



سنتز نانوذرات فریت مس به روش سل ژل خود احتراقی و بررسی ایزوترم‌های جذبی در تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴

مهناز کامل عطارکار^۱، رضا فضاپلی^{۲*}، فرانک منطقی^۳، مهدی قهاری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۱۶۳
۲- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۴۴۳۵
۳- استادیار، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۱۶۳
۴- استادیار، گروه پژوهشی نانو مواد و نانو پوشش‌ها، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۱۴ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

چکیده

نانو ذرات فریت مس به روش سل ژل احتراقی تهیه شدند و به وسیله دستگاه‌های *SEM*، *XRD*، *FT-IR* و *UV-Vis* مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی الگوی *XRD* و طیف *FT-IR*، تشکیل فاز فریت اسپینل را تایید کردند. متوسط اندازه بلوری ذرات توسط رابطه شرر محاسبه شده و ۷۷ نانومتر است. ریخت‌شناسی و اندازه نانو ذرات تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد. انرژی باند گپ ذرات توسط داده‌های *DRS* محاسبه شد. نانو ذرات فریت مس به عنوان کاتالیزور برای تخریب ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ تحت تابش فرابنفش مورد استفاده قرار گرفتند. ایزوترم‌های لانگمویر، تات و فریتز شلاندر در تخریب فوتوکاتالیستی مورد بررسی قرار گرفتند. واژه‌های کلیدی: نانوذرات فریت مس، تخریب فوتوکاتالیستی، ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴، ایزوترم جذب.

Sol Gel Auto Combustion Synthesis of Copper Ferrite Nanoparticles and Study Of Adsorption Isotherms in Photocatalytic Degradation of Direct Red 264

M. Kamel Attar Kar¹, R. Fazaeli^{2*}, F. Manteghi¹, M. Ghahari³

- 1- Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, P.O. Box: 16765-163, Tehran, Iran.
2- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 113-4435, Tehran, Iran.
3- Nanocoating and Nanomaterials Department, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.
Received: 09-02-2017 Accepted: 05-12-2017 Available online: 31-08-2018

Abstract

Copper ferrite nanoparticles were synthesized by sol-gel auto-combustion method and characterized by *XRD*, *SEM*, *FT-IR* and *UV-Vis*. Powder *XRD* analysis and *FT-IR* spectroscopy confirmed the formation of ferrite spinel phase. The crystallite size was calculated to be 77 nm using Scherrer's equation. The morphology and size of the synthesized nanoparticles have been observed by scanning electron microscopy. The energy band gaps were calculated from *DRS* data. Dye degradation of Direct Red 264 was carried out by CuFe_2O_4 as a catalyst under UV lamp. Langmuir, Toth and Fritz-Schlunder isotherms were studied in photocatalytic degradation. *J. Color Sci. Tech.* 11(2018), 297-304©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Copper ferrite nanoparticles, Photocatalytic degradation, Direct red 264, Adsorption isotherm.

۱- مقدمه

روشی ساده، تک مرحله‌ای، سریع و از نظر اقتصادی مفید است که می‌تواند محصولاتی با قابلیت کنترل ساختار، شکل یکنواخت و توزیع اندازه ذرات کم تولید کند [۱۸].

برای به دست آوردن باند گپ از رابطه کوبلکا مونک استفاده شد. به کمک طیف جذبی نور باند گپ مواد را می‌توان تعیین کرد. آنالیز UV-DRS برای مطالعات نوری فریت‌ها به کار می‌رود. به کمک داده‌های انعکاس نوری و رابطه کوبلکا مونک (رابطه ۱)، ضریب جذب نوری (α) محاسبه خواهد شد. در این جا بازتابندگی پراکنده شده با R نشان داده شده است [۱۹].

$$\alpha = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

مطالعه تعادل در سیستم‌های حذف ماده رنگزا از اهمیت ویژه‌ای در بهینه‌سازی شرایط طراحی برخوردار می‌باشد و اطلاعات کافی در مورد داده‌های فیزیکی- شیمیایی و ارزیابی فرآیند حذف ماده رنگزا به عنوان یک واحد عملیاتی فراهم می‌سازد. ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ به‌طور گسترده در حذف آلاینده‌ها از محلول مایع به کار می‌روند، ولی مدل‌ها به این دو ایزوترم محدود نمی‌شوند. ایزوترم‌ها به دو نوع تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای تقسیم می‌شوند که هر یک شامل ایزوترم‌های دو، سه، چهار و پنج متغیری هستند [۲۱، ۲۰].

میشرا و همکارانش سه ایزوترم لانگمویر، فروندلیچ و تمکین را برای حذف سه ماده رنگزای مختلف به کمک نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده، مطالعه و عوامل موثر بر ایزوترم‌ها و ضریب هم‌بستگی هر یک را محاسبه کردند [۲۲]. بلسی و همکارانش حذف ماده رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۵ به وسیله نانو ذرات TiO_2 را به کمک ایزوترم فروندلیچ و لانگمویر بررسی کردند [۲۳]. این مورد به‌وسیله ژانو و همکارانش نیز بررسی شد [۲۴]. چن کاربرد ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ را در حذف ماده رنگزای متیلن آبی با نانو ذرات ایلمینیت به عنوان کاتالیزور بررسی کرد [۲۵]. ژو و همکارانش کاربرد سه ایزوترم لانگمویر، فروندلیچ و دابینین-رادوشکویچ را در حذف مواد رنگزای اسیدی نارنجی ۷ و ۱۰ توسط نانوذرات کیتوسان مغناطیسی اصلاح یافته با اتیلن دی آمین بررسی کردند [۲۶]. شهریاری و همکارانش چهار مدل ایزوترم لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و سیپس را برای مطالعه حذف رنگزای متیلن آبی به وسیله نانولوله‌های کربنی به کار گرفتند [۲۷]. علمی فرد و همکارانش تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانوذرات CdS و Ag/CdS، به کمک هشت ایزوترم دو متغیری، نه ایزوترم سه متغیری و دو ایزوترم چهار متغیری بررسی کردند [۲۸]. با انجام تحقیقات متعدد ملاحظه شد که تاکنون بررسی آزمایشگاهی بر روی تخریب ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به کمک نانوذرات فریت مس تحت تابش نور فرابنفش و بررسی تاثیر ایزوترم‌ها بر روی این واکنش انجام نشده است. در این پژوهش علاوه بر مطالعه تخریب

امروزه با پیشرفت صنعت، مقدار زیادی از آلوده‌کننده‌های سمی تولید می‌شود. آلاینده‌های سمی شامل مواد آلی و معدنی می‌باشند، که از صنایع نساجی، کاغذسازی، پلاستیک‌سازی و رنگرزی به وجود می‌آیند. رنگ‌ها مقدار زیادی از این آلاینده‌ها را تشکیل می‌دهند و ماده اصلی تشکیل دهنده این رنگ‌ها، مواد رنگزای آزو هستند. مواد رنگزای آزو شامل تنوع زیادی از فام می‌باشند و برخی از آنها محلول در آب هستند. طبیعت سمی و اثرات مضر آن‌ها روی سلامت عمومی یکی از دلایل مهم برای حذف این ترکیبات از آب‌های آلوده می‌باشد. برای از بین بردن این مواد از آب‌های آلوده روش‌های متعددی به کار برده می‌شود. تخریب فوتوکاتالیستی یک روش موثر برای پاک‌سازی آب‌های آلوده شده با آلاینده‌های آلی و معدنی است. در این روش، فوتوکاتالیست که یک نیمه‌رسانای ویژه است تحت تابش نور UV/مربی برانگیخته شده و رادیکال‌های آزاد تشکیل می‌شود که منجر به تخریب آلاینده‌های آلی می‌شود. فرآیند فوتوکاتالیستی فواید بسیاری هم چون اکسایش کامل آلاینده‌های آلی، دسترسی کاتالیزورهایی با فعالیت بالا، ارزان و سازگار با طراحی ویژه سیستم‌های راکتوری و اکسید کردن آلاینده‌هایی در محدوده میکروگرم در لیتر را دارد. مشکل اصلی در این روش جداسازی کاتالیزور از محلول آبی پس از فرآیند تخریب ماده رنگزا است [۶-۱].

اخیراً، ترکیبات مغناطیسی برای تخریب مواد رنگزا از آب‌های آلوده به کار برده می‌شوند. مواد مغناطیسی می‌توانند توسط یک میدان مغناطیسی خارجی جداسازی شوند. نانوذرات فریت به چند دلیل برای تخریب مواد رنگزا مناسب می‌باشند که از جمله این دلایل می‌توان موارد زیر را عنوان کرد: فریت‌ها دارای خواص مغناطیسی هستند که به کمک آن می‌توان جداسازی و استفاده مجدد پس از فرآیند تخریب ماده رنگزا را انجام داد، باند گپ پایین برای جذب کردن نور دارند و محل‌های کاتالیزوری چندگانه برای جذب مواد رنگزا دارند [۸، ۷].

فریت مس به علت خواص ویژه‌ای هم‌چون خواص مغناطیسی، الکتریکی، حرارتی و کاتالیزوری یکی از مهم‌ترین فریت‌های مغناطیسی به شمار می‌رود. این فریت در محدوده وسیعی از کاربردهای متفاوت، هم‌چون کاربردهای کاتالیزوری، حس‌گرهای گازی، فروفلوئید و غیره به کار می‌رود. $CuFe_2O_4$ ساختار اسپینل مکعبی دارد. مقدار باند گپ گزارش شده برای این ترکیب در محدوده ۳،۰۹-۱،۴۲ eV است. با افزایش دمای کلسیناسیون باند گپ کاهش می‌یابد هم‌چنین با کوچک‌تر شدن ذرات، باند گپ آنها رشد کرده و بزرگ‌تر می‌شود [۹-۱۱].

نانوذرات فریت توسط روش‌های گوناگونی از جمله هم‌رسوبی، سل ژل، سولوترمال، هیدروترمال، الکتروشیمیایی و سل ژل احتراقی تهیه می‌شوند [۱۷-۱۲]. در بین این روش‌ها، سل ژل خود احتراقی

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق برای تهیه نانو فریت مس از نیترات آهن (خلوص ۹۹٪)، نیترات مس (خلوص ۹۸٪)، سیتریک اسید (خلوص ۹۸٪) و آمونیاک (خلوص ۳۰٪) تهیه شده از شرکت مرک و برای انجام تخریب فوتوکاتالیستی از هیدروژن پراکسید (خلوص ۳۰٪) و ماده رنگزای آزو قرمز مستقیم ۲۶۴ با فرمول مولکولی $C_{39}H_{27}N_6Na_3O_{12}S_3$ تهیه شده از شرکت سیگما-آلد ریچ استفاده شد و در تمامی مراحل آب دی‌یونیزه به کار برده شد.

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

نانو پودرهای سنتز شده به‌وسیله دستگاه پراش پرتو X (مدل X'Pert Philips MPD) مشخص شدند. متوسط اندازه بلوری ذرات توسط بکارگیری رابطه دبای شرر به دست آمد (رابطه ۷).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (7)$$

در این جا λ طول موج تابش (برای لامپ مسی ۰٫۱۵۴۰۶ نانومتر)، $K=0.89$ و θ زاویه براگ در نظر گرفته شده است [۳۰]. شکل و اندازه نانو ذرات به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, LEO 1455VP) مشخص شدند. پیوندهای شیمیایی ذرات به‌وسیله طیف‌سنجی زیر قرمز (FT-IR, Perkin-Elmer) مشخص شدند. باند گپ نانو ذرات فریت با به دست آوردن DRS ترکیب به کمک دستگاه UV-Vis Instrument (Perkin-Elmer) و داده‌های جذبی به کمک دستگاه UV-Vis Instrument (UVIKON 923) تعیین شدند.

۲-۳- تهیه کاتالیزور

مقدار مناسب از نیترات‌های فلزی و اسید سیتریک در حداقل مقدار از آب دی‌یونیزه با هم مخلوط شد. نسبت مولی نیترات‌ها به اسید سیتریک ۱:۱ در نظر گرفته شد. به منظور این‌که pH محلول خنثی بماند (≈۷) مقداری آمونیاک به سیستم اضافه شد. سپس محلول به مدت ۱ ساعت به کمک هم‌زن مخلوط شده و در دمای $80^\circ C$ حرارت داده شد تا به زروژل (ژلی که تمام مایع درون حفره‌ها خالی شده است و ساختاری متراکم‌تر و فشرده‌تر و چروکیده‌تر نسبت به ژل خیس دارد) تبدیل شود. در ادامه ژل در دمای $300^\circ C$ در معرض هوا حرارت داده شد تا فرآیند احتراق انجام شود. وقتی که نقاط روشنی در محلول مشاهده شد، ژل طی فرآیند گسترش خود به خودی احتراق سوخته و این فرآیند تا زمانی که تمام ژل بسوزد و به طور کامل به پودر سبک و حجیم تبدیل شود، ادامه پیدا کرد. در طی فرآیند احتراق مقدار زیادی از گاز آزاد شده و پودر حجیم و سبکی به سرعت تشکیل شد. این پودر در دمای $800^\circ C$ به مدت ۲

ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ توسط نانوذرات فریت مس به عنوان کاتالیزور، به بررسی کاربرد سه ایزوترم لانگمویر (دو متغیری)، تات (سه متغیری) و فریتز-شلاندر (چهار متغیری) بر این واکنش پرداخته شده است و در پژوهش‌های آینده به مقایسه تاثیر نور فرابنفش و مرئی پرداخته می‌شود. در ادامه معرفی سه ایزوترم مورد استفاده در این تحقیق انجام می‌شود.

مدل لانگمویر (ایزوترم دو متغیری): در مورد مدل لانگمویر می‌توان همگنی سطح، جذب یکنواخت در هر محل و جذب تک لایه‌ای را در نظر گرفت. b_L ثابت تعادلی لانگمویر است (L/mg) که تمایل آلاینده را به جذب شدن روی سطوح فعال در سطح جاذب نشان می‌دهد. مقدار بزرگ‌تر b_L نشان دهنده انرژی جذب بیشتر است (رابطه ۲).

$$q_e = \frac{q_m b_L C_e}{1 + b_L C_e} \quad (2)$$

مدل ایزوترم تات (ایزوترم سه پارامتری): مشکل ایزوترم لانگمویر این است که مقدار انحراف داده‌های آزمایشگاهی و مقدار پیش‌گویی شده بزرگ است. مدل ایزوترم تات، یک رابطه تجربی و مفید برای توصیف سیستم‌های جذبی ناهمگن است. k_T (mg/g) و α_T (l/mg) ثابت‌های ایزوترمی تات هستند، و Z توان مدل است. پارامتر Z ناهمگنی سیستم را نمایش می‌دهد و $1/Z$ بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد. در جایی که $Z=1$ ، ایزوترم تات به رابطه لانگمویر تبدیل می‌شود (رابطه ۳).

$$q_e = \frac{k_T C_e}{(\alpha_T + C_e^Z)^{1/Z}} \quad (3)$$

مدل ایزوترم فریتز شلاندر (ایزوترم چهار متغیری): رابطه فریتز شلاندر یک مدل ایزوترم چهار متغیری است. این معادله به‌وسیله فریتز و شلاندر از طریق تجربی پیشرفت کرد. داده‌های آزمایشگاهی تعادل به‌وسیله مدل‌های چهار متغیری و مدل فریتز شلاندر آنالیز شدند. C و D متغیرهای فریتز شلاندر هستند. α_{FS} و F_{SB} توان‌ها هستند (رابطه ۴) [۵].

$$q_e = \frac{C_e^{\alpha_{FS}}}{1 + D.C_e^{\beta_{FS}}} \quad (4)$$

در این تحقیق نانو ذرات فریت مس به روش سل ژل احتراقی تهیه شدند و در تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ تحت تابش فرابنفش مورد استفاده قرار گرفتند. ایزوترم‌های لانگمویر، تات و فریتز شلاندر در تخریب فوتوکاتالیستی مورد بررسی قرار گرفتند.

ریخته شد. سپس ۱۰ میلی لیتر از H_2O_2 (۱، ۰ مولار) به محلول اضافه شده و محلول تحت تابش نور فرابنفش قرار گرفت. نمونه گیری از محلول پس از ۲ ساعت انجام گرفت و غلظت نهایی محلول محاسبه گردید.

جرم آلاینده جذب شده در هر واحد از جرم جذب شده (q_e) به کمک رابطه ۶ محاسبه شده است.

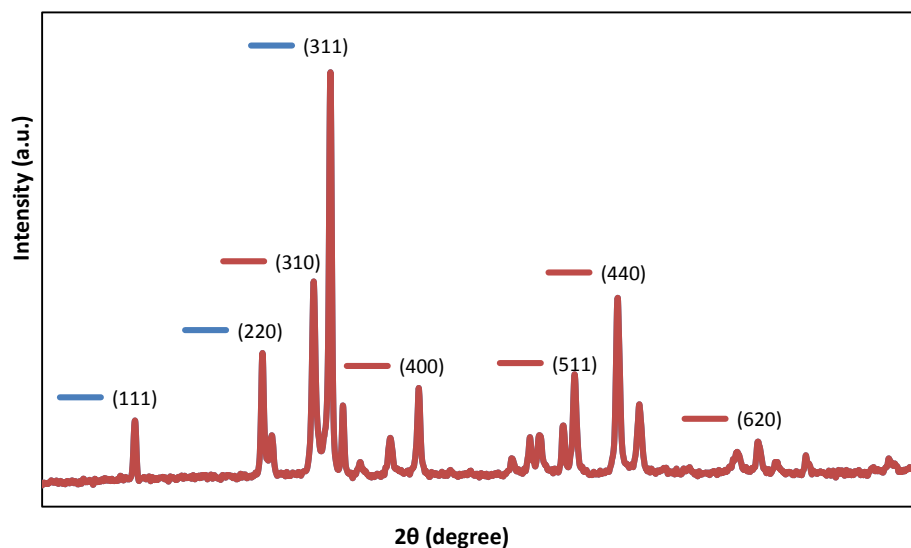
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (6)$$

که در این جا C_0 غلظت اولیه، C_e غلظت نهایی، V حجم محلول بر حسب لیتر و W مقدار کاتالیزور بر حسب گرم است. با رسم نمودار q_e بر حسب C_e می توان فهمید که جذب تک لایه ای یا چند لایه ای است [۲۳].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی فازی

الگوی XRD در شکل ۱ نمایش داده شده است. با مقایسه این الگو با ICDD کارت با شماره ۰۶-۰۵۴۵، تشکیل فریت با ساختار اسپینل مورد تایید قرار گرفت. در این جا اندازه بلور ذرات با به کارگیری رابطه دبای شرر، ۷۷ نانومتر محاسبه شده است.



شکل ۱: الگوی XRD نانو ذرات فریت مس.

ساعت کلسینه شده تا مواد آلی اضافه در ترکیب حذف شود [۲۸].

۲-۴- رنگ زدایی و تخریب فوتوکاتالیستی

فرآیند رنگ زدایی در آزمایشگاه در سیستم ناپیوسته روی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ تحت پرتو فرابنفش انجام شد. کاتالیزور سنتز شده و H_2O_2 در محلول آبی از ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ حل شدند. محلول تحت تابش لامپ با پرتو فرابنفش قرار گرفت. نمونه گیری از محلول در فواصل زمانی مختلف انجام شد و کاتالیزور به کمک میدان مغناطیسی خارجی جمع آوری شد. طیف سنج UV-Vis برای اندازه گیری غلظت محلول در طول موج ۵۰۱ نانومتر که طول موج بیشینه است، مورد استفاده قرار گرفت. به کمک رابطه ۵ می توان مقدار تخریب را تخمین زد.

$$\text{Degradation} = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \times 100 \quad (5)$$

در اینجا مقدار تخریب با degradation نشان داده شده است و A_0 و A_t جذب اولیه و نهایی محلول هستند [۲۹].

۲-۵- مطالعات ایزوترمی

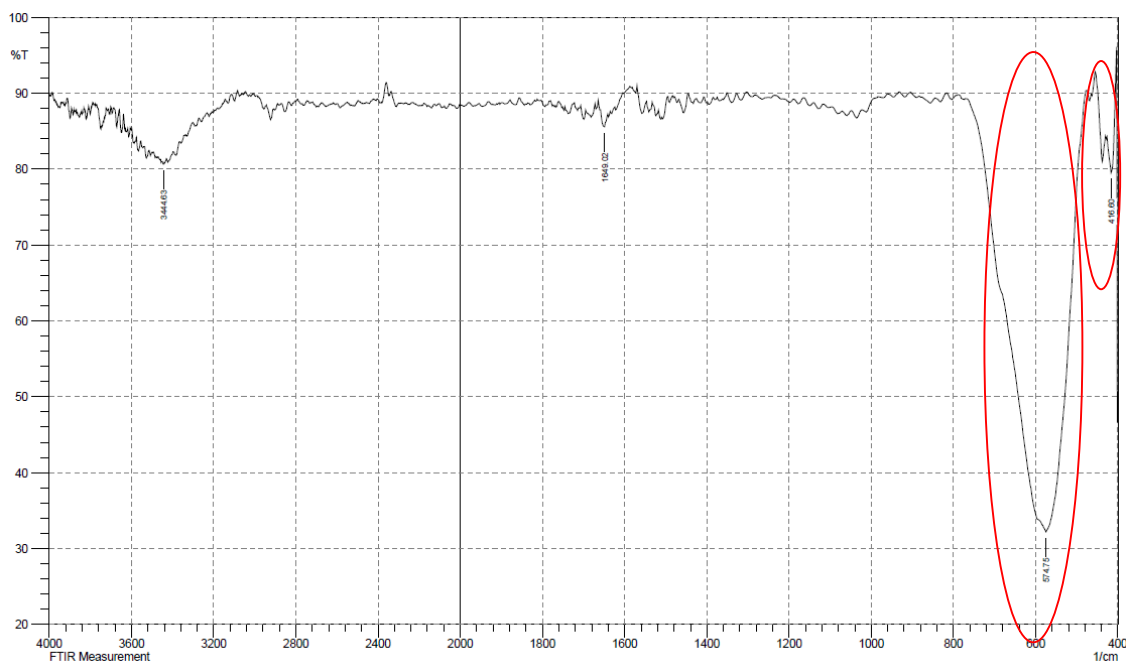
۰،۲ گرم از کاتالیزور سنتز شده در ۱۰۰ میلی لیتر از محلول آبی ماده رنگزای قرمز مستقیم (۲۰-۲۰۰ ppm) حل شده و در سل کوارتز

۲-۲- بررسی پیوندهای شیمیایی

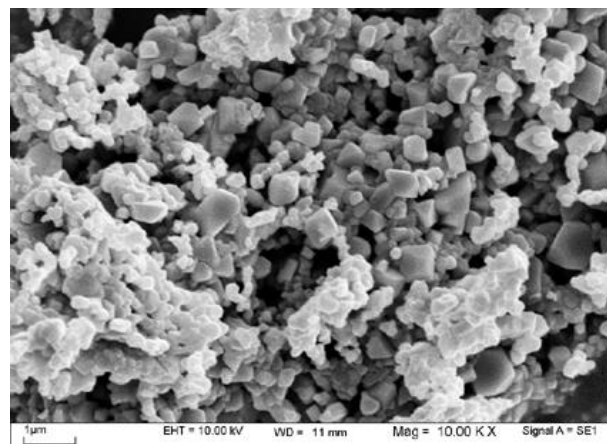
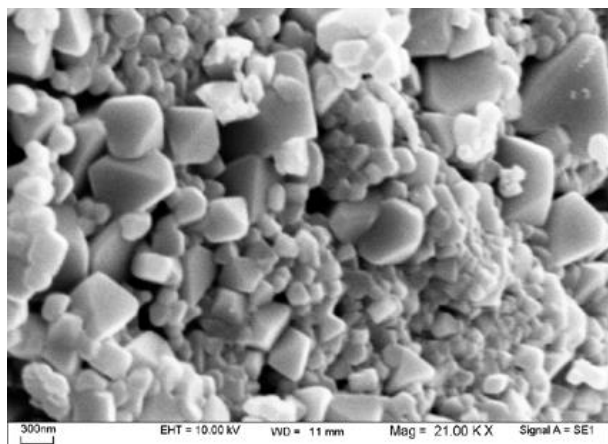
طیف FT-IR نمونه در شکل ۲ نمایش داده شده است. پیوند کمپلکس‌های هشت‌وجهی و چهاروجهی به ترتیب در ۵۴۲ و 463 cm^{-1} قابل مشاهده است. تفاوتی که در موقعیت پیوندها وجود دارد به علت تفاوت در فاصله $\text{O}^{2-}\text{Fe}^{3+}$ در کمپلکس‌های هشت‌وجهی و چهاروجهی است. واضح است که ارتعاش ذاتی خوشه‌های چهار وجهی بالاتر از خوشه‌های هشت‌وجهی است که ممکن است به علت این باشد که خوشه‌های چهاروجهی طول پیوند کوتاه‌تری از خوشه‌های هشت‌وجهی دارند [۳۱].

۳-۳- بررسی ریزساختاری

تصاویر SEM نانوفریت در شکل ۳ نشان داده شده است. واضح است که در این تصاویر نمونه دارای ذرات هرمی است. میانگین اندازه ذرات توسط تصاویر SEM در حدود ۵۰-۲۵۰ نانومتر تخمین زده شده است. در مقایسه با دیگر ذرات، نانوذرات فریت به صورت ذرات جدای از هم، دارای ساختار هرمی و بلورهایی که به طور یکنواخت توزیع شده‌اند، است.



شکل ۲: طیف FT-IR نانو ذرات فریت مس.



شکل ۳: تصاویر SEM نانوذرات فریت مس.

است. مقدار انرژی باند گپ محاسبه برای این نانوذرت ۱,۷۵ الکترون ولت است که در محدوده داده‌های گزارش شده برای فریت مس است. این مقدار به علت وجود ذرات کوچک فریت مس و دمای بالای کلسینه کردن است.

۳-۵- بررسی تخریب فوتوکاتالیستی

در شکل ۶ منحنی تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانو ذرات فریت به عنوان کاتالیزور نشان داده شده است.

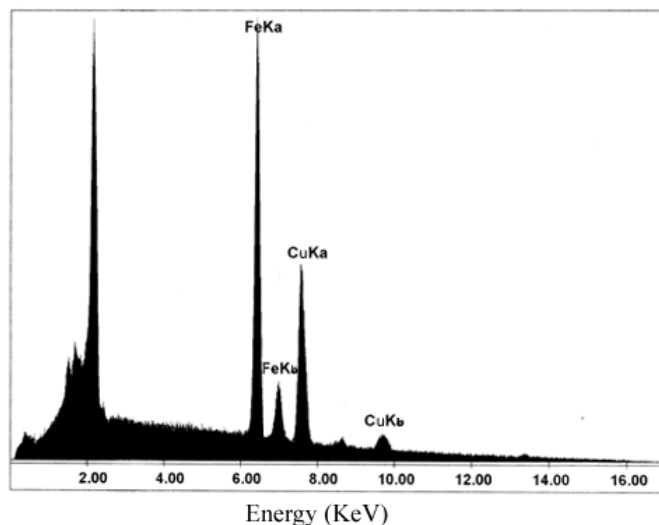
در شکل ۴ آنالیز عنصری EDXA نمونه آورده شده است. با استفاده از آنالیز عنصری EDXA درصد وزنی و فرمول نانو ذرات به دست می‌آید که در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۴- بررسی باند گپ

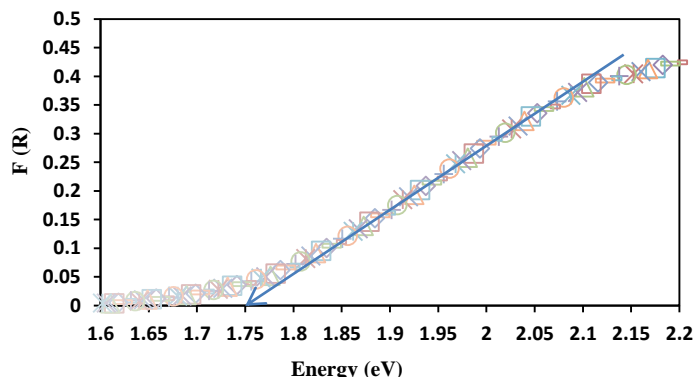
با رسم منحنی $(1-2R)/R$ بر حسب $(eV \cdot hv)$ و برون‌یابی خطی، می‌توان باند گپ نانوذرات را به دست آورد. منحنی منحنی $(1-R)/2R$ نانو ذرات فریت در شکل ۵ نمایش داده شده

جدول ۱: درصد وزنی و فرمول نانو ذره $CuFe_2O_4$.

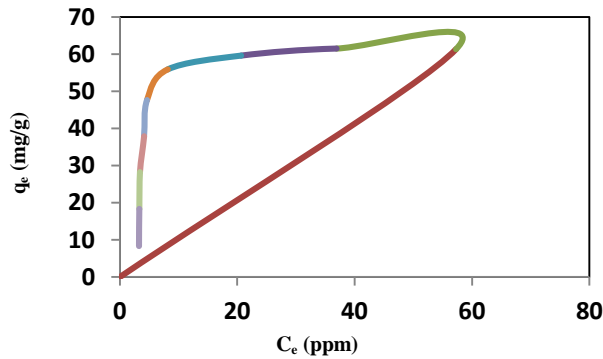
نمونه	درصد وزنی آهن wt%	درصد وزنی مس wt%	فرمول نمونه
$CuFe_2O_4$	۶۴,۰۶	۳۵,۹۴	$Cu_{1.041}Fe_{1.959}O_4$



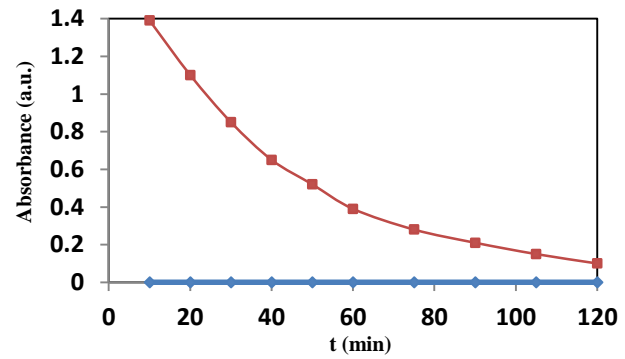
شکل ۴: نمودار آنالیز عنصری EDXA نمونه $CuFe_2O_4$.



شکل ۵: منحنی $(1-2R)/R$ بر حسب $(eV \cdot hv)$ نانوذرات فریت مس.



شکل ۷: نمودار q_e بر حسب C_e را برای تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانو ذرات فریت مس تحت تابش پرتو UV.



شکل ۶: تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانو ذرات فریت مس به عنوان کاتالیزور تحت تابش پرتو UV.

جدول ۲: بررسی ایزوترم‌های دو، سه و چهار پارامتری در تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانو ذرات فریت مس.

عنوان متغیر ایزوترم	مقدار متغیر به دست آمده	ضریب هم‌بستگی (R^2)
ایزوترم لانگمویر (دو متغیری)		
q_m	۷۱,۸۴۹۱	۰,۸۵۴۴
b_L	۰,۱۹۷۱	
ایزوترم تاث (سه متغیری)		
K_T	۶۰,۷۲۱۰	۰,۹۱۵۶
a_T	$۱,۳۷۵۳ \times 10^{-7}$	
Z	۷,۹۹۸۹	
ایزوترم فریتز شلندر (چهار متغیری)		
C	$۱,۶۸۲۶ \times 10^{-2}$	۰,۹۸۱۰
D	۸,۰۵۸۴	
α_{FS}	$۳,۳۹۰۲ \times 10^{-5}$	
β_{FS}	۸,۰۰۲۰	

۳-۶- بررسی مطالعات ایزوترم جذبی

در شکل ۷ نمودار q_e بر حسب C_e را برای تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به وسیله نانو ذرات فریت نمایش داده شده است. این شکل نشان‌دهنده این است که جذب تک لایه‌ای است. ضریب هم‌بستگی یک ابزار مناسب برای تعیین مقدار توزیع جذب، بررسی‌های سیستم جذب سطحی از دید ریاضی و بررسی‌های فرضیه‌های نظری و سازگاری مدل‌های ایزوترمی، است. در این‌جا ضریب هم‌بستگی و عوامل مؤثر مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، تاث و فریتز شلندر توسط رابطه‌های ۲، ۳ و ۴ و به‌کارگیری برنامه curve expert تعیین شدند. در جدول ۲ ضریب هم‌بستگی و متغیرهای به دست آمده مربوط به هر ایزومر را نشان داده شده است. در اینجا مشخص است که ضریب هم‌بستگی ایزوترم فریتز شلندر مقدار بالاتری دارد و در نتیجه تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ به کمک نانو ذرات فریت مس به عنوان کاتالیزور با ایزوترم فریتز شلندر در سازگاری بهتر است.

۴- نتیجه‌گیری

نانوذرات فریت مس به‌کمک روش سل ژل احتراقی با موفقیت سنتز شده و به عنوان کاتالیزور برای تخریب فوتوکاتالیستی ماده رنگزای قرمز مستقیم ۲۶۴ تحت پرتو فرابنفش به کار برده شدند. باند گپ این نانوذرات محاسبه شد و مقدار آن $۱,۷۵ \text{ eV}$ بود که نشان‌دهنده این است که ذرات برای فرآیند کاتالیزوری مناسب هستند. بررسی‌های ایزوترمی روی ایزوترم‌های لانگمویر، تاث و فریتز شلندر انجام شد. مقایسه ضرایب هم‌بستگی نشان‌دهنده این است که فرآیند تخریب فوتوکاتالیستی با ایزوترم فریتز شلندر هم‌خوانی بیشتری دارد.

۵- مراجع

۱. ه. دانشور، م.س. سید دراجی، ع. امانی قدیم، م. ح. رسولی فرد، بررسی رفتار جذبی هیدروکسیدلایه‌ای دوگانه روی کبالت آلومینیم در حذف ماده آلی رنگزا: مدل‌سازی، بهینه‌سازی و مطالعات سینتیک و ایزوترم. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۱۱(۱۳۹۶)، ۲۳۷-۲۲۵.
2. M. Thabet, A. A. El-Zomrawy, Degradation of acid red 17 dye with ammonium persulphate in acidic solution using photoelectrocatalytic methods. *Arabian J. Chem.* 9(2016), 204–208.
3. P. M. Dellamatricea, M. E. Silva-Stenicob, L. A. Beraldo de Moraesc, M. F. Fioreb, R. T. Rosim Monteiro, Degradation of textile dyes by cyanobacteria. *Brazilian J. Microbiol.* 48(2017), 25–31.
4. S. Lalnunhlimi, V. Krishnaswamy, Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. *Brazilian J. Microbiol.* 47(2016), 39–46.
5. N. Elmi Fard, R. Fazaeli, R. Ghiasi, Investigation of band-gap energies of CdS and Ag/CdS nanoparticles, and comparative photocatalytic properties on azo dye degradation under UV and visible light irradiation. *Chem. Eng. Technol.* 39(2015), 149–157.
6. S. Bhukal, S. Bansal, S. Singhal, $\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{1.8-x}\text{O}_4$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) magnetic ferrite nano-particle: Synthesis, characterization and photo-catalytic degradation of methyl orange. *J. Mol. Struct.* 1059(2014), 150–158.
۷. ل. عدل نسب، ل. حیدری، س. اوسطی، آ. پیری صدیق، بررسی حذف رنگدانه‌های آلی از نمونه‌های محیطی با استفاده از سنتز نانوذرات مغناطیسی عامل دارشده با پورفیرین. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۱۰(۱۳۹۵)، ۱۱۶-۱۰۷.
8. P. A. Kumar Reddy, B. Srinivas, V. D. Kumari, M. V. Shankar, M. Subrahmanyam, J. S. Lee, CaFe_2O_4 sensitized hierarchical TiO_2 photo composite for hydrogen production under solar light irradiation. *Chem. Eng. J.* 247(2014), 152–160.
9. L. B. Zakiyah, E. Saion, N. M. Al-Hada, E. Gharibshahi, A. Salem, N. Soltani, S. Gene, Up-scalable synthesis of size-controlled copper ferrite nanocrystals by thermal treatment method. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 40(2015), 564–569.
10. R. Köferstein, T. Walther, D. Hesse, S. G. Ebbinghaus, Crystallite growth, phase transition, magnetic properties, and sintering behaviour of nano- CuFe_2O_4 powders prepared by a combustion-like process. *J. Solid State Chem.* 213(2014), 57–64.
11. R. M. Mohamed, D. L. McKinney, W. M. Sigmund, Enhanced nanocatalysts. *Mater. Sci. Eng.* 73(2012), 1–13.
12. P. Sivakumar, R. Ramesh, A. Ramanand, S. Ponnusamy, C. Muthamizhchelvan, Synthesis and characterization of NiFe_2O_4 nanosheet via polymer assisted co-precipitation method. *Mater. Lett.* 65(2011), 483–485.
13. S. Hcinia, A. Selmib, H. Rahmounic, A. Omria, M. L. Bouazizi, Structural, dielectric and complex impedance properties of $\text{T}_{0.6}\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (T=Ni, Mg) ferrite nanoparticles prepared by sol gel method. *Ceram. Int.* 43(2017), 2529–2536.
14. D. Ni, Z. Lin, P. Xiaoling, W. Xinqing, G. Hongliang, Preparation and characterization of nickel-zinc ferrites by a Solvothermal method. *Rare Met. Mater. Eng.* 44(2015), 2126–2131.
15. A. R. Goldman, J. L. Fredricks, L. A. Estroff, Exploring reaction pathways in the hydrothermal growth of phase-pure bismuth ferrites. *J. Cryst. Growth.* 468(2016), 104–109.
16. E. Mazarío, A. Mayoral, E. Salas, N. Menéndez, P. Herrasti, J. Sánchez-Marcos, Synthesis and characterization of manganese ferrite nanoparticles obtained by electrochemical/chemical method. *Mater. Des.* 111(2016), 646–650.
17. P. Samoila, C. Cojocar, L. Sacarescu, P. Pascariu Dorneanu, A.-A. Domocos, A. Rotaru, Remarkable catalytic properties of rare-earth doped nickel ferrites synthesized by sol-gel auto-combustion with maleic acid as fuel for CWPO of dyes. *Appl. Catal. B.* 202(2017), 21–32.
18. M. S. Khandekara, R. C. Kambale, J. Y. Patil, Y. D. Kolekar, S. S. Suryavanshi, Effect of calcination temperature on the structural and electrical properties of cobalt ferrite synthesized by combustion method. *J. Alloys Compd.* 509(2011), 1861–1865.
19. E. Barajas-Ledesma, M.L. García-Benjume, I. Espitia-Cabrera, M. Ortiz-Gutiérrez, F. J. Espinoza-Beltrán, J. Mostaghimi, M. E. Contreras-García, Determination of the band gap of $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ films as a function of processing parameters. *Mater. Sci. Eng. B.* 174(2010), 71–73.
۲۰. ن. م. محمودی، ب. حیاتی، م. آرام، بررسی ایزوترم و سینتیک رنگبری پساب رنگی نساجی حاوی رنگرهای مستقیم و اسیدی با استفاده از هسته خرما. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۵(۱۳۹۰)، ۳۳۳-۳۲۵.
21. R. Saadi, Z. Saadi, R. Fazaeli, N. Elmi Fard, Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean J. Chem. Eng.* 32(2015), 787–799.
22. K. Mishra, T. Arockiadoss, S. Ramaprabhu, Study of removal of azo dye by functionalized multi walled carbon nanotubes. *Chem. Eng. J.* 162(2010), 1026–1034.
23. V. Belessi, G. Romanosa, N. Boukosa, D. Lambropouloud, C. Trapalis, Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO_2 nanoparticles. *J. Hazard. Mater.* 170(2009), 836–844.
24. M. Zhao, Z. Tang, P. Liu, Removal of methylene blue from aqueous solution with silica nano-sheets derived from vermiculite. *J. Hazard. Mater.* 158(2008), 43–51.
25. Y. H. Chen, Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. *J. Non-Cryst. Solids.* 357(2011), 136–139.
26. L. Zhou, J. Jina, Z. Liub, X. Lianga, C. Shang, Adsorption of acid dyes from aqueous solutions by the ethylenediamine-modified magnetic chitosan nanoparticles. *J. Hazard. Mater.* 185(2011), 1045–1052.
27. Z. Shahyari, A. Soltani Goharrizi, M. Azadi, Experimental study of methylene blue adsorption from aqueous solutions onto carbon nano tubes. *Water Resour. Environ. Eng.* 2(2010), 16–28.
۲۸. س. احمدی، ع. آقایی، ب. افتخار یکتا، سنتز رنگدانه قرمز به روش خوداحتراقی محلول. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۲(۱۳۸۷)، ۷۷-۸۵.
29. M. A. Hassaan, A. E. Nemr, F. F. Madkour, Testing the advanced oxidation processes on the degradation of Direct Blue 86 dye in wastewater. *Egyptian J. Aquat. Res.* 43(2017), 11–19.
30. M. Salavati-Niasari, F. Davar, T. Mahmoudi, A simple route to synthesize nanocrystalline nickel ferrite (NiFe_2O_4) in the presence of octanoic acid as a surfactant. *Polyhedron.* 28(2009), 1455–1458.
31. A. Pradeep, G. Chandrasekaran, FTIR study of Ni, Cu and Zn substituted nano-particles of MgFe_2O_4 . *Mater. Lett.* 60(2006), 371–374.