رود. این درحالی است که وقتی میزان جاذب بیشتر از این مقدار می‌شود دیگر تغییرات قابل ملاحظه‌ای در افزایش راندمان جذب دیده نمی‌شود.



شکل ۹- اثر مقدار جاذب بر میزان حذف رنگ (غلظت اولیه: ۱۰ mg/l، pH=۸، حجم نمونه: ۵۰ میلی لیتر، زمان تماس: ۹۰ دقیقه)

موارد متعددی برای حذف آلاینده‌ها از محیط آبی استفاده شده است. در کار پژوهشی که در سال ۲۰۲۵ به چاپ رسیده جاذب نیکل فریت سنتزی برای حذف آلاینده رنگی مورد استفاده قرار گرفته است. این جاذب با ابعاد حدود ۲۳ نانومتر سنتز شده و در شرایط بهینه بعد از ۹۰ دقیقه حدود ۹۶ درصد بازده حذف گزارش شده که با نتایج کار حاضر مطابقت دارد (Hassan et al., 2025). در کار دیگری نیکل فریت برای حذف آلاینده رنگی و فلزات سنگین استفاده شده است. در این کار با تغییر در ساختار نیکل فریت با افزودن فلزات مختلف، باند گپ نیکل فریت را اصلاح نموده و از آن برای جذب سطحی و سپس تخریب آلاینده استفاده شده است (Kumari et al., 2024). در مورد دیگری پژوهشگران، فریت نیکل و کبالت را سنتز کرده و برای حذف آلاینده‌های رنگی استفاده نموده‌اند. در این کار نیکل فریت با ابعاد ۱۳ نانومتر سنتز و شناسایی شده است. در این مورد نیز در شرایط بهینه بازده بالای ۹۰ درصد برای حذف رنگ‌های مختلف گزارش شده است (Patil & Behera, 2023). مقایسه نتایج کار حاضر با جدیدترین تحقیقات چاپ شده نشان داد که شرایط فرایندی در این کار با نتایج کارهای چاپ شده همخوانی دارد.

## بحث

این کار با هدف ارزیابی عملکرد نیکل فریت مغناطیسی به عنوان جاذب در حذف آلاینده رنگی کریستال بنفش انجام شد. نتایج شناسایی جاذب نشان داد که جاذب سنتز شده ذرات نیکل فریت با خاصیت مغناطیسی بوده و ابعاد نانو ذرات سنتز شده حدود ۱۵ نانومتر می‌باشد. نتیجه بررسی اندازه ذره با میکروسکوپ عبوری با روش محاسبه اندازه ذره بر اساس نتایج XRD و معادله دبای شرر همخوانی دارد. بهینه‌سازی پارامترها در این کار به روش کلاسیک بررسی شد و نتایج این بخش نشان داد که برای غلظت اولیه رنگ به میزان ۱۰ mg/l در pH=۸ و مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم در ۵۰ میلی‌لیتر در زمان ۹۰ دقیقه بازده حذف رنگ حدود ۹۵ درصد به دست می‌آید. درصد حذف رنگ کریستال بنفش توسط جاذب مغناطیسی نیکل فریت به pH آب حساس بوده و حذف رنگ در محیط قلیایی بهتر از اسیدی است. با توجه به نتایجی که از این تحقیق به دست آمد، نیکل فریت، جاذب مناسبی است که می‌توان از آن برای حذف رنگ کریستال بنفش از محیط‌ها و آب‌های آلوده استفاده کرد. از مزایای این روش، مغناطیسی بودن جاذب نیکل فریت است چرا که مغناطیسی بودن باعث می‌شود به آسانی جاذب را از محیط آبی توسط آهنربا جداسازی کرد. نیکل فریت در

## منابع

10. **Kusumlata Ambade, B., Kumar, A. and Gautam, S., 2024.** Sustainable solutions: reviewing the future of textile dye contaminant removal with emerging biological treatments. *Limnological Review*, 24, 126-149.
11. **Maensiri, S., Masingboon, C., Boonchom, B. and Seraphin, S., 2007.** A simple route to synthesize nickel ferrite (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles using egg white. *Scripta materialia*, 56, 797-800.
12. **Mahmoodi, N., 2013.** Basic Dyes Removal from Aqueous Media by Nickel-Zinc Ferrite Magnetic Nanoparticles. *Journal of Textile Science and Technology*, 3, 29-36.
13. **Majid, F., Rauf, J., Ata, S., Bibi, I., Malik, A., Ibrahim, S.M., Ali, A. and Iqbal, M., 2021.** Synthesis and characterization of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ferrite: Sol-gel and hydrothermal synthesis routes effect on magnetic, structural and dielectric characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123888.
14. **Patil, D. J., & Behera, S. N., 2023.** Synthesis and characterization of nanoparticles of cobalt and nickel ferrites for elimination of hazardous organic dyes from industrial wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 53323-53338.
15. **Nabizadeh Chianeh, F., Basiri Parsa, J. and Rezaei Vahidian, H., 2017.** Artificial neural network modeling for removal of azo dye from aqueous solutions by Ti anode coated with multiwall carbon nanotubes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36, 1778-1784.
16. **Özcan, A., Şahin, Y., Koparal, A.S. and Oturan, M.A., 2009.** A comparative study on the efficiency of electro-Fenton process in the removal of prophan from water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 89, 620-626.
17. **Perumal, M.K.K., Gandhi, D., Renuka, R.R., Lakshminarayanan, A., Thiyagarajulu, N. and Kamaraj, C., 2024.** Advanced nano-based adsorbents for purification of pharmaceutical residue polluted water: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection*.
18. **Rahmani, A., Almasi, H., Bajalan, S., Rezaei Vahidian, H., Zarei, A. and Shabanloo, A., 2017.** Optimization of ciprofloxacin antibiotic sonochemical degradation with persulfate activated by nano zero-valent iron by central composite design method. *Journal of Health*, 8, 231-245.
1. **AL-kadhi, N.S., AL-senani, G.M., Saad, F.A., Munshi, A.M. and Abdelrahman, E.A., 2024.** Modification of nickel ferrite nanoparticles by sodium docusate surfactant for superior crystal violet dye removal from aqueous solutions. *Scientific Reports*, 14, 73-279.
2. **Azimi, S.B., 2024.** Preparation of Biochar and its Use to Remove Nitrophenol from Aqueous Media by Adsorption Method. *environment & Interdisciplinary Development*, 9, 69-81.
3. **Bazrafshan, E., Mostafapour, F.K. and Mahvi, A.H., 2014.** Decolorization of reactive red 198 by adsorption onto ZnCl<sub>2</sub> activated pistachio hull wastes. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 3, 7.
4. **Dehghani, M.H., Mesdaghinia, A.R., Nasser, S., Mahvi, A.H. and Azam, K., 2008.** Application of SCR technology for degradation of reactive yellow dye in aqueous solution. *Water Quality Research Journal*, 43, 183-187.
5. **Hao, L., Yan, J., LI, M., Shao, W. and Zeng, M., 2024.** Coagulation-centered three-step approach for removing by-product organic pollutants from tetrabromobisphenol A industrial wastewater: experimental and theoretic investigations. *Environmental Research*, 247, 118113.
6. **Hassan, A. A., Ali, M. E. M., Abdel-Latif, S. A., Hasani, I. W., & Fahim, Y. A., 2025.** Efficient removal of Remazol Red dye from aqueous solution using magnetic nickel ferrite nanoparticles synthesized via aqueous reflux. *Scientific Reports*, 15(1), 17527 .
7. **Jacob, J. and Khadar, M.A., 2010.** Investigation of mixed spinel structure of nanostructured nickel ferrite. *Journal of applied physics*, 107.
8. **Khakyzadeh, V., Rezaei-Vahidian, H., Sediqi, S., Azimi, S. and Karimi-Nami, R., 2021 .** Programming adsorptive removal of organic azo dye from aqueous media using magnetic carbon nano-composite. *Chem. Methodol*, 5, 324-330.
9. **Kumari, S., Sharma, R., Thakur, N., & Kumari, A., 2024.** Removal of organic and inorganic effluents from wastewater by using degradation and adsorption properties of transition metal-doped nickel ferrite. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(34), 46526-46545.

- Valorization. *ChemBioEng Reviews*, 11, e202400014.
24. **Wang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Fang, W., Tan, Y., He, Z. and Liao, H., 2024.** Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. *Environmental Sciences Europe*, 36, 25.
25. **Zarei, A., Hedayatinasab, F. and Rezaei-Vahidian, H., 2020.** Photocatalytic degradation of nitro-aromatic explosives using visible-light-activated WO<sub>3</sub>: Optimization and catalyst modification. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39, e13386.
26. **Zhou, L., Zhou, J., Dong, Y., Wu, Y., Xi, Z., Lu, Z., Lei, J., Zhang, J. and Liu, Y., 2024.** Insight on photocatalytic synchronous oxidation and reduction for pollutant removal: Chemical energy conversion between macromolecular organic pollutants and heavy metal. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135236.
19. **Satyam, S. and Patra, S., 2024.** Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: a comprehensive review. *Heliyon*.
20. **Shen, Z., Kuang, Y., Zhou, S., Zheng, J. and Ouyang, G., 2023.** Preparation of magnetic adsorbent and its adsorption removal of pollutants: an overview. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 167, 117241.
21. **Sivakumar, P., Ramesh, R., Ramanand, A., Ponnusamy, S. and Muthamizchelvan, C., 2013.** Synthesis and characterization of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 563, 6-11.
22. **Sobhanardakani, S. and Zandipak, R., 2016.** Removal of methyl orange dye from aqueous solutions using NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: equilibrium and kinetic studies. *Iranian Journal of Health and Environment*, 9, 247-258.
23. **Tharamrajah, N., Shahbaz, K. and Baroutian, S., 2024.** Anaerobic Digestion for Textile Waste Treatment and





## Synthesis of Nickel Ferrite Magnetic Adsorbent as a Recyclable Adsorbent for Removal of Organic Contaminants from Aqueous Media

Zahra Ayazi<sup>1</sup>, Seyede Bahareh Azimi<sup>2\*</sup>, Zahra Monsef Khoshhesab<sup>3</sup>,  
Masume Asgari<sup>3</sup>

1- Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2\* - Research Group of Assessment and Environment Risks, Research Center of Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran

3- Department of Chemistry, Payame Noor University, Qazvin, Iran

### Original Article

**Received:**  
2025.05.12

**Accepted:**  
2025.07.31

**Keywords:**  
Surface  
Adsorption,  
Wastewater  
Treatment,  
Organic  
Contaminant  
Removal,  
Nickel Ferrite,  
Magnetic  
Adsorbent

### Abstract

**Introduction:** Today, due to the lack of water and the special role of water in the daily lives of humans, the problem of water resources pollution is a very important environmental problem. Pollutions are usually due to the entry of different pollutants into water resources, especially rivers, which is a serious risk for human health and especially aquaculture. Organic pollutants are common water pollutants because of their great use in various industries and also because of the high solubility of some them in water, which are mainly toxic. Different methods are used to remove organic compounds from water with some advantages and disadvantages. One of the efficient techniques for wastewater treatment and removal of pollutants is the process of adsorption, which has been particularly considered for large -scale applications due to its ease of implementation as well as the diversity of adsorbents and low relative costs. One of the challenges of using the adsorption process is separating the adsorbent at the end of the process, and today, the use of magnetic adsorbents is a solution to this challenge. In the present study, the separation and removal of violet crystal dyes from aqueous environments using nickel ferrite magnetic nanoparticles ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ), as adsorbent, has been investigated.

**Materials and Methods:** Violet crystal dye is used as a common dye pollutant and chemicals including ammonia, nirate nitrate, iron nitrate to synthesize nano-nickel ferrite. Transmission electronic microscopy, X-rays spectroscopy, thermal decomposition and infrared spectroscopy, and UV-VIS spectropotometer methods were used to characterize Nano-nickel ferrit. In this study, the effect of different parameters such as pH, initial dye concentration, adsorbent weight and adsorbent contact time with dye solution on adsorption process was tested. The relevant magnetic nanosorbent is synthesized by the co-precipitation method and a certain amount of it is added to the solution for use in the process. After the process is completed, sampeling is taken and the used adsorbent is easily separated from the aqueous environment using a magnet.

**Results:** The adsorbent identification results showed that the synthesized adsorbent of nickel ferrite particles was magnetic and based on transmission electron microscopy results and Debye-Scherer calculations from X-ray diffraction results, the size of synthesized nanoparticles were about 15 nm. The results of this study

showed that for the initial concentration of 10 mg/l at pH = 8 and the adsorbent value of 0.05 g in 50 ml for 90 minutes, the dye removal efficiency is about 95 %.

**Discussion:** The dimensions of the synthesized particles are in the nanometer range, which provides high adsorption properties for adsorbent. According to the results, the percentage of violet crystal removal by the magnetic nickel ferrite adsorbent is sensitive to the pH of the water and the removal of the dye in the alkaline environment is better than the acidic. Nickel ferrite is a good adsorbent that can be used to remove violet crystals from contaminated water. One of the benefits of this method is the magnetic property of nickel ferrite because being magnetic makes it easy to separate the adsorbent from the aqueous environment by the magnet.