

## Synthesis, Characterization, and Adsorptive Properties of Polyaniline@MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M: Mg, Mn, Ni) Magnetic Nanocomposites

Maryam Zare<sup>\*1</sup>, Elham Adibian<sup>2</sup>, Ensieh Ghasemi<sup>3</sup>, Fatemeh Ashouri<sup>4</sup>

1- Basic Sciences Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 87717-67498, Golpayegan, Iran

2-Drug Delivery System Research Center, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, P.O. Code: 1941933111, Tehran, Iran

3-Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmaceutical Chemistry, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, P.O. Code: 1913674711, Tehran, Iran

4-Department of Applied Chemistry, Faculty of Pharmaceutical Chemistry, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, P.O. Code: 1913674711, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09-08-2022

Accepted: 10-01-2023

Available online: 20-09-2023

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

**DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.2.1.2**

### Keywords:

Congo Red

Magnetic Nanoparticles

Polyaniline@MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Polyaniline@NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Polyaniline@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

### ABSTRACT

*This paper used three magnetic adsorbents, including polyaniline@NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, and polyaniline@MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> to remove congo red dye. The synthesized nanocomposites were identified using SEM, XRD, EDX, and FT-IR methods. Then the factors affecting the removal efficiency of congo red were optimized for all three adsorbents. Under optimum conditions, the removal efficiencies of congo red from aqueous media by polyaniline@NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, and polyaniline@MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> were calculated as 92, 90 and 89 %, respectively. The reusability of the used nanocomposites was investigated, so 1 M HCl as a recovery agent could recover up to 4 times all three nanocomposites. The synthesized sorbents performed the removal of congo red from real samples, including well water and dyeing wastewater. The results showed that the matrix does not significantly affect the efficiency of the nanocomposites so that they could be used in real samples with complex matrices.*

\*Corresponding author: [m.zare@iut.ac.ir](mailto:m.zare@iut.ac.ir)





## سنتز، مشخصه‌یابی و خواص جذبی نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی (M: Mg, Mn, Ni) Polyaniline@MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

مریم زارع<sup>۱\*</sup>، الهام ادیبیان<sup>۲</sup>، انسیه قاسمی<sup>۲</sup>، فاطمه عشوری<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه علوم پایه، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران، صندوق پستی: ۶۷۴۹۸-۷۷۷۱۷

۲- دانشجوی دکترا، مرکز تحقیقات مواد اولیه دارویی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، کد پستی: ۱۹۴۱۹۳۳۱۱۱

۳- استادیار، گروه شیمی دارویی، دانشکده شیمی دارویی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، کد پستی: ۱۹۱۳۶۷۴۷۱۱

۴- استادیار، گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی دارویی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، کد پستی: ۱۹۱۳۶۷۴۷۱۱

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله از سه جاذب مغناطیسی شامل  $\text{polyaniline@NiFe}_2\text{O}_4$ ،  $\text{polyaniline@MnFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{polyaniline@MgFe}_2\text{O}_4$  به منظور حذف آلاینده‌ی رنگی قرمز کنگو استفاده شده است. نانوجاذب‌های سنتز شده توسط روش‌های مختلفی از جمله میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس، پراش انرژی پرتو ایکس و طیف‌سنجی زیر قرمز شناسایی شدند. سپس عوامل موثر بر بازده حذف قرمز کنگو در مورد هر سه جاذب بهینه‌سازی شد. در شرایط بهینه بازده حذف قرمز کنگو از محیط آبی توسط  $\text{polyaniline@MgFe}_2\text{O}_4$ ،  $\text{polyaniline@MnFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{polyaniline@NiFe}_2\text{O}_4$  به ترتیب برابر با ۹۲، ۹۰ و ۸۹ درصد محاسبه شد. امکان احیا و بازیابی نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده بررسی شد و اسیدکلریدریک ۱ مولار به عنوان عامل بازیابی کننده توانست تا ۴ مرتبه هر سه نانوکامپوزیت را بازیابی کند. حذف قرمز کنگو از نمونه‌های حقیقی شامل آب چاه و پساب رنگرزی توسط جاذب‌های سنتز شده انجام گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که پیچیدگی بافت بر کارایی نانوکامپوزیت‌ها اثر چشمگیری ندارد، بنابراین می‌توان از آن‌ها در نمونه‌های حقیقی با بافت پیچیده نیز برای حذف قرمز کنگو استفاده کرد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۶/۲۹

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.2.1.2

### واژه‌های کلیدی:

قرمز کنگو

نانوذرات مغناطیسی

$\text{Polyaniline@MnFe}_2\text{O}_4$

$\text{Polyaniline@NiFe}_2\text{O}_4$

$\text{Polyaniline@MgFe}_2\text{O}_4$



## ۱- مقدمه

منابع آب شیرین در جهان محدود است و دشواری دسترسی به آن‌ها به مرور زمان به دلیل افزایش جمعیت و تغییرات آب و هوا رو به افزایش است. عامل افزایش این محدودیت نه تنها افزایش تقاضا برای آب است، بلکه در اثر آلودگی اکوسیستم‌های آب شیرین نیز می‌باشد (۱). در سال‌های اخیر، آلودگی آب تبدیل به یکی از بزرگ‌ترین مشکلات جهانی شده است که به ارزیابی مداوم سیاست‌های جوامع بشری نیازمند است. آلودگی آب، یکی از علل عمده مرگ و میر در سراسر جهان است. ورود پساب‌های صنعتی حاوی آلاینده‌های معدنی و آلی به منابع آبی، علاوه بر تاثیر منفی بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده، منابع محدود آب سالم را نیز محدودتر می‌کند (۲). در میان صنایع مختلف، صنعت نساجی به علت مصرف زیاد آب و تولید پساب‌های حاوی مواد شیمیایی مختلف و رنگ‌های گوناگون، دارای بار آلودگی بسیار بالایی می‌باشد. از جمله رنگ‌های پرکاربرد در صنایع نساجی، رنگ قرمز کنگو است. کنگو نمک سدیمی از بنزیدین دی آزو-بیس-۱-نفتیل آمین-۴-اسید سولفونیک می‌باشد و فرمول مولکولی آن  $C_3H_{22}N_6Na_2O_6S_2$  است. رنگ قرمز کنگو (CR) شامل دو گروه آزو بوده و به خاطر تولید آمین‌های آروماتیک، سمی و سرطان‌زا و نسبت به تجزیه‌های بیولوژیکی محیط‌زیستی مقاوم است. روش‌های بی‌شماری برای تصفیه پساب‌های رنگی از جمله انعقاد (۳)، فیلتراسیون غشایی (۴)، جذب (۵)، استفاده از کاتالیزور نوری و اکسایش پیشرفته برای حذف مواد رنگ‌زا ارائه گردیده است (۶). از میان این روش‌ها فرآیند جذب به علت طراحی ساده و موثر آن و آسانی عملکرد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تاکنون جاذب‌های گوناگونی مانند کربن فعال (۷)، زئولیت‌ها (۸)، پلیمرها (۹) و مواد مغناطیسی (۱۰) به این منظور استفاده شده‌اند. در سال ۲۰۰۱، لی و همکارانش نانومیله‌های  $NiFe_2O_4$  را سنتز کردند و کارایی آن‌ها را در حذف رنگ قرمز کنگو مورد بررسی قرار دادند. ظرفیت این جاذب در pH=5 حدود ۱۶۰ mg/g گزارش شده است (۱۱). در سال ۲۰۱۷، نانوذرات  $MgFe_2O_4$  برای حذف قرمز کنگو مورد استفاده قرار گرفتند. این جاذب توانست قرمز کنگو را در محدوده ۱۰۰-۴۰۰ mg/l از پساب حذف کند. در این تحقیق ظرفیت جذب ۸۰ mg/g در محدوده pH ۵ تا ۹ گزارش شده است (۱۲). نانوصفحه‌های  $MnFe_2O_4$  به منظور حذف قرمز کنگو به کار گرفته شده‌اند. این نانوصفحه‌های مغناطیسی از طریق فرآیند آسان احتراق تهیه شده‌اند و ریخت‌شناسی، ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مغناطیسی آنها توسط روش‌هایی مانند XRD، SEM، TEM و VSM مورد بررسی قرار گرفته است. ظرفیت جذب ۵۰ mg/g وقتی غلظت اولیه رنگ ۲۴۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است طی حدوداً ۵۰ دقیقه گزارش شده است (۱۳). اگرچه جاذب مغناطیسی به آسانی از طریق یک میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا می‌شوند و این مزیت

بزرگی برای آنها به حساب می‌آید ولی ظرفیت جذب آنها در صورت اصلاح نشدن سطح با گروه‌های عاملی مختلف و مواد مختلف پایین است که این نقطه ضعفی برای آنها به حساب می‌آید. یکی از موادی که می‌تواند ظرفیت جاذب را افزایش دهد، استفاده از پلیمرهایی مانند پلی‌آنیلین و تولید کامپوزیت‌های مغناطیسی با کارایی بالاست (۱۴). خرازی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ جذب متیل نارنجی را با پلی‌آنیلین/فریت مس انجام دادند. نتایج نشان داد، بیشینه ظرفیت جذب تک لایه‌ای با استفاده از این جاذب ۳۴۵.۹ میلی‌گرم بر گرم است (۱۵). در سال ۲۰۲۰ کامپوزیت  $MnFe_2O_4$ -PANi-NC سنتز شد و کارایی آن در حذف رنگ متیل نارنجی مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت این جاذب حدود ۱۷۵ mg/g گزارش شده است (۱۶). گابل و همکارانش  $CoFe_2O_4$ /Polyaniiline را برای حذف قرمز اسیدی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد این جاذب در pH=۲، ۸۱ درصد بازده جذب دارد (۱۷). در سال ۲۰۱۶، مو و همکارانش از نانوکامپوزیت  $Clay/polyaniiline/Fe_3O_4$  به عنوان جاذب برای حذف رنگ قرمز کنگو استفاده کردند. نتایج نشان داد در pH=۸.۲، بازده حذف قرمز کنگو ۹۸.۱ درصد است (۱۸).

در این مقاله برای اولین بار حذف رنگ قرمز کنگو از آب توسط کامپوزیت‌های فریت فلزات مختلف مانند منگنز، نیکل و منیزیم با پوشش پلی‌آنیلین مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور ابتدا نانوکامپوزیت‌های پلی‌آنیلین/فریت منیزیم، پلی‌آنیلین/فریت منیزیم و پلی‌آنیلین/فریت نیکل سنتز و با استفاده از روش‌های FT-IR، XRD، SEM و EDX مطالعه و شناسایی شدند. سپس تمام عوامل مختلف و موثر بر روی کارایی نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی در حذف قرمز کنگو مورد بررسی قرار گرفتند.

## ۲- بخش تجربی

## ۲-۱- مواد و تجهیزات شناسایی

مواد اولیه شامل  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ،  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ، اسید سیتریک، آنیلین، HCl، آمونیم پرسولفات، استن، نیترات منیزیم،  $Na_2CO_3$ ، NaOH، آمونیم پروکسی دی‌سولفات،  $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ، اتانل از شرکت سیگما-آلدریج تهیه شدند. داده‌های پراکندگی پرتو X نمونه‌های پودری (PXR) با استفاده از دستگاه Philips X'Pert MPD diffractometer ( $Cu-K\alpha$  X-radiation,  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ) انجام شد. طیف‌های FT-IR نمونه‌ها به صورت قرص‌های KBr با دستگاه طیف‌سنج Alpha-Bruker FT-IR به دست آمد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از دستگاه KYKY-EM3200 تهیه شد. تجزیه عنصری با دستگاه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) از سری MIRA3 FEG-SEM انجام شد. برای اندازه‌گیری جذب نور، از دستگاه طیف‌سنج UV/Vis دوپرتویی T80 استفاده شد.

**۲-۲- سنتز نانوذرات نیکل فریت،  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$** 

پودر فریت نیکل،  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ، از طریق روش سل-ژل توسط نیترات‌های آهن (III) و نیکل (II) به عنوان نمک‌های پیش‌ساز که در مقادیر مشخصی به صورت جداگانه در آب مقطر حل شده‌اند، سنتز می‌شود. ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۲ مولار نیترات‌های آهن (III) به ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۲ مولار نیترات نیکل (II) افزوده می‌شود و سپس ۳۰ میلی‌لیتر محلول ۲ مولار اسید سیتریک به آن اضافه می‌شود و ۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. پس از این مدت، یک محلول چگال ژل مانند تشکیل می‌شود. ژل حاصل با آب مقطر چندین مرتبه شست و شو داده می‌شود که مواد باقی‌مانده و واکنش ندادده خارج شوند. سپس به منظور خشک شدن، نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد و پس از آن برای کلسینه شدن، به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد (۱۹).

**۳-۲- سنتز نانوکامپوزیت  $\text{Polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$** 

نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین/فریت نیکل که به صورت  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$  نام‌گذاری شده است، به شیوه پلیمریزاسیون در جای آنیلین در حضور فریت نیکل در محیط اسیدی سنتز می‌شود. به طور خلاصه مونومر آنیلین و پودر فریت نیکل به نسبت وزنی مشخصی در محیط اسیدی حاوی HCl با یکدیگر مخلوط می‌شوند. به این منظور ابتدا آنیلین ۰٫۲ مولار در ۱۰۰ میلی‌لیتر از HCl یک مولار تهیه می‌شود سپس به یک بالن ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل می‌شود و ۰٫۶۲ گرم پودر فریت نیکل به آن افزوده می‌شود. مخلوط حاصل به شدت هم زده می‌شود و سپس در حمام یخ قرار داده می‌شود و محلول آمونیم پرسولفات به صورت قطره قطره به آن افزوده می‌شود. پس از آن که ۶ ساعت به واکنش اجازه تکمیل شدن داده می‌شود، نانوکامپوزیت فریت نیکل با پوشش پلی‌آنیلین سنتز شده از محلول جدا می‌شود و با آب و استن چندین مرتبه شسته می‌شود تا وقتی که پودر حاصل کاملاً بی‌رنگ شود. نانوکامپوزیت شسته شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آن قرار داده و خشک می‌شود (۱۹). نمونه حاصل شامل ۲۵ درصد وزنی نانو ذرات  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  است.

**۴-۲- سنتز نانوذرات منیزیم فریت،  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$** 

به منظور سنتز فریت منیزیم با روش سل-ژل، ۲۴ میلی‌لیتر محلول ۰٫۲ مولار NaOH با ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰٫۲ مولار  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  مخلوط می‌شوند. در ادامه ۸ میلی‌مول نیترات آهن (III) و ۴ میلی‌مول نیترات منیزیم به محلول تهیه شده اضافه می‌شود. سپس به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود. باید توجه شود که دمای مخلوط با سرعت ۴ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش و به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد. رسوب حاصل پس از صاف شدن با آب مقطر شسته و سپس در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت

خشک می‌شود. پس از آن در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت کلسینه می‌شود (در این مورد هم افزایش دما با سرعت ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام می‌شود). پس از این مدت، پودر فریت منیزیم بدست خواهد آمد (۲۰).

**۵-۲- سنتز نانوکامپوزیت  $\text{Polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$** 

سنتز نانوکامپوزیت فریت منیزیم با پوشش پلی‌آنیلین،  $\text{polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$  توسط روش پلیمری شدن در جا با افزودن مونومر آنیلین و نانوذرات فریت منیزیم سنتز می‌شود. به این منظور حدود ۰٫۵ گرم  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  به ۸۱ میلی‌لیتر محلول تازه تهیه شده ۰٫۲ مولار آنیلین و ۰٫۲۵ مولار آمونیم پروکسی دی سولفات در HCl یک مولار در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزوده می‌شود. مخلوط برای ۱۲ ساعت به هم‌زده می‌شود. فریت منیزیم در طی این مدت توسط پلی‌آنیلین پوشش دار می‌شود. این نانوکامپوزیت از محلول جدا شده و با HCl یک مولار و آب مقطر گرم شسته می‌شود و سپس در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود (۲۰). نانو کامپوزیت حاصل شامل ۲۵ درصد وزنی  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  است.

**۶-۲- سنتز نانوذرات منگنز فریت،  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$** 

روش هم رسوبی برای سنتز نانوذرات مغناطیسی  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  به کار گرفته می‌شود. به این منظور، ۵٫۷ گرم نمک  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  و ۱٫۷ گرم از  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  در ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل می‌شوند. مخلوط در معرض امواج فراصوت در یک حمام فراصوت حرارت می‌بیند تا به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برسد سپس فوراً ۲۰ میلی‌لیتر سود ۵ مولار به آن افزوده می‌شود. سپس مخلوط حاصل در همان شرایط به مدت ۳۰ دقیقه حرارت می‌بیند و سپس در دمای اتاق سرد می‌شود و پس از صاف کردن چندین مرتبه با آب مقطر شست و شو داده می‌شود. در نهایت جامد سیاه رنگ در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت قرار می‌گیرد تا خشک شود (۲۱).

**۷-۲- سنتز نانوکامپوزیت  $\text{Polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$** 

سنتز نانوکامپوزیت فریت منگنز پوشیده با پلی‌آنیلین،  $\text{polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$  نیز مشابه دو نانوکامپوزیتی که پیش از این آورده شده، یک سنتز پلیمریزاسیون درجا است. به این منظور مونومر آنیلین (۳٫۶ میلی‌لیتر) و ۱٫۲۲ گرم از نانوذرات فریت منگنز،  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ، در آب مقطر حل می‌شوند و پس از گذشت یک ساعت ۶۰ میلی‌لیتر محلول حاوی ۲۰ گرم آمونیم پرسولفات آرام آرام به محلول فوق افزوده می‌شود. پلیمری شدن در حمام یخ و به مدت ۴ ساعت کامل می‌شود. نانوکامپوزیت تهیه شده در آب و اتانل شسته شده و پودر سیاه رنگ در آن خشک شده و به مدت ۲۴ ساعت تحت خلا خشک می‌شود (۲۲). نمونه حاصل شامل ۲۵ درصد وزنی نانو ذرات  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  است.

## ۸-۲- آزمایش‌های حذف رنگ

در یک آزمایش نوعی، مقدار ۵۰ میلی‌لیتر از رنگ قرمز کنگو با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر درون یک ظرف شیشه‌ای ریخته شد و سپس در pH معینی، مقدار مشخصی از نانوکامپوزیت به آن تزریق شد. در فواصل زمانی مشخص، مقدار ۵ میلی‌لیتر از محلول، نمونه برداری شد و سپس نانوکامپوزیت و رنگ‌های جذب شده با استفاده از یک آهن‌ریا از محلول جدا شد. در ادامه، طیف جذبی نمونه‌ها توسط دستگاه جذبی UV-Vis به دست می‌آید و نهایتاً مقدار جذب در طول موج بیشینه رنگ ثبت می‌شود. برای بیان میزان حذف رنگ، می‌توان از رابطه درصد بازده حذف رنگ که در رابطه ۱ قابل مشاهده است، استفاده کرد.

$$R.E. \% = \left( \frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 = \left( \frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، مقدار جذب مرئی-فرابنفش رنگ اولیه (شاهد)،  $A_0$  مقدار جذب مرئی-فرابنفش رنگ باقی‌مانده در هر لحظه،  $C_0$  غلظت رنگ اولیه (شاهد) و  $C_t$  غلظت رنگ باقیمانده در هر لحظه بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است. برای محاسبه  $q_t$  (ظرفیت جذب جذب در زمان  $t$ ) و  $q_e$  (ظرفیت جذب جذب در حالت تعادل) از رابطه ۲ و ۳ استفاده شد.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (3)$$

که در رابطه‌های ۲ و ۳،  $q_t$  (ظرفیت جذب جذب در زمان  $t$ ،  $q_e$  (ظرفیت جذب جذب در زمان  $t$ ،  $C_0$  (ظرفیت اولیه رنگ،  $C_t$  (ظرفیت محلول رنگ در زمان  $t$ ،  $C_e$  (ظرفیت محلول رنگ در زمان تعادل،  $V$  (حجم محلول رنگ و  $m$  (وزن جذب است.

پیش‌بینی سرعت فرآیند جذب سطحی برای طراحی یک سامانه جذب مطلوب ضروری است. مدل‌های سینتیکی بسیاری برای تحلیل چگونگی تغییرات ظرفیت جذب با زمان وجود دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم اشاره کرد. روابط ریاضی مدل‌های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم به ترتیب، چنین است (رابطه‌های ۴ و ۵) (۲۳).

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - \frac{K_1 t}{2.303} \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{K_2 q_e} \quad (5)$$

در این روابط  $q_e$  (ظرفیت جذب) و  $q_t$  (ظرفیت جذب در حالت تعادل و در زمان  $t$  هستند.  $K_1$  (min<sup>-1</sup>) و  $K_2$  (g.mg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>) به ترتیب ثابت سرعت شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم هستند.

مدل‌های ایزوترمی بسیاری برای توصیف تعادلات جذب به کار می‌روند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ اشاره کرد. مدل لانگمویر بر مبنای جذب همگن و تک لایه‌ای جذب شونده با انرژی‌های یکسان روی مکان‌های فعال جذب در سطح جاذب است. مدل فروندلیچ بر مبنای جذب ناهمگن و چندلایه‌ای جذب شونده روی سطح جاذب است. معادلات ریاضی ۶ و ۷ به ترتیب مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ است (۲۴).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} K_f} \quad (6)$$

$$\text{Log}(q_e) = \frac{1}{n} \cdot \text{Log}(C_e) - \text{Log}(K_f) \quad (7)$$

که در آن  $K_f$  (L.mg<sup>-1</sup>) ثابت ایزوترم لانگمویر و  $q_{max}$  (mg.g<sup>-1</sup>) حداکثر ظرفیت جذب جاذب برای ایجاد تک لایه است.  $K_f$  (mg<sup>-1</sup>.g<sup>-1</sup>) و  $n$  ثابت‌های وابسته به دمای رابطه فروندلیچ هستند؛ پارامتر  $n$  نشان دهنده ناهمگنی سطح است و  $K_f$  با ظرفیت جذب متناسب است.

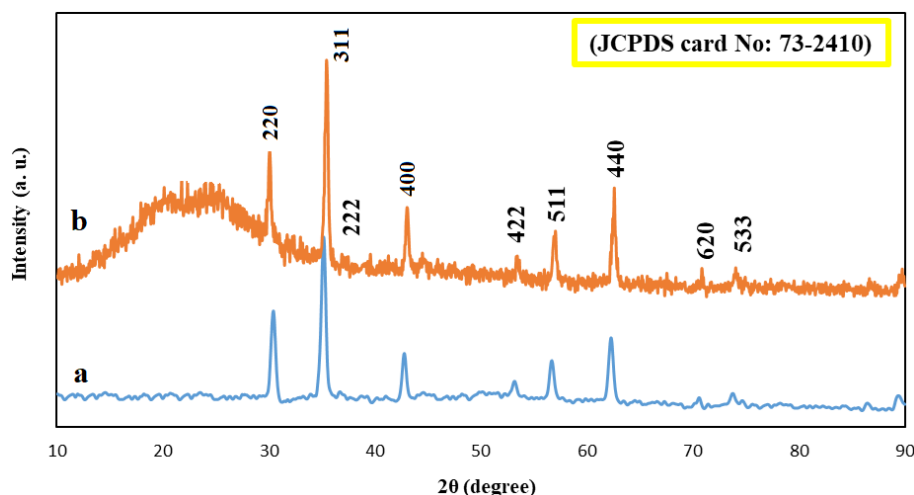
## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- شناسایی و تعیین ویژگی‌های ساختاری

برای شناسایی نانوکامپوزیت‌های سنتز شده در این پژوهش از روش‌های مختلفی استفاده شد. نتایج حاصل از این روش‌ها که شامل پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی زیرقرمز است در ادامه با شرح و بررسی جزئیات ارائه می‌شود.

## ۳-۱-۱- نتایج حاصل از الگوی پراش پرتوی ایکس

الگوی XRD کامپوزیت MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در دو حالت پوشیده و نپوشیده با پلی‌آنیلین در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این الگوها دیده می‌شود، پیک‌ها به خوبی از هم جدا شده‌اند که نشان‌دهنده تک‌فازی بودن ماده تهیه شده است. پیک‌های پراش صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰) و (۶۲۰) شواهد روشنی برای شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت ارائه می‌دهد (۲۵). براساس رابطه شرر و پیک موجود در زاویه ۳۵٫۵ درجه، اندازه ذرات تقریباً ۱۵ نانومتر است که البته با نتایج SEM هم خوانی ندارد. این عدم تطابق ممکن است در اثر نمونه‌برداری‌های ناهمگن و یا آگلومره شدن نانوذرات باشد. پیک پهن در ۲θ تقریباً ۲۲ درجه که در الگوی XRD نانوکامپوزیت poly(aniline)-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> دیده می‌شود، مربوط به پلی‌آنیلین است (۲۶) که نشان‌دهنده آمورف بودن این پلیمر است و به خوبی اصلاح نانوذرات فریت منیزیم با این پلیمر را تصدیق می‌کند.



شکل ۱: الگوی XRD (a)  $MgFe_2O_4$  و (b) نانوکامپوزیت  $polyaniline-MgFe_2O_4$

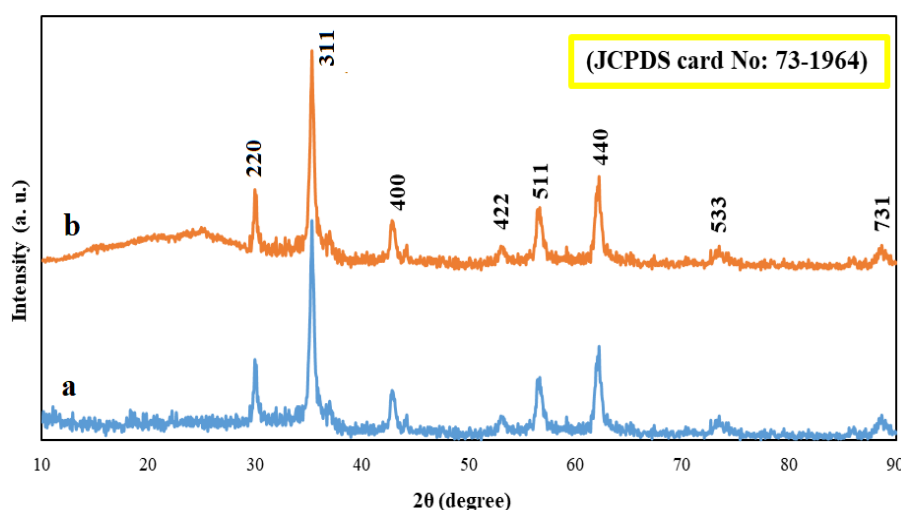
Figure 1: XRD pattern of (a)  $MgFe_2O_4$  and (b)  $polyaniline-MgFe_2O_4$ .

الگوی XRD نانوذرات  $MnFe_2O_4$  و نانوکامپوزیت  $polyaniline-MnFe_2O_4$  در شکل ۲ نشان داده شده است. آنالیز XRD با شاخص‌های میلر که با کد JCPDS به شماره ۷۳-۱۹۶۴ مطابقت دارد گواهی محکمی برای شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت ارائه می‌دهد (۲۷). براساس رابطه شرر و پیک موجود در  $2\theta$  برابر با ۳۰٫۳۵ درجه، اندازه ذرات تقریباً ۱۳ نانومتر است. در این کامپوزیت پلیمر پلی‌آنیلین عامل حضور پیک پهن مشاهده شده در  $2\theta$  تقریباً ۲۲ درجه است که به خوبی سنتز این پلیمر بی‌شکل روی نانوذرات را تایید می‌کند.

الگوی XRD نانوذرات  $NiFe_2O_4$  و نانوکامپوزیت  $polyaniline-NiFe_2O_4$  را نشان می‌دهد. پراش صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۳۳۳)، (۴۴۰) و (۶۲۲) شواهد روشنی برای شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت ارائه می‌دهد که این شاخص‌های میلر با کد JCPDS به شماره ۰۳۲۵-۱۰ مطابقت دارد و حضور نانوذرات  $NiFe_2O_4$  را در محصول اثبات می‌کند (۲۸). پهنای باریک پیک‌های پراش نشان می‌دهد که ابعاد نمونه تهیه شده بسیار اندک است. به طوری که براساس رابطه شرر و پیک موجود در  $2\theta$  برابر با ۳۵٫۹ درجه، اندازه ذرات تقریباً ۱۶ نانومتر است. پیک پهن دیده شده با مرکزیت  $2\theta=22$  مربوط به حضور پلی‌آنیلین در این نانوکامپوزیت است.

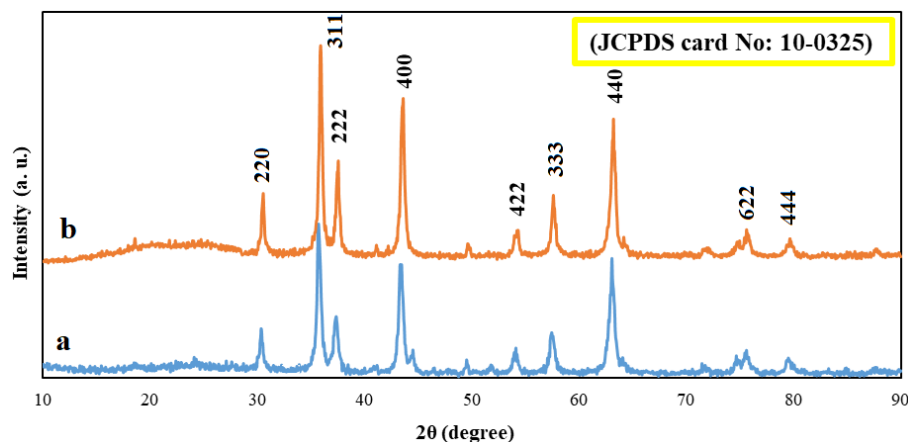
الگوی XRD نانوذرات  $MnFe_2O_4$  و نانوکامپوزیت  $polyaniline-MnFe_2O_4$  در شکل ۲ نشان داده شده است. آنالیز XRD با شاخص‌های میلر که با کد JCPDS به شماره ۷۳-۱۹۶۴ مطابقت دارد گواهی محکمی برای شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت ارائه می‌دهد (۲۷). براساس رابطه شرر و پیک موجود در  $2\theta$  برابر با ۳۰٫۳۵ درجه، اندازه ذرات تقریباً ۱۳ نانومتر است. در این کامپوزیت پلیمر پلی‌آنیلین عامل حضور پیک پهن مشاهده شده در  $2\theta$  تقریباً ۲۲ درجه است که به خوبی سنتز این پلیمر بی‌شکل روی نانوذرات را تایید می‌کند.

شکل ۳ الگوی XRD نانوذرات  $NiFe_2O_4$  و نانوکامپوزیت  $polyaniline-NiFe_2O_4$  را نشان می‌دهد. پراش صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۳۳۳)، (۴۴۰) و (۶۲۲) شواهد روشنی برای شکل‌گیری ساختار اسپینل فریت ارائه می‌دهد که این شاخص‌های میلر با کد JCPDS به شماره ۰۳۲۵-۱۰ مطابقت دارد و حضور نانوذرات  $NiFe_2O_4$  را در محصول اثبات می‌کند (۲۸). پهنای باریک پیک‌های پراش نشان می‌دهد که ابعاد نمونه تهیه شده بسیار اندک است. به طوری که براساس رابطه شرر و پیک موجود در  $2\theta$  برابر با ۳۵٫۹ درجه، اندازه ذرات تقریباً ۱۶ نانومتر است. پیک پهن دیده شده با مرکزیت  $2\theta=22$  مربوط به حضور پلی‌آنیلین در این نانوکامپوزیت است.



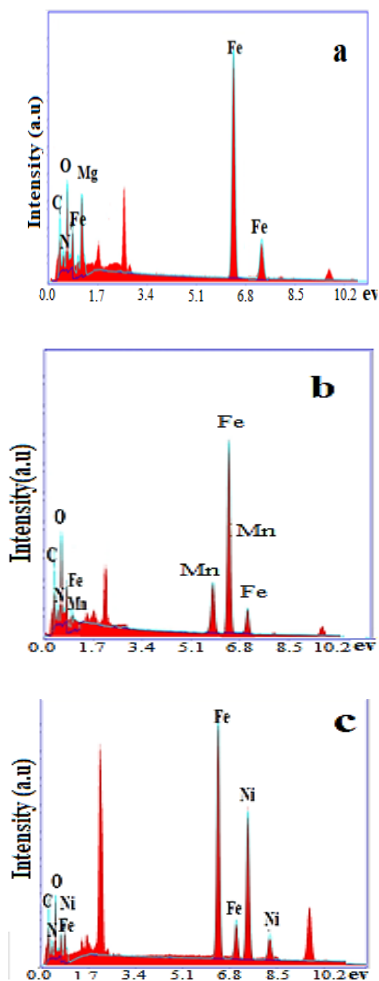
شکل ۲: الگوی XRD (a)  $MnFe_2O_4$  و (b) نانوکامپوزیت  $polyaniline-MnFe_2O_4$

Figure 2: XRD pattern of (a)  $MnFe_2O_4$  and (b)  $polyaniline-MnFe_2O_4$ .



شکل ۳. الگوی XRD (a)  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  و (b) نانوکامپوزیت  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$ .

Figure 3: XRD pattern of (a)  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  and (b)  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$ .



شکل ۴: نتایج EDX (a)  $\text{polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$ ، (b)  $\text{polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$ ، (c)  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ .

Figure 4: EDS spectrum of (a)  $\text{polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$ , (b)  $\text{polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$  and (c)  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$ .

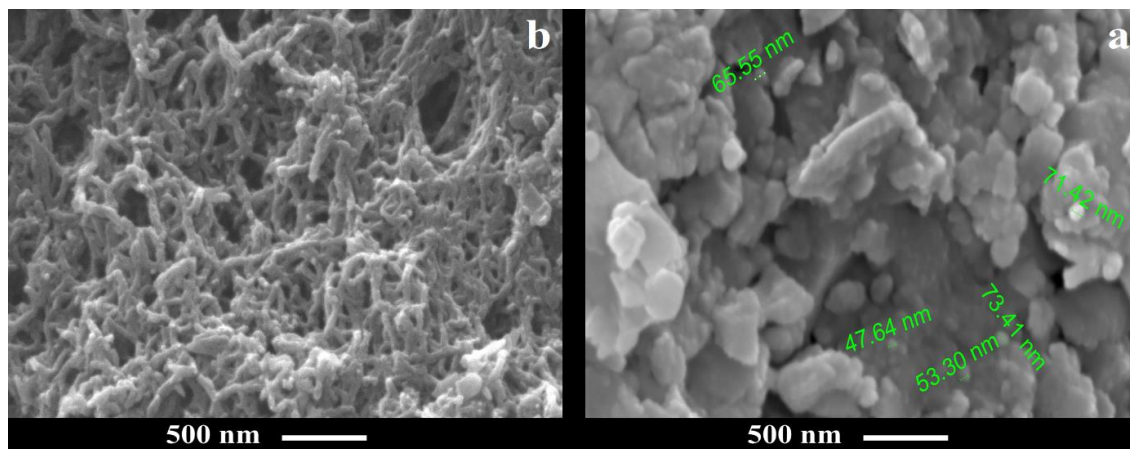
۳-۱-۲- نتایج حاصل از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نتایج آنالیز عنصری نانوکامپوزیت‌های  $\text{polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$ ،  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$  توسط روش EDX در شکل ۴ دیده می‌شود. این آنالیز به خوبی موید سنتز موفقیت آمیز نانوکامپوزیت‌ها است. لازم به ذکر است که پیک موجود در ناحیه حدود ۲٫۶ کیلو الکترون ولت مربوط به طلا است. زیرا روی سطح نمونه‌ها قبل از آنالیز یک لایه طلا برای ایجاد هدایت نشانده می‌شود.

### ۳-۱-۳- نتایج تصاویر SEM

ریزساختار پودر نانوذرات  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  با استفاده از میکروگراف‌های SEM در شکل ۵a در دو مقیاس ۵۰۰ نانومتر نشان داده شده است. این میکروگراف‌ها وجود ذراتی را نشان می‌دهند که دارای توزیع ذرات یکنواخت است و به اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. در شکل ۵b، میکروگراف  $\text{polyaniline-MgFe}_2\text{O}_4$  دیده می‌شود که به خوبی تشکیل شدن پلیمر پلی‌آنیلین را به نمایش گذاشته است.

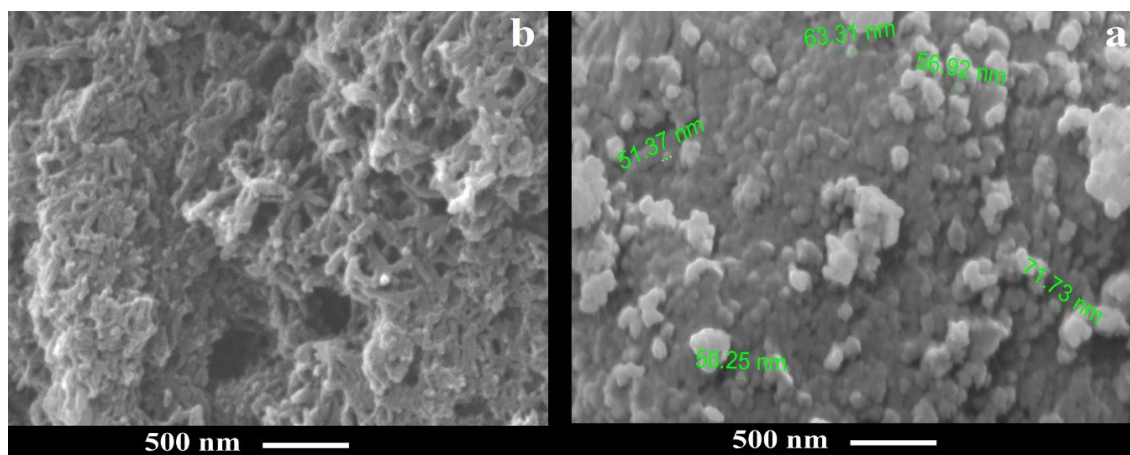
شکل ۶a تصاویر SEM نانوذرات  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  را در مقیاس ۵۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، میکروگراف‌های SEM این مواد مغناطیسی نشانگر آگلومره‌های کروی نامنظم هستند که میانگین سایز آنها حدود ۵۵ نانومتر است. در شکل ۶b، تصاویر SEM نانوکامپوزیت  $\text{polyaniline-MnFe}_2\text{O}_4$  در مقیاس ۵۰۰ نانومتر دیده می‌شود که نشانگر این است که پلیمر پلی‌آنیلین به خوبی نانوذرات را پوشش داده است.

تصاویر SEM مربوط به  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$  به ترتیب در شکل ۷a و ۷b نشان داده شده است. اندازه ذرات  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  زیر ۱۰۰ نانومتر است که نشان می‌دهد  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  در مقیاس نانو سنتز شده است و تصاویر SEM نانوکامپوزیت  $\text{polyaniline-NiFe}_2\text{O}_4$  ساختار همگن این نانوکامپوزیت را نشان می‌دهد.



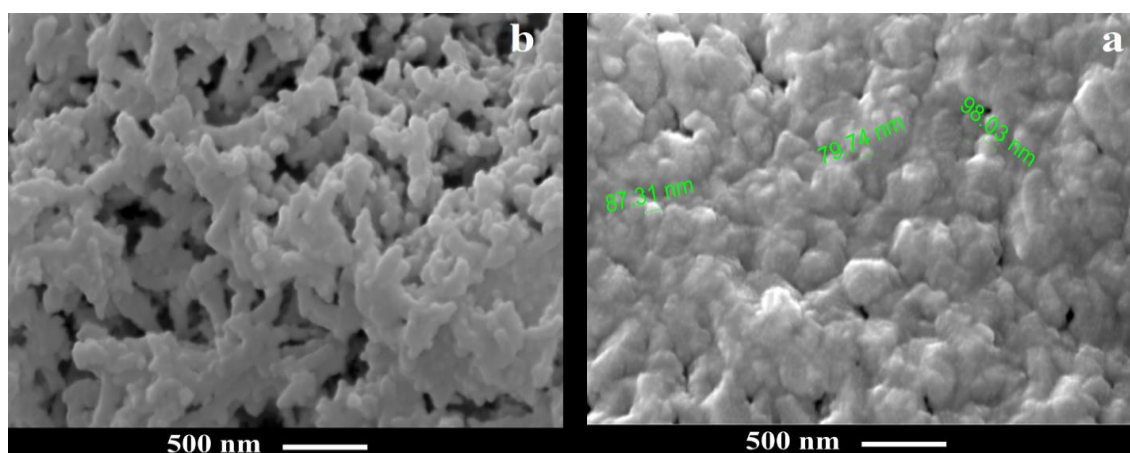
شکل ۵: (a) میکروگراف‌های SEM مربوط به MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (b) میکروگراف‌های SEM مربوط به poly(aniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

Figure 5: SEM micrograph of (a) MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, (b) poly(aniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).



شکل ۶: (a) میکروگراف‌های SEM نانوذرات MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (b) میکروگراف‌های SEM مربوط به poly(aniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

Figure 6: SEM micrograph of (a) MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles, (b) poly(aniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).



شکل ۷: (a) میکروگراف‌های SEM مربوط به NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و (b) میکروگراف‌های SEM مربوط به poly(aniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

Figure 7: SEM micrograph of (a) NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and (b) poly(aniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).



## ۴-۱-۳ نتایج طیف FT-IR

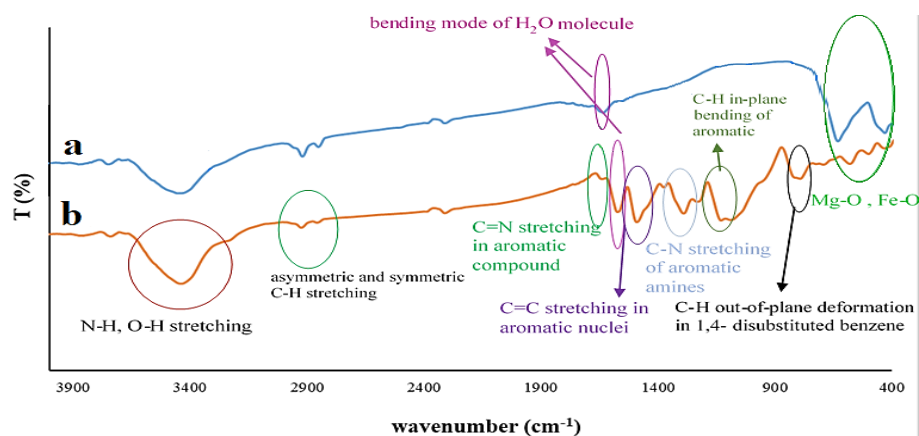
به منظور بررسی گروه‌های عاملی نانوکامپوزیت‌های polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> موفقیت‌آمیز بودن سنتز این نانوکامپوزیت‌ها، طیف FT-IR نانوذرات MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و همچنین نانوکامپوزیت‌های polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ثبت شد که به ترتیب در قسمت a و b شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است. باندهای مشترک در عدد موجی حدود ۳۴۰۰ و ۱۵۵۰ cm<sup>-1</sup> به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی پیوند OH و ارتعاشات خمشی مولکول آب است (۲۹). در طیف FT-IR polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، ارتعاشات مربوط به پوشش پلی‌انیلین از جمله ارتعاشات کششی پیوند دوگانه C=N، ارتعاشات کششی پیوند دوگانه C=C آروماتیکی، ارتعاشات کششی C-N مربوط به آمین آروماتیکی و ارتعاشات خمشی C-H آروماتیکی قابل مشاهده است (۳۰). وجود این باندهای ارتعاشی تایید کننده‌ی سنتز موفقیت‌آمیز نانوذرات مغناطیسی با پوشش پلی‌انیلین است.

## ۲-۳ نتایج حذف رنگ قرمز کنگو توسط نانوکامپوزیت‌های

polyaniiline- و polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

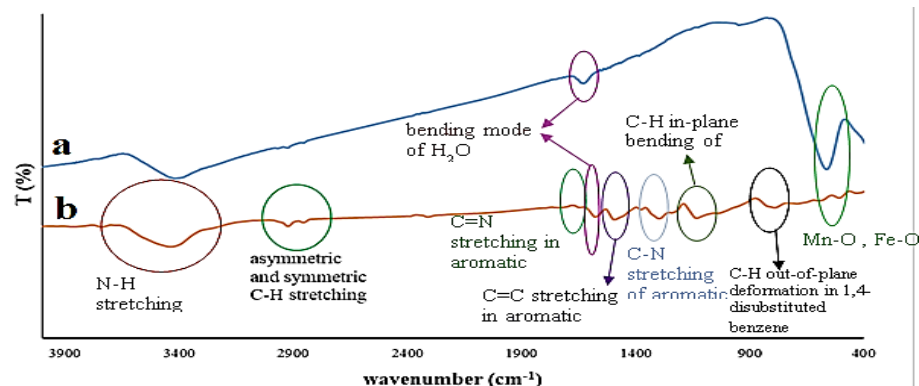
## ۱-۲-۳ تاثیر pH

pH یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر میزان جذب رنگ قرمز کنگو توسط نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی است. اهمیت این فاکتور از آنجا ناشی می‌شود که روی بار سطحی جاذب و همچنین بار رنگ تاثیرگذار است و به دلیل اینکه اولین مرحله حذف رنگ، جذب الکترواستاتیک رنگ روی سطح جاذب است، نوع بار سطحی و میزان آن بر فرآیند حذف رنگ تاثیر مستقیم دارد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید، بیشترین بازده حذف رنگ وقتی رخ داده است که pH برابر با ۷ بوده است. در این pH رنگ دارای بار منفی و جاذب دارای بار مثبت است. در pH های اسیدی و بازی که سطح جاذب به شدت پروتونه یا دپروتونه می‌شود، میزان جذب رنگ روی جاذب به دلیل دافعه الکترواستاتیکی (در pH اسیدی) و یا مزاحمت گروه‌های هیدروکسیل (در pH بازی) کمتر می‌شود (۳۱).



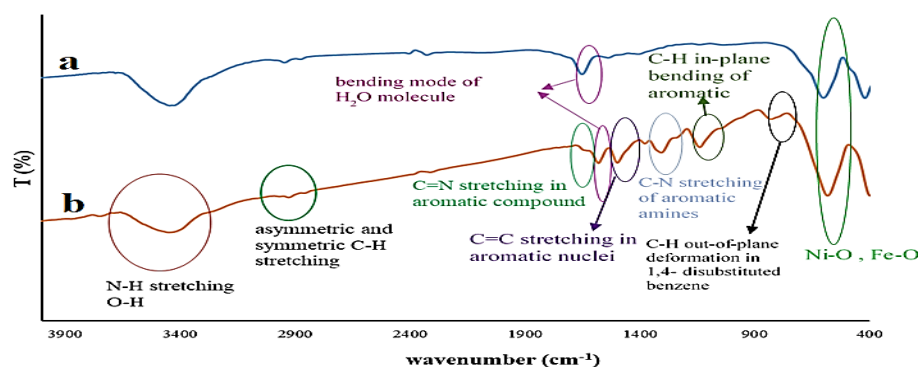
شکل ۸: طیف FT-IR نانوذرات (a) MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و (b) نانوکامپوزیت polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Figure 8: FT-IR spectroscopy of (a) MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and (b) MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite.



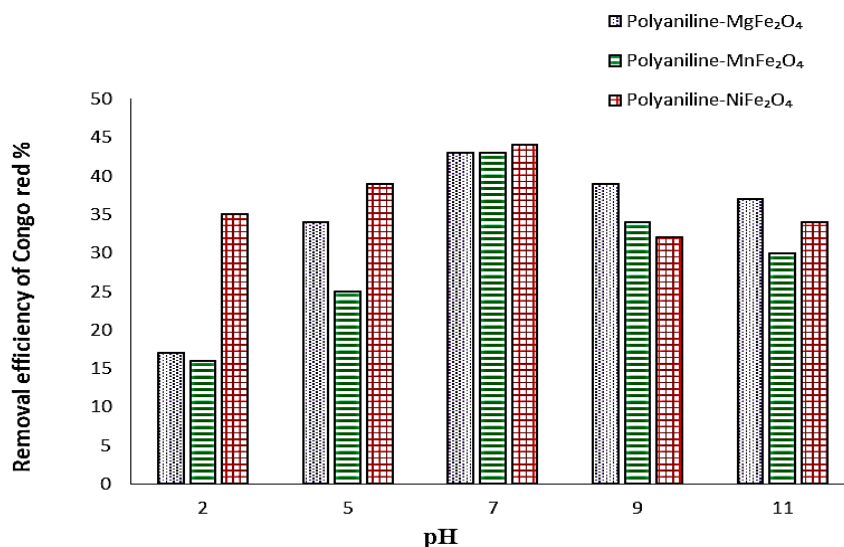
شکل ۹: طیف FT-IR نانوذرات (a) MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و (b) نانوکامپوزیت polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Figure 9: FT-IR spectroscopy of (a) MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano particles and (b) polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano composite.



شکل ۱۰: طیف FT-IR نانوذرات (a) NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و نانوکامپوزیت (b) polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Figure 10: FT-IR spectroscopy of (a) NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles, (b) polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite.



شکل ۱۱: بهینه‌سازی pH برای حذف قرمز کنگو با غلظت ۵۰ ppm توسط نانوکامپوزیت‌های polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در مدت ۳۰ دقیقه.

Figure 11: Optimization of pH to remove CR solution (50 ppm) using polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> after 30min.

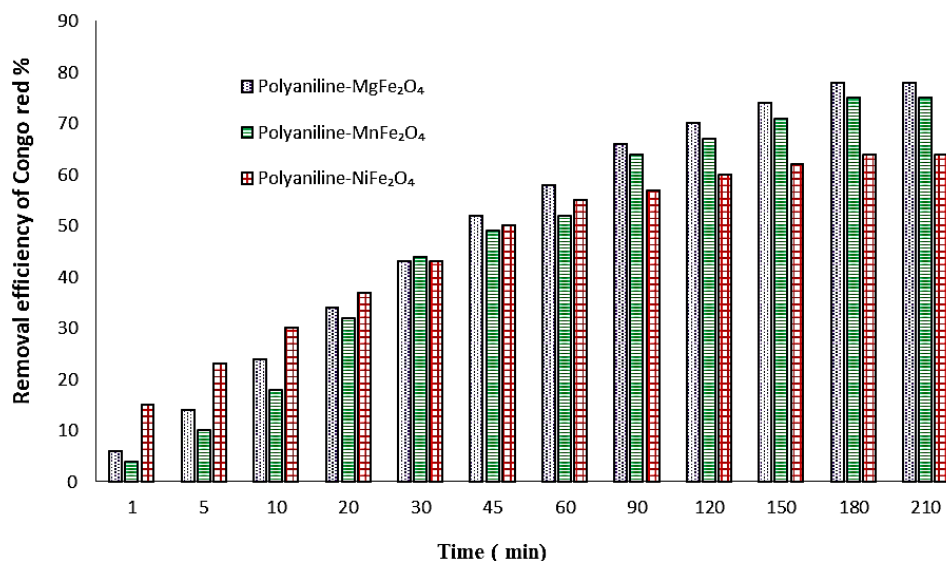
این نتایج بهترین زمان جذب ۱۸۰ دقیقه است که پس از آن تغییرات چشمگیری در بازده حذف دیده نشد. بنابراین زمان بهینه جذب ۱۸۰ دقیقه انتخاب و در آزمایش‌های بعدی اعمال شد.

### ۳-۲-۳- بهینه‌سازی مقدار جاذب

اثر مقدار جاذب به عنوان آخرین پارامتر متغیر و تاثیر گذار بر بازده حذف قرمز کنگو توسط polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل ۱۳ گزارش شده است. طبق شکل ۱۳ با افزایش مقدار جاذب تا ۱۵ میلی‌گرم بازده حذف افزایش یافته است. از آنجا که شیب افزایشی بازده حذف در حوالی این عدد خیلی زیاد نیست می‌توان ۱۵ میلی‌گرم را به عنوان بهترین مقدار جاذب انتخاب کرد.

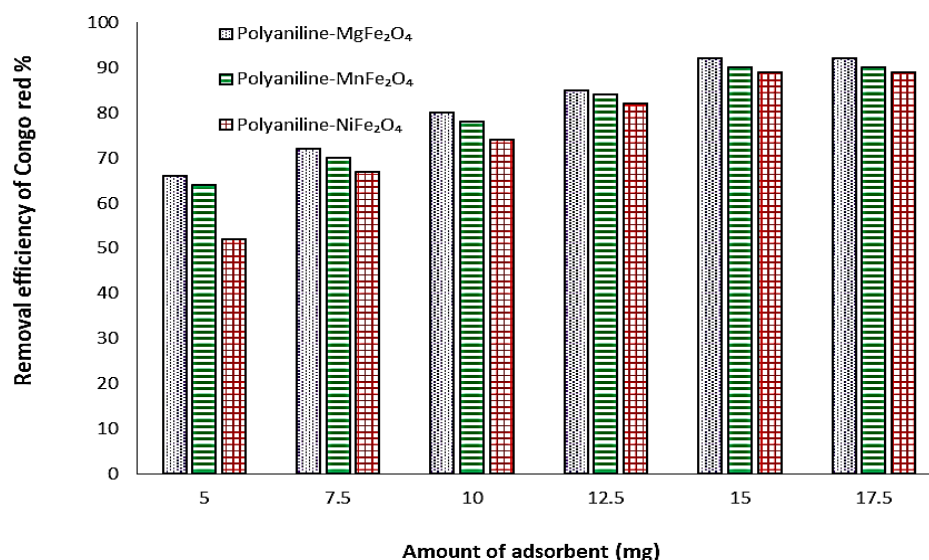
### ۳-۲-۳- بهینه‌سازی زمان جذب

فرآیند جذب یک فرآیند تعادلی است که برای رسیدن به تعادل به مدت زمان مشخصی نیاز دارد. در زمان‌های کمتر از زمان تعادل بازده حذف به بیشترین مقدار خود نمی‌رسد و در زمان‌های بالاتر از زمان تعادل نیز تغییرات چشمگیری در بازده مشاهده نخواهد شد و به عبارتی بازده حذف به مقدار ثابتی خواهد رسید. بنابراین زمان فرآیند جذب باید مورد بررسی قرار بگیرد. نتایج بررسی زمان جذب برای حذف قرمز کنگو توسط polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در شکل ۱۲ آورده شده است. طبق این نتایج هر چه زمان بیشتری به فرآیند جذب داده شده است، میزان شدت جذب طیف مرئی-فرابنفش رنگ کاهش یافته است که این بیانگر افزایش درصد حذف رنگ است. در شکل ۱۲ بازده حذف رنگ در زمان‌های متغیر پس از افزودن جاذب، ارائه شده است. طبق



شکل ۱۲: بهینه‌سازی زمان فرآیند جذب برای حذف قرمز کنگو با غلظت ۵۰ ppm توسط polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Figure 12: Time optimization for adsorption process to remove CR solution (50 ppm) using polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>



شکل ۱۳: بهینه‌سازی مقدار جاذب برای حذف قرمز کنگو با غلظت ۵۰ ppm در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه.

Figure 13: Optimization of the amount of adsorbent to remove CR ((50 ppm) after 180 min.

الکترواستاتیک بین آن و سطح جاذب با پوششی از پلی‌انیلین با بار مثبت، اتفاق می‌افتد و جدا شدن قرمز کنگو از جاذب و به عبارتی بازیابی و احیای جاذب رخ می‌دهد. اثر حضور پوشش پلی‌انیلین در ساختار نانوجاذب‌ها بر حذف قرمز کنگو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است، نشان می‌دهد که حضور پلی‌انیلین در ساختار جاذب اثر بسیار زیادی در فرآیند جذب و بازده

### ۴-۲-۳- بررسی قابلیت بازیافت جاذب‌ها

بازیابی نانوجاذب‌های polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، polyaniiline- MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> توسط محلول اسیدکلریدریک ۱ مولار انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که بازیابی نانوکامپوزیت‌ها تا ۴ مرتبه می‌تواند انجام شود در حالی که افت بازده حذف تنها حدود ۱۷ درصد است. در محیط به شدت اسیدی قرمز کنگو به شکل کاتیونی خود بوده و دافعه

اعداد و ارقام بیانگر این است که نانوجاذب ساخته شده توانایی حذف رنگ در نمونه‌های حقیقی را داشته و در واقع پیچیدگی محتوا اثر مزاحمت چندانی بر فرآیند جذب و بازده حذف قرمز کنگو نداشته است که این مزیت مهمی برای نانوکامپوزیت‌های سنتز شده محسوب می‌شود.

### ۳-۲-۶- سینتیک جذب سطحی

مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم، برای پردازش داده‌های تجربی جذب قرمز کنگو روی کامپوزیت‌های سنتز شده به کار برده شد. جدول ۱ پارامترهای سینتیکی و ضرایب همبستگی حاصل از پردازش مدل‌ها با داده‌های تجربی و شکل ۱۸ نمودارهای مدل‌های سینتیکی را نشان می‌دهد. با توجه به میزان ضرایب همبستگی ( $R^2$ ) برای دو مدل شبه درجه اول و شبه درجه دوم، برای هر سه جاذب بیشترین میزان مطابقت با مدل شبه درجه دوم مشاهده شد.

جذب دارد. بازده حذف قرمز کنگو برای polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در مدت زمان ۹۰ دقیقه به ترتیب برابر ۶۸، ۶۳، ۷۰ و ۵۶، ۶۴ درصد است در حالی که بازده حذف قرمز کنگو برای NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> به ترتیب ۱۰، ۸ و ۹ درصد است. علت رفتار مشاهده شده را باید در مکانیزم فرآیند جذب که سازوکار جاذبه الکترواستاتیکی است، جستجو کرد. در این فرآیند جاذب با پوشش پلی کاتیونی با رنگ آنیونی برهم کنش الکترواستاتیکی از نوع جاذبه داشته و همین جاذبه علت جذب رنگ روی سطح نانوکامپوزیت‌ها خواهد شد.

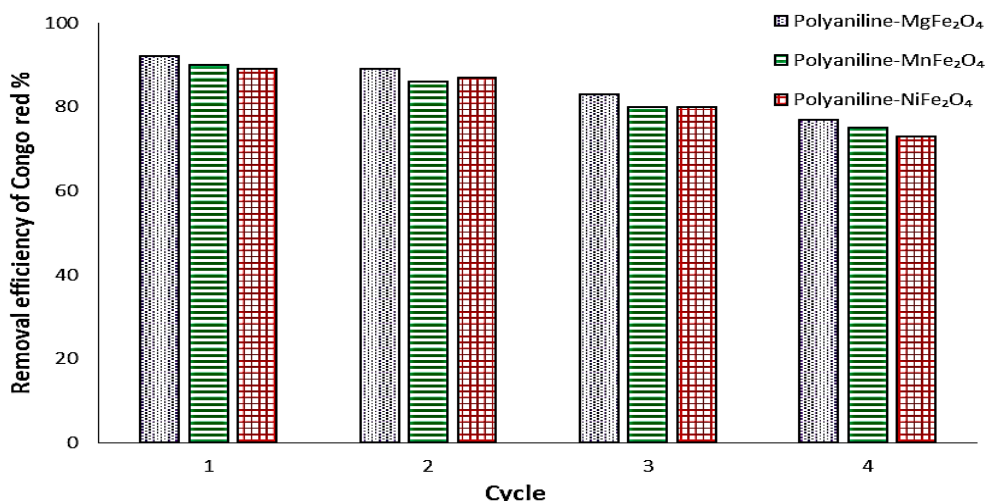
### ۳-۲-۵- بررسی حذف قرمز کنگو از نمونه‌های حقیقی توسط جاذب‌های تهیه شده

اثر محتوای دو نمونه حقیقی از جمله آب چاه و پساب رنگرزی بر فرآیند حذف قرمز کنگو توسط جاذب‌ها بررسی شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۷ آورده شده است. طبق نتایج به دست آمده، بازده حذف قرمز کنگو در آب، آب چاه و پساب رنگرزی تقریباً یکسان است. این

جدول ۱: مشخصه‌های مدل سینتیکی شبه درجه اول و شبه درجه دوم.

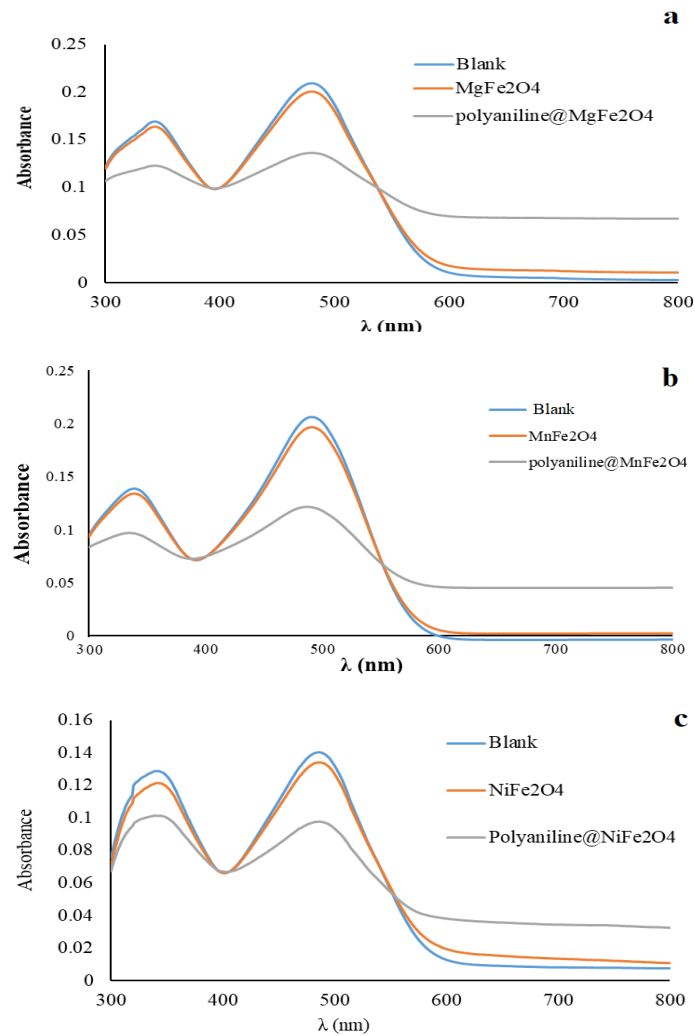
Table 1: Parameters obtained for pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models.

adsorbent	pseudo-first-order			pseudo-second-order		
	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	q <sub>e</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>2</sub>	q <sub>e</sub>
polyaniline - MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.9913	0.0172	163.23	0.9933	1.79*10 <sup>-4</sup>	222.2
polyaniline - MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.988	0.0177	164.02	0.9925	1.73*10 <sup>-4</sup>	222.2
polyaniline - NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.9629	0.0166	102.258	0.9964	4.7*10 <sup>-4</sup>	196.1



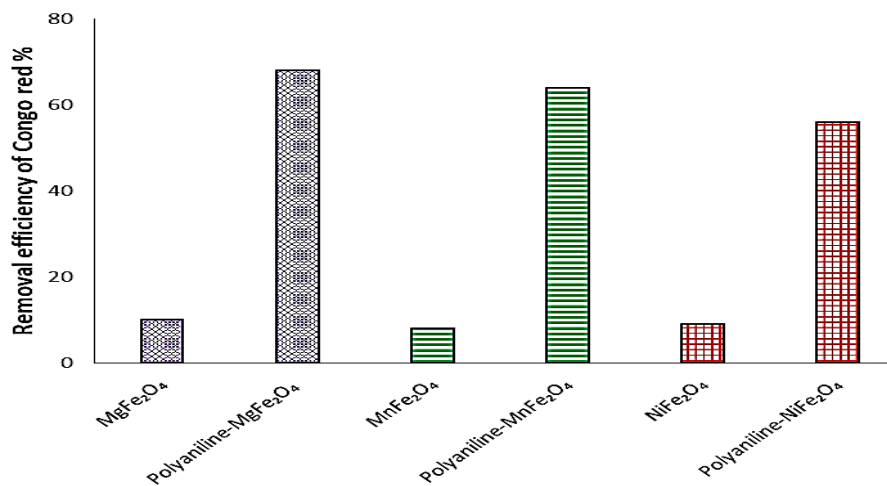
شکل ۱۴: بازیابی نانوجاذب‌های polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Figure 14: Reuse of the polyaniline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and polyaniline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano-adsorbents.



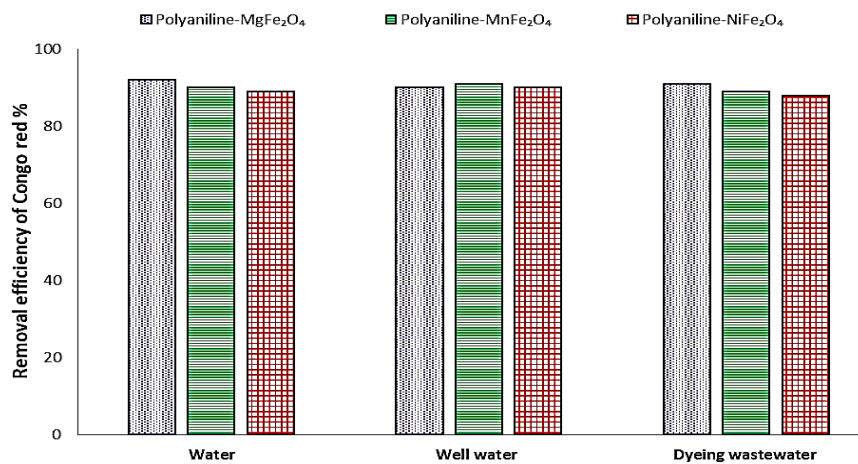
شکل ۱۵: اثر حضور پلی آنیلین در جاذب‌های (a) poly(aniline)-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (b) poly(aniline)-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و (c) poly(aniline)-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در فرآیند جذب قرمز کنگو با غلظت ۵۰ ppm در مدت زمان ۹۰ دقیقه.

Figure 15: Effect of poly(aniline) in (a) poly(aniline)-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, (b) poly(aniline)-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and (c) poly(aniline)-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> adsorbent in CR adsorption process.



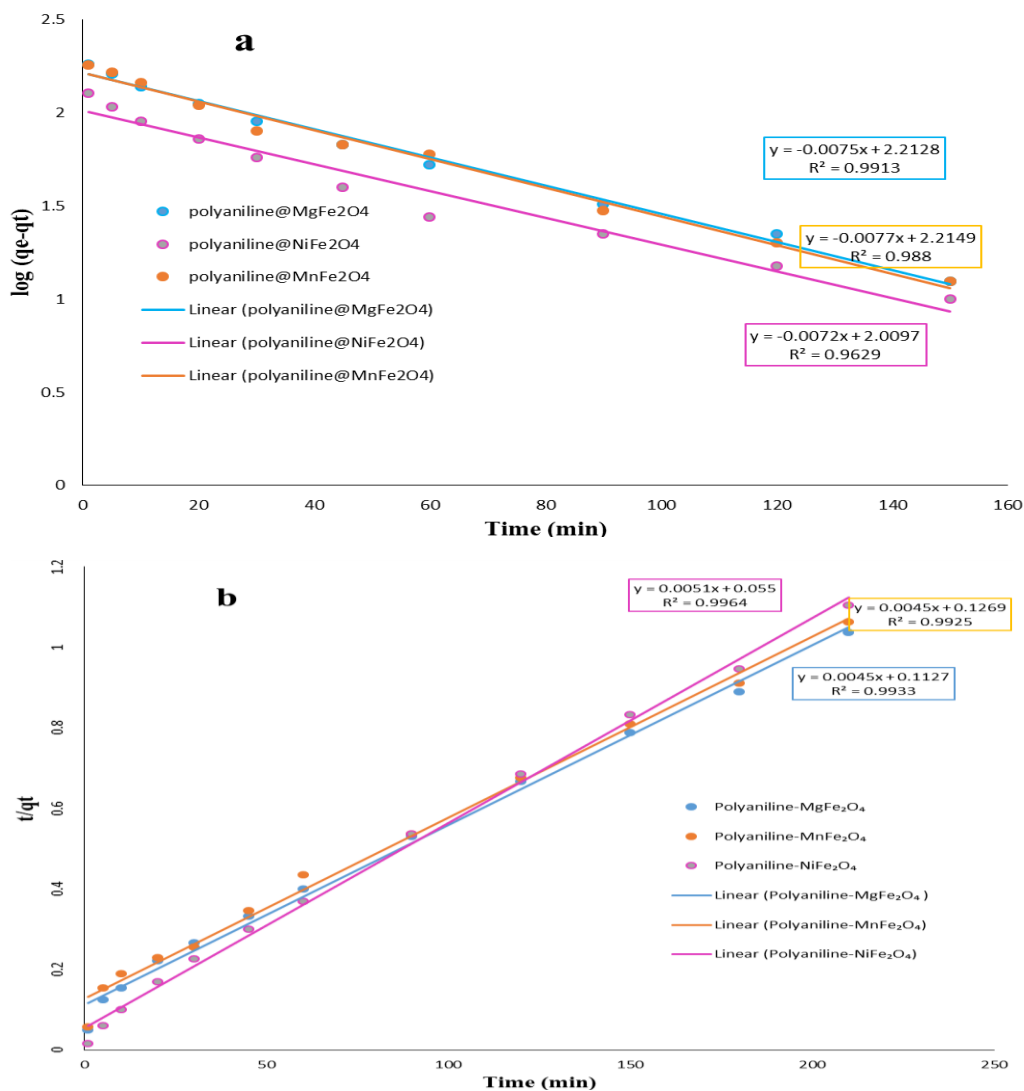
شکل ۱۶: حذف قرمز کنگو با غلظت ۵۰ ppm با ۵ میلی گرم از نانوجاذب‌ها.

Figure 16: The removal of CR (50 ppm) with 5 mg of adsorbents.



شکل ۱۷: حذف رنگ قرمز کنگو توسط کامپوزیت‌های polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، polyaniiline - MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> از پساب رنگرزی و آب چاه.

Figure 17: The removal of CR using polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites from water, well water and dyeing wastewater.



شکل ۱۸: نمودار مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه‌ی اول (a) و شبه مرتبه دوم (b) برای فرآیند جذب قرمز کنگو روی جاذب‌ها.

Figure 18: Pseudo-first-order kinetics (a) and pseudo-second-order kinetics (b) for modeling adsorption of CR on the adsorbents.

دست آمد. مجموعه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سازوکار جذب قرمز کونگو توسط نانوکامپوزیت‌های سنتز شده از نوع جذب فیزیکی می‌باشد. دو خاصیت جذب آب‌دوستی و آب‌گریزی قرمز کونگو، این امر را تایید می‌کند. برهم‌کنش‌های میان گروه‌های سولفات در رنگ قرمز کونگو و گروه‌های فلزی در نانوکامپوزیت و همچنین پیوند هیدروژنی میان گروه آمینی قرمز کونگو و آمین نوع دوم موجود در گروه‌های پلی‌آنیلین که همگی از نوع برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی هستند، فرضیه جذب آب دوستی قرمز کونگو بر روی بستر را تقویت می‌کند. از طرفی دیگر برهم‌کنش‌های  $\pi$ - $\pi$  میان گروه‌های آروماتیکی رنگ و پلی‌آنیلین‌های موجود در جاذب فرضیه جذب آب‌گریزی قرمز کونگو را تقویت می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جذب قرمز کونگو از نوع جذب فیزیکی است (۳۲). در جدول ۳ ظرفیت جذب جاذب‌های سنتز شده در مقایسه با دیگر جاذب‌ها نمایش داده شده که همه دلیلی بر کارآمد بودن این جاذب در حذف رنگ قرمز کونگو است.

### ۳-۲-۷- ایزوترم جذب سطحی

در این مطالعه جذب تعادلی قرمز کونگو توسط polyaniline -  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ، polyaniline- $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  و polyaniline- $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  با استفاده از ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر پارامترهای ایزوترمی و ضرایب همبستگی  $R^2$  محاسبه شده با استفاده از مدل‌های فوق در جدول ۲ آمده است. شکل ۱۹ ایزوترم جذب سطحی قرمز کونگو روی نانوکامپوزیت‌های سنتز شده را نشان می‌دهد. از مقایسه ضرایب همبستگی ( $R^2$ ) داده شده در جدول ۲ و نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۹ می‌توان دریافت که جذب قرمز کونگو روی جاذب‌ها مطابقت خوبی با ایزوترم جذب لانگمویر دارد و یک جذب تک‌لایه روی سطح همگن را نشان می‌دهد. همچنین حداکثر ظرفیت جذب قرمز کونگو با استفاده از رابطه جذب لانگمویر برای polyaniline- $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ، polyaniline- $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  و polyaniline- $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  به ترتیب به ۳۸۴٫۶، ۳۵۷٫۱ و ۳۵۷٫۱ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) به

جدول ۲: ثابت‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ.

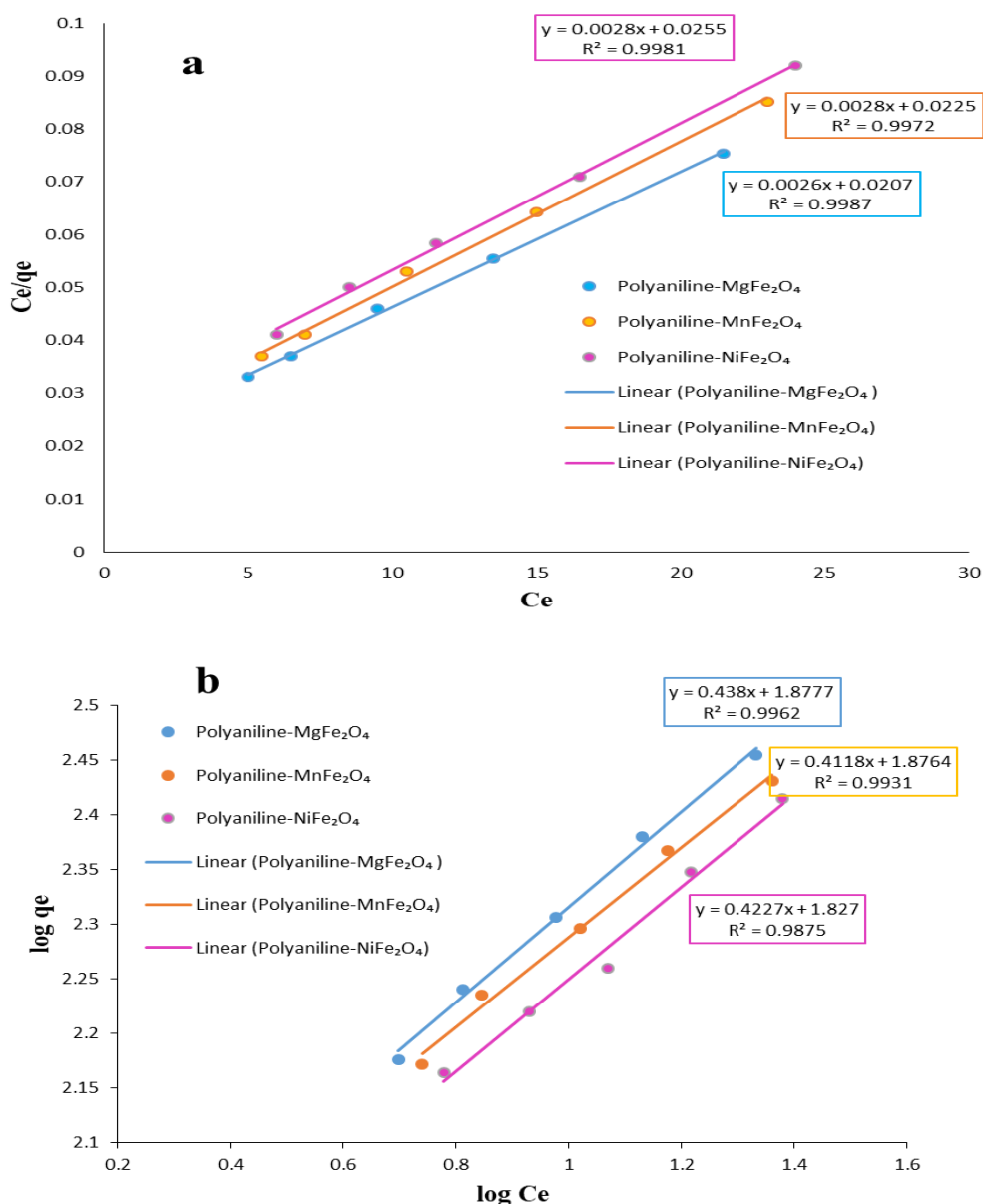
Table 2: The values of Langmuir and Freundlich isotherm constants.

Adsorbent	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$R^2$	$K_L$	$q_{\max}$	$R^2$	$K_f$	n
Polyaniline - $\text{MgFe}_2\text{O}_4$	0.9987	0.126	384.6	0.9962	75.46	2.283
Polyaniline - $\text{MnFe}_2\text{O}_4$	0.9972	0.124	357.1	0.9931	75.23	2.428
Polyaniline - $\text{NiFe}_2\text{O}_4$	0.9981	0.110	357.1	0.9875	67.14	2.366

جدول ۳: مقایسه بیشترین ظرفیت جذب جاذب‌های دیگر با جاذب‌های سنتز شده برای حذف رنگ قرمز کونگو.

Table 3: Comparison of the maximum adsorption capacity of various adsorbents with synthesized adsorbent in CR dye removal.

Adsorbent	$q_{\max}$	ref
Polyaniline - $\text{MgFe}_2\text{O}_4$	384.6	This work
Polyaniline - $\text{MnFe}_2\text{O}_4$	357.1	This work
Polyaniline - $\text{NiFe}_2\text{O}_4$	357.1	This work
$\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ : 1 wt % $\text{Ce}^{3+}$ /Carbon fibers composite	265.20	[33]
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	97.10	[34]
P3ABA/GO/ $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite	153.92	[35]
Polyaniline-zinc titanate (PANI/ZTO) nanocomposite	64.51	[36]
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}/\text{PANI}$	106.4	[37]
$\text{MnFe}_2\text{O}_4$	25.78	[38]



شکل ۱۹: نمودار مدل‌های ایزوترم لانگمویر (a) و فروندلیچ (b) برای فرآیند جذب قرمز کنگو روی جاذب‌ها.

Figure 19: Langmuir isotherm plots (a) and Freundlich isotherm plots (b) for adsorption of CR by the adsorbents.

و مقدار جاذب بهینه شدند. در شرایط بهینه ۱۵ میلی‌گرم از نانوکامپوزیت‌های poly(aniline)-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, poly(aniline)-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و poly(aniline)-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> توانست در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه به ترتیب حدود ۹۰، ۸۹ و ۸۸ درصد از قرمز کنگو با غلظت اولیه ۵۰ ppm را حذف کند. هر سه نانوکامپوزیت قدرت بازیابی با اسید کلریدریک ۱ مولار را داشتند و پس از ۴ چرخه بازیابی حدود ۱۷ درصد از کارایی آنها کاهش یافت. تمام نانوکامپوزیت‌های سنتز شده در این پروژه از آزمون حذف قرمز کنگو از نمونه‌های حقیقی از جمله آب چاه و پساب رنگرزی سربلند بیرون آمدند و نشان دادند که پیچیدگی محتوا

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله فریت فلزهای مختلفی از جمله نیکل، منگنز و منیزیم در ابعاد نانو توسط روش هم‌رسوبی و سل-ژل سنتز شد و سپس توسط پلیمری شدن درجا با پلی‌آنیلین پوشیده شدند. سنتز موفقیت‌آمیز این نانوکامپوزیت‌ها توسط روش‌های متعددی مانند XRD، EDX، SEM و FT-IR تایید شد. نانوکامپوزیت‌های سنتز شده برای حذف قرمز کنگو از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گرفتند. عوامل متغیر و موثر بر فرآیند حذف از جمله pH محلول، زمان جذب



هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مسئولان محترم گروه شیمی دانشکده علوم پایه دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان و دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران و آزمایشگاه‌های مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

اثر چشمگیری بر کارایی آنها ندارد. بررسی‌های تعادل و سنتیک نشان داد که فرآیند جذب به ترتیب از ایزوترم جذب لانگمویر و مدل سنتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. بیشترین ظرفیت جذب قرمز کنگو برای polyaniiline-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، polyaniiline-MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و polyaniiline-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> به ترتیب ۳۸۴،۶، ۳۵۷،۱ و ۳۵۷،۱ (mg.g<sup>-1</sup>) به دست آمد.

### ۵- مراجع

- Ahalya N, Kanamadi RD, Ramachandra TV. Biosorption of chromium (VI) from aqueous solutions by the husk of Bengal gram (*Cicer arietinum*). *Electron J Biotechnol*. 2005;8:52-56. <https://doi.org/10.2225/vol8-issue3-fulltext-10>.
- Ramachandra TV. Spatial analysis and characterization of lentic ecosystems: a case study of Varthur Lake Bangalore. *Int J Ecol Dev*. 2008;9:39-56.
- Suehara K, Kawamoto Y, Fujii E, Kohda J, Nakano Y, Yano T. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. *J Biosci Bioeng*. 2005;100:437-42. <https://doi.org/10.1263/jbb.100.437>.
- Muthukumar M, Selvakumar N. Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation. *Dyes Pigm*. 2004;62:221-28. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.11.002>.
- Du Z, Deng S, Bei Y, Huang Q, Wang B. Adsorption behavior and mechanism of perfluorinated compounds on various adsorbents-A review. *J Hazard Mater*. 2014; 274:443-54. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.038>.
- Randtke SJ. Organic contaminant removal by coagulation and related process combinations. *J Am Water Works Assoc*. 1998;80:40-56. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03037.x>
- Parsazadeh N, Yousefi F, Ghaedi M, Karimi R, Borosan F. Optimization of Disulphine Blue Dye Adsorption Process on ZnO-Cr Loaded on Activated Carbon Using Response Surface Methodology and Modeling by Means of Artificial Neural Network. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*. 2018;37:37-54. [In Persian]
- Purkait MK, Maiti A, Dasgupta S, De S. Removal of congo red using activated carbon and its regeneration. *J Hazard Mater* 2007;145:287-95. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.021>
- Li Y, Lu L, Li X, Chen D, Ma L, Liu R. Fabrication of Magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanorods and Their Removal Performances of Congo Red. *J Nanosci Nanotechnol*. 2016;16:6131-38. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.10842>
- You L, Huang C, Lu F, Wang A, Liu X, Zhang Q. Facile synthesis of high performance porous magnetic chitosan-polyethylenimine polymer composite for Congo red removal. *Int J Biol Macromol*. 2018;107:1620-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.025>
- Li Y, Lu L, Li X, Chen D, Ma L, Liu R. Fabrication of Magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanorods and Their Removal Performances of Congo Red. *J Nanosci Nanotechnol*. 2016;16:6131-88. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.10842>
- He A, Lu R, Wang Y, Xiang J, Li Y, He D. Adsorption Characteristic of Congo Red Onto Magnetic MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Prepared via the Solution Combustion and Gel Calcination Process. *J Nanosci Nanotechnol*. 2017;17:3967-74. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.13091>
- He D, Yu Q, Liu Y, Liu X, Li Y, Liu R. Removal of Congo Red by Magnetic MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanosheets Prepared via a Facile Combustion Process. *J Nanosci Nanotechnol*. 2019;19:2702-09. <http://doi.org/10.1166/jnn.2019.15825>
- Yang H, Han N, Lin Y, Kang P, Zhang G, Wang J. Synthesis and microwave absorbing properties of polyaniiline/ CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ Ba<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.6</sub>TiO<sub>3</sub> composites. *J Mater Sci Mater Electron*. 2016;27:10849-54. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5193-y>
- Kharazi P, Rahimi R, Rabbani M. Copper ferrite-polyaniiline nanocomposite: Structural, thermal, magnetic and dye adsorption properties. *Solid State Sci*. 2019;93:95-100.
- Dasa P, Nisaa S, Debnatha A, Sahab B. Enhanced adsorptive removal of toxic anionic dye by novel magnetic polymeric nanocomposite: optimization of process parameters. *Dispers Sci Technol*. 2022;43:880-95.
- Gabal MA, Al-Juaid AA, El-Rashed S, Hussein MA, Al-Angari YM, Saeed A. Structural, Thermal, Magnetic and Electrical Properties of Polyaniiline/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nano-Composites with Special Reference to the Dye Removal Capability. *J Inorg Organomet Polym*. 2019;29:2197-213
- Mu B, Tang J, Zhang L, Wang A. Preparation, Characterization and Application on Dye Adsorption of a Well-Defined Two-Dimensional Superparamagnetic Clay/ Polyaniiline/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite. *Appl Clay Sci*. 2016;132:7-16.
- Khairy M. Synthesis, characterization, magnetic and electrical properties of polyaniiline/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite. *Synth Met*. 2014;189:34-41. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.12.022>
- Khafagy RM. Synthesis, characterization, magnetic and electrical properties of the novel conductive and magnetic Polyaniiline/MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite having the core-shell structure. *J Alloys Compd*. 2011;509:9849-57. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.07.008>
- Malakootikhah J, Rezayan AH, Negahdari B, Nasserli S, Rastegar H. Porous MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> magnetic glycopolymer: A multivalent nanostructure for efficient removal of bacteria from aqueous solution. *Ecotoxicol. Environ Saf*. 2016;132:7-16.

- 2018;166:277-84.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.086>
22. Yang H, Han N, Lin Y, Kang P, Zhang G, Wang J. Synthesis and microwave absorbing properties of polyaniline/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ba<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.6</sub>TiO<sub>3</sub> composites. *J Mater Sci Mater Electron*. 2016;27:10849-54.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-5193-y>
  23. Mallakpour S, Lormahdiabadi M. Removal of the Anionic Dye Congo Red from an Aqueous Solution Using a Crosslinked Poly(vinyl alcohol)-ZnO-Vitamin M Nanocomposite Film: A Study of the Recent Concerns about Nonlinear and Linear Forms of Isotherms and Kinetics. *Langmuir*. 2022;38:4065-76.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00091>
  24. Si J, Zhang S, Liu X, Fang K. Flower-Shaped Ni/Co MOF with the Highest Adsorption Capacity for Reactive Dyes. *Langmuir*. 2022;38:6004-12.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00184>
  25. Pradeep A, Priyadharsini P, Chandrasekaran G. Sol-gel route of synthesis of nanoparticles of MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and XRD, FTIR and VSM study. *J Magn. Magn. Mater*. 2008;320:2774-79.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.06.012>
  26. Zehang Z, Zhang X, Lu C, Lana L, Yuan G. Polyaniline-decorated cellulose aerogel nanocomposite with strong interfacial adhesion and enhanced photocatalytic activity. *RSC Advances*. 2014;4:8966-72.  
<https://doi.org/10.1039/C3RA46441E>
  27. Hou X, Feng J, Xu X, Zhang M. Synthesis and characterizations of spinel MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanorod by seed-hydrothermal route. *J Alloys Compd*. 2010; 491:258-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.029>
  28. Sivakumar P, Ramesh R, Ramanand A, Ponnusamy S, Muthamizhchelvan C. Synthesis, Studies and Growth Mechanism of Ferromagnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanosheet. *Appl Surf Sci*. 2012; 258:6648-52.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.099>
  29. Bagherzadeh M, Zare M, Salemnoush T, Özkar S, Akbayrak S. Immobilization of dioxomolybdenum(VI) complex bearing salicylidene 2-picoloyl hydrazone on chloropropyl functionalized SBA-15: A highly active, selective and reusable catalyst in olefin epoxidation. *Appl Catal A: Gen*. 2014; 475:55-62.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.01.020>
  30. Tanzifi M, Yarak MT, Kiadehi AD, Hosseini SH, Olazar M, Bhati AK. Adsorption of Amido Black 10B from aqueous solution using polyaniline/SiO<sub>2</sub> nanocomposite: Experimental investigation and artificial neural network modeling. *Colloids Interface Sci Commun*. 2018;510:246-61.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.055>
  31. Purwajanti S, Zhang H, Huang X, Song H, Yang Y, Zhang J. et al. Mesoporous Magnesium Oxide Hollow Spheres as Superior Arsenite Adsorbent: Synthesis and Adsorption Behaviour. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016;38:25306-12.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.6b08322>
  32. Nasar A, Mashkoo F. Application of polyaniline-based adsorbents for dye removal from water and wastewater-a review. *Environ Sci Pollut. Res*. 2019;26:5333-56.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3990-y>
  33. Habibi MK, Rafiaei SM, Alhaji A, Zare M. Synthesis of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: 1 wt % Ce<sup>3+</sup>/Carbon fibers composite and investigation of its adsorption characteristic to remove Congo red dye from aqueous solutions. *J Alloys Compd*. 2021;890:161901-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161901>
  34. Wang L, Li J, Wang Y, Zhao L, Jiang Q. Adsorption capability for Congo red on nanocrystalline MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Mn, Fe, Co, Ni) spinel ferrites. *J Chem Eng*. 2012;181-182:72-79.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.088>
  35. Babakir BAM, Abd Ali LI, Ismail HK. Rapid removal of anionic organic dye from contaminated water using a poly(3-aminobenzoic acid/grapheme oxide/cobalt ferrite) nanocomposite low-cost adsorbent via adsorption techniques. *Arab J Chem*. 2022;15:104318-41.  
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104318>
  36. Singh S, Perween S, Ranjan A. Dramatic enhancement in adsorption of congo red dye in polymer-nanoparticle composite of polyaniline-zinc titanate. *J Environ Chem Eng*. 2021;9:105149-70.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105149>
  37. Zare N, Koojori RK, Abdolmohammadi S, Sadegh-Samiei S. Ultrasonic-assisted synthesis of highly effective visible light Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO/PANI nanocomposite: Thoroughly kinetics and thermodynamic investigations on the Congo red dye decomposition. *J Mol Struct*. 2022; (1250): 131903-131924.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131903>
  38. Yang L, Zhang Y, Liu X, Jiang X, Zhang Z, Zhang T. et al. The investigation of synergistic and competitive interaction between dye Congo red and methyl blue on magnetic MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *J Chem Eng*. 2014;246:88-96.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.044>

#### How to cite this article:

Zare M, Adibian E, Ghasemi E, Ashouri F. Synthesis, Characterization, Adsorptive Properties of Polyaniline@MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M: Mg, Mn, Ni) Magnetic Nanocomposites. *J Color Sci Tech*. 2023;17(2):93-110. DOR:20.1001.1.17358779.1402.17.2.1.2. [In Persian].