

تهیه نانو ساختار فریت منیزیم تحت امواج فراصوت و بررسی فعالیت فتوکاتالیستی آن برای حذف متیلن بلو از آب

الهه طعمی¹، یاشار عزیزیان کلاندرق^{۱،۲*}، علی خدایاری³، غلامرضا پیرقلی گیوی²

¹ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

² گروه علوم مهندسی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه فناوری‌های نوین سبلان، نمین، ایران

³ گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این پژوهش، نانوساختار فریت منیزیم به روش فراصوت تهیه شده و برای مطالعه ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی آن از داده‌های حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) و مغناطیس سنج ارتعاشی (VSM) استفاده شده است. الگوی XRD نشان داد که نانوساختار فریت منیزیم با فاز مکعبی اسپینلی سنتز شده است. تصاویر SEM نشان می‌دهند که شکل نانوساختار به صورت تقریباً کروی بوده و اندازه میانگین نانوساختارها در حدود 10-15 نانومتر بوده‌اند. مقدار گاف انرژی نانوساختارهای فریت منیزیم تهیه شده، از طریق طیف جذبی UV-Vis، برابر 2.8 eV به دست آمده است که در مقایسه با حالت توده‌ای آن به مقدار 0.62 eV جابه‌جایی به سمت ناحیه آبی دارد که به دلیل اثر محدود شدگی کوانتومی و حبس الکترون‌ها در فضای کوچک‌تر است. حلقه پسماند به دست آمده از آنالیز VSM برای نمونه نشان می‌دهد که نانوساختار فریت منیزیم در دمای اتاق از خود رفتار پارامغناطیسی نشان می‌دهد.

مقدار بهینه pH برای متیلن آبی برابر 13 بود. شدت و طیف منبع نوری مهندسی شده و موثرترین حالت برای این آزمایش به کار گرفته شده است. نتایج نشان دادند که در مدت زمان 45 دقیقه 99% رنگ توسط نانوساختار فریت منیزیم تخریب می‌شود.

کلیدواژه‌گان: نانوساختار، فریت منیزیم، امواج فراصوت، فعالیت فتوکاتالیستی، متیلن بلو

مقدمه

نانوساختارها به علت واکنش پذیری بالا [3] و خواص منحصر به فرد فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی [4] در حوزه‌های زیست پزشکی [5]، ساخت قطعات الکترونیکی [6]، صنایع غذایی [7]، تصفیه فاضلاب [8] و حسگرها [9] کاربردهای گسترده‌ای دارند. در میان انواع نانوساختارها، نانوساختارهای مغناطیسی به این علت که پس از واکنش به راحتی توسط میدان مغناطیسی خارجی جمع‌آوری می‌شوند بسیار مورد توجه قرار دارند [10].

فناوری نانو شامل تهیه، به کارگیری نانوساختارها، درک خواص فیزیکی جدید به وجود آمده در آنها و کنترل این ویژگی‌ها می‌باشد که در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های علمی و اقتصادی عظیمی در کشورهای مختلف ایجاد کرده است [1]. به طور عمده نانوساختارها تحت عنوان نانوساختارهای سرامیکی، نیمه‌رسانا و فلزی طبقه‌بندی می‌شوند [2].

* نویسنده مسئول: Azizian@uma.ac.ir

رنگ‌ها یکی از متداول‌ترین آلاینده‌های آلی به‌شمار می‌روند [30]. تصفیه فاضلاب حاصل از صنایع و حتی آزمایشگاه‌های علمی به‌دلیل مقاومت رنگ‌ها در برابر عوامل اکسیدکننده و تجزیه فوتونی و زیستی، به‌یک مشکل عمده زیست محیطی تبدیل شده است [31]. متیلن بلو یک رنگ شیمیایی آروماتیکی و دارای وزن مولکولی 319,85 گرم بر مول است. این رنگ کاتیونی محلول در آب بوده و در صنایع نساجی بسیار کاربرد دارد [32]. با توجه به اینکه اغلب رنگ‌ها سمی بوده و کیفیت آب‌های آشامیدنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و موجب مسمومیت شده [33] و اثرات جهشی و سرطان‌زایی روی انسان‌ها می‌گذارند از این‌رو تصفیه پساب حاصل از صنایع به‌منظور حفاظت از انسان‌ها و محیط زیست امری مهم تلقی می‌شود [34].

روش‌های بسیار زیادی به‌منظور حذف رنگ‌های کاتیونی از جمله متیلن بلو مورد بررسی قرار گرفته‌اند [35,36]. با این حال جداسازی عامل حذف‌کننده از آب در این روش‌ها مشکل‌ساز است [37].

نانوذرات مغناطیسی از جمله عوامل مناسب می‌باشند که به‌دلیل قابلیت جداسازی از طریق میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته‌اند [38]. نانو ساختارهای فریت منیزیم به‌دلیل گاف انرژی کوچک، غیرسمی بودن و ظرفیت جذب بالا [39]، به‌عنوان فوتوکاتالیست نور مرئی در تحقیقات بسیاری مورد توجه قرار گرفته‌اند [40].

وانگ و همکاران بعد از سنتز $MgFe_2O_4$ به‌روش حالت جامد، فعالیت فوتوکاتالیستی آن را برای حذف متیلن بلو از آب توسط منابع نوری با طیف‌های طول موجی مختلف، بررسی کردند. آنها بهترین نتیجه را برای طیف شبیه طیف نور خورشید به‌دست آوردند که توسط لامپ زنون با شدت 150 W/m^2 انجام شده بود. آنها مدت زمان لازم برای تخریب 80% متیلن بلو طی مدت 6

فریت‌ها دسته مهمی از نانومواد مغناطیسی به‌شمار می‌روند [11] و به‌گروه اکسیدهای فلزی تعلق دارند [12] فریت‌های اسپینلی از لحاظ ساختار به دو دسته اسپینل نرمال و معکوس طبقه‌بندی می‌شوند. ساختار بلوری فریت‌های اسپینلی به‌صورت مکعبی وجوه پر (fcc) بوده و به‌گروه فضایی Fd-3m تعلق دارند. فرمول کلی آنها به‌صورت AB_2O_4 می‌باشد که در این ساختار A و B به‌ترتیب نشان دهنده جایگاه‌های چهار وجهی و هشت‌وجهی می‌باشند [13].

فریت منیزیم به‌علت کاربردهای گسترده در دستگاه‌های الکترونیکی [14]، سنسورهای گاز [15]، دارورسانی موضعی به‌منظور درمان سرطان در پزشکی [16]، به‌عنوان کاتالیست جهت اکسیداسیون استایرن [17]، از بین بردن ترکیبات آروماتیکی [18] و تجزیه ذرات کربن [19] یکی از مهم‌ترین اکسیدهای مغناطیسی به‌شمار می‌رود.

فریت منیزیم دارای فرمول شیمیایی $MgFe_2O_4$ است. ساختار بلوری فریت منیزیم از نوع اسپینل نرمال و معکوس است، که متشکل از آرایه مکعبی مرکز وجوه پر می‌باشد. در این ساختار کاتیون‌های دو ظرفیتی منیزیم به‌طور مساوی در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی توزیع شده‌اند [20-24].

این فریت جزو مواد مغناطیسی نرم بوده و دارای اشباع مغناطیسی کم و تراوایی مغناطیسی و نیروی وادارندگی و مقاومت الکتریکی بالایی ($\rho=10^2 \Omega m$) است. فریت منیزیم نیم‌رسانای نوع n است و گاف انرژی آن حدود $2/18 \text{ eV}$ می‌باشد [25]. دمای نیل برای این ماده حدود $400^\circ C$ گزارش شده است [26,27].

در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش آلودگی‌های زیست محیطی و اهمیت دسترسی به آب آشامیدنی بهداشتی، تحقیقات بسیاری به‌منظور تصفیه آب‌های آلوده انجام گرفته است [28,29].

ذکر شده برای روش فراصوت، در این پژوهش از این روش برای تهیه نانوذرات فریت منیزیم استفاده شده است. ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی و مغناطیسی این نانوساختار توسط آنالیز SEM، XRD، UV-Vis و VSM بررسی شدند. فعالیت فوتوکاتالیستی نانوساختار فریت منیزیم برای حذف متیلن بلو از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفت.

کارهای آزمایشگاهی

مواد مورد نیاز

در این آزمایش از سولفات منیزیم هفت آبه، آهن (III) کلرید شش آبه، سدیم هیدروکسید، گاز آرگون، و آب دیونیزه استفاده شد.

ابزار و دستگاه‌های مورد نیاز

برای سنتز نانوذرات مگنتیت از دستگاه اولتراسونیک ساخت ایران شرکت فاپن نصیر استفاده شده است. الگوهای پراش اشعه ایکس با دستگاه Philips (X-Pro) (ساخت هلند) با اسکن $1^\circ/\text{min}$ و منبع تولید اشعه ایکس Cu-K α (طول موج 1/54 آنگستروم) در محدوده $2\theta = 10-80^\circ$ گرفته شد. برای بررسی مورفولوژی و اندازه ذرات نانومتری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده با دستگاه LEO 1430VP (ساخت آلمان) استفاده شد. نمودار مغناطیس ارتعاشی نمونه (VSM) توسط دستگاه مغناطیس سنج ساخته شده توسط شرکت مغناطیس دقیق کویر، با میدان مغناطیسی القایی حداکثر 10 kOe تهیه شدند و برای بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. از دستگاه طیف سنجی مرئی-فرابنفش Shimadzu مدل UV-1800 برای بررسی خواص اپتیکی نمونه استفاده شد.

ساعت را توسط مقدار 1 gr/Lit از نانوساختار فریت منیزیم گزارش داده‌اند [41].

مانوهر و همکار فعالیت فوتوکاتالیستی فریت منیزیم با مقادیر آلیش‌های مختلف Zn را تحت نور فرابنفش بررسی کرده‌اند. نتایج گزارش آنها افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی فریت منیزیم را با آلیش Zn نشان داده و باعث تخریب 96% متیلن بلو طی مدت 70 دقیقه بوده است [42].

گروه یو و همکاران فعالیت فوتوکاتالیستی ترکیبات مختلف مانند $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{rGo}$ ، MgFe_2O_4 ، SnS_2 ، $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{rGo}$ و $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{SnS}_2$ را بر روی متیلن بلو بررسی کرده و مشاهده کردند که ترکیب $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{rGo}$ بهترین نتیجه را داشته است. نانوذرات MgFe_2O_4 طی مدت 180 دقیقه دارای 70% و ترکیب $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{rGo}$ در زمان مشابه دارای 80% تخریب متیلن آبی بوده است [43].

گروه لینگ و همکاران فعالیت فوتوکاتالیستی فریت منیزیم را تحت نور مرئی و فرابنفش مطالعه کرده و مشاهده کردند این نانوذرات تحت نور مرئی طی مدت 120 دقیقه دارای 85% و تحت نور فرابنفش طی مدت 60 دقیقه دارای 90% تخریب متیلن بلو بوده‌اند [44].

خواص مغناطیسی و فوتوکاتالیستی نانوذرات مغناطیسی به‌روش سنتز، مدت زمان واکنش، دما و غیره وابسته است [45]. اخیراً روش‌های مختلفی از جمله هیدروترمال [46]، هم‌رسوبی [47]، سل-ژل [48] و فراصوت [49]، میکروویو [50] و مکانوشیمی [51] به‌منظور تهیه نانوساختارهای فریت منیزیم به‌اشکال نانوذره، نانولوله، نانونوار [52]، نانوکره [53] و غیره استفاده شده است.

روش فراصوت به‌علت سهولت طراحی، سرعت و بازده بالا، خلوص فاز و همگنی بالای محصول، نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر بوده است [54]. با توجه به مزایای

تهیه نانوساختار فریت منیزیم

در ابتدا، 25 میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم با غلظت 3 مولار تهیه و به همراه مگنت به داخل بالن سه دهانه منقل گردید. بالن سه دهانه از طریق پایه نگه‌دارنده داخل ظرف محتوی روغن سیلیکون روی هیتر تحت دمای 80 درجه سانتیگراد قرار گرفت. سپس 25 میلی‌لیتر محلول سولفات منیزیم هفت آبه با غلظت 0.2 مولار و 25 میلی‌لیتر محلول کلرید آهن (III) شش آبه با غلظت 0.4 مولار تهیه و با یکدیگر مخلوط شدند. برای تهیه کلیه محلول‌ها از آب دیونیزه اکسیژن‌زدایی شده استفاده شد. در حین انجام فرایند فراصوتی و عبور گاز آرگون از داخل محلول سدیم هیدروکسید، مخلوط محلول‌های سولفات منیزیم و کلرید آهن به صورت قطره‌ای به محلول سدیم هیدروکسید اضافه شدند. محلول نهایی به مدت 45 دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت. رسوب قهوه‌ای به دست آمده سه بار با آب دیونیزه شستشو داده شد، در پایان برای خروج آب از ساختار سطحی نانوساختار، رسوب به دست آمده به مدت یک ساعت تحت دمای 110 C° داخل کوره قرار گرفت.

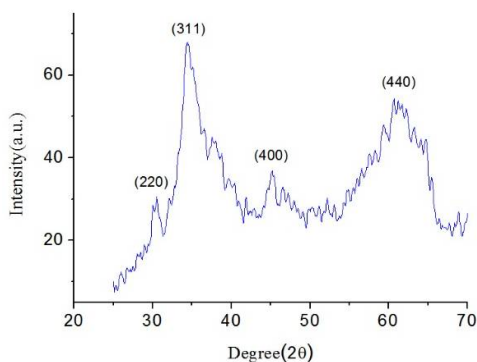
بحث و نتایج

الگوی XRD مربوط به نانوساختار فریت منیزیم تهیه شده به روش فراصوت در شکل 1 نشان داده شده است. حضور صفحاتی با اندیس‌های مایلر (220)، (311)، (400) و (440) دلالت بر تشکیل فاز مکعبی اسپینلی فریت منیزیم با گروه فضایی Fd-3m، پارامتر شبکه Å 8/4 و حجم سلول واحد 592/66 دارد که این الگو با الگوی استاندارد (ICSD 88-1942) مطابقت دارد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به علت عدم کلسینه‌سازی نانوساختارهای فریت منیزیم، الگوی پراش پرتو ایکس شامل همه قله‌های مربوط به ساختار بلوری

فریت منیزیم نبوده و همراه با حضور نوفه و عدم تشکیل فاز خالص اسپینلی می‌باشد که نشانه عدم نظم بلوری کامل در ساختار این نمونه می‌باشد [55-57]. البته پهنای زیاد و شدت کم مربوط به قله‌ها، دلالت بر اندازه کوچک نانوساختارهای فریت منیزیم دارند. اندازه میانگین ریز بلورک های فریت منیزیم توسط رابطه دبای-شرر محاسبه شد که مقدار آن برابر 6 نانومتر بود.

$$L = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad 1$$

در این رابطه λ طول موج پرتو ایکس برابر با 1.54Å ، β پهنای قله‌ها در نصف بیشینه شدت (FWHM) و θ زاویه براگ مربوط به بزرگ‌ترین قله می‌باشد [58]. ریخت‌شناسی ذرات و سطح نانوساختار فریت منیزیم تهیه شده به روش فراصوت توسط تصاویر SEM مورد مطالعه قرار گرفت. شکل 2 تصویر SEM این نانوساختار را با بزرگ‌نمایی 50 هزار برابر نشان می‌دهد.

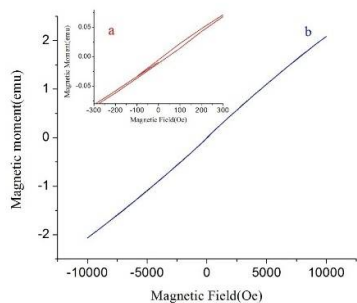


شکل 1. الگوی XRD نانوساختار فریت منیزیم.

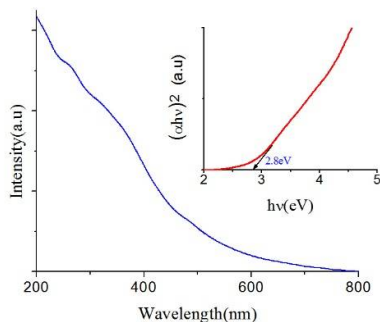
با توجه به تصویر، مشخص می‌شود که نانوساختارهای فریت منیزیم دارای شکل کروی بوده و توزیع تقریباً یکنواختی دارند. نانو ساختارهای سنتز شده دارای اندازه‌های 10-15 nm هستند که در اثر تجمع ناشی از برهم‌کنش‌های مغناطیسی و الکترواستاتیکی، خوشه‌هایی به ابعاد 100-300 nm را به وجود آورده‌اند.

گذار مستقیم و $m = 2$ برای گذار غیر مستقیم هستند [59].

برای ترسیم نمودار گاف انرژی از رابطه 2 استفاده شد و مقدار گاف انرژی مستقیم 2.8 eV به دست آمد.



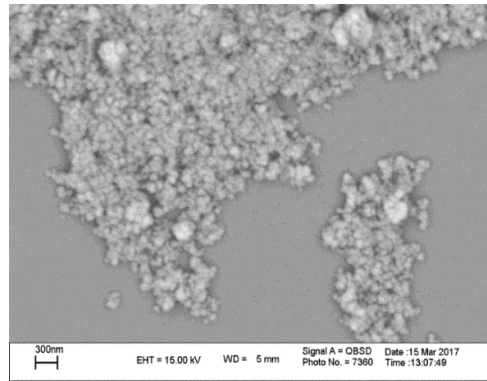
شکل 3. منحنی VSM مربوط به نانو ساختار فریت منیزیم بر حسب شدت میدان مغناطیسی در دمای اتاق، (a) حلقه پسماند بسیار باریک، (b) رفتار پارامغناطیسی



شکل 4. طیف جذبی UV-Vis نانو ساختار فریت منیزیم تهیه شده به روش فراصوت.

بررسی فعالیت فوتوکاتالیستی نانو ساختار فریت منیزیم

به منظور بررسی فعالیت فوتوکاتالیستی نانو ساختار فریت منیزیم برای جذب متیلن بلو، 40ml محلول آبی متیلن بلو با غلظت 10 ppm و $\text{pH}=13$ تهیه شد. سپس 0.04g فریت منیزیم به آن افزوده شد و برای برقراری تعادل جذب-واجذب بین متیلن بلو و کاتالیست به مدت 30 دقیقه روی همزن تحت تاریکی قرار گرفت. پس از این مرحله، محلول تحت تابش لامپ SMD با توان 50W قرار گرفت تا فعالیت فوتوکاتالیستی



شکل 2. تصویر SEM مربوط به نانو ساختار فریت منیزیم در مقیاس kX 50.

در شکل 3 نمودارهای a و b رفتار مغناطیسی نانو ساختار فریت منیزیم بر حسب میدان مغناطیسی را در دو مقیاس متفاوت نشان می دهند.

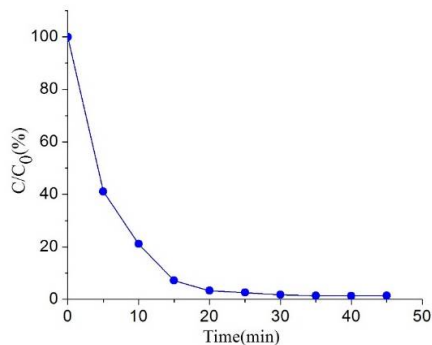
با توجه به قسمت a شکل 3 به نظر می رسد که نانو ساختارهای فریت منیزیم دارای رفتار پارامغناطیسی می باشند در حالی که قسمت b شکل 3 نشان دهنده یک حلقه پسماند باریک در بازه بسیار کوچک میدان اعمالی است که این امر دلالت بر رفتار سوپراپارامغناطیسی جزئی نانو ساختارهای فریت منیزیم در میدانهای مغناطیسی ضعیف دارد. مقدار مغناطش پسماند و میدان وادارندگی این نانو ساختارها به ترتیب برابر با 0.00274 emu و 12.5 Oe بودند.

خواص اپتیکی نانو ساختار فریت منیزیم توسط طیف جذبی UV-Vis بررسی شد که در شکل 4 نشان داده شده است.

گاف انرژی مربوط به نانو ساختار فریت منیزیم از طریق طول از مبدأ نمودار گاف انرژی مطابق رابطه 2 به دست آمده است:

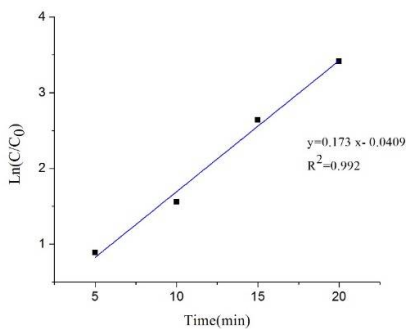
$$ahv = c(hv - E_g)^m \quad 2$$

در این رابطه α ضریب جذب اپتیکی، C ثابت تناسب، $h\nu$ انرژی فوتون، E_g انرژی گاف نواری و $m = \frac{1}{2}$ برای



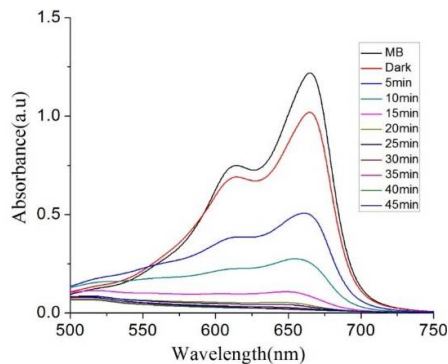
شکل 6. نمودار غلظت محلول متیلن آبی برحسب زمان تابش نور بر نانوساختار فریت منیزیم تهیه شده به روش فراصوت.

که $[MB]_0$ و $[MB]_t$ به ترتیب غلظت‌های متیلن بلو در زمان‌های t و صفر هستند. شکل 7 نمودار تعیین ثابت سرعت تخریب فتوکاتالیزوری متیلن بلو توسط نانوساختار فریت منیزیم را به‌عنوان مثال نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 7 مشاهده می‌شود نمودار $\ln([MB]_0/[MB]_t)$ نسبت به t با R^2 نزدیک به 1 خطی بود که نشان‌دهنده ثابت سرعت مرتبه اول مشاهده شده برای تخریب فتوکاتالیزوری متیلن بلو توسط نانوساختار فریت منیزیم می‌باشد.



شکل 7. نمودار تعیین ثابت سرعت تخریب فتوکاتالیزوری متیلن بلو توسط نانوساختار فریت منیزیم

نانوساختار فریت منیزیم تحت نور مرئی مورد بررسی قرار گیرد. در تمام مدت زمان واکنش دما از طریق سیستم کنترل کننده روی 20°C ثابت نگه داشته شد. برای اندازه‌گیری میزان تخریب متیلن آبی طی مدت زمان‌های مشخص از طیف‌سنجی UV-Vis استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل 5 و میزان کاهش غلظت متیلن بلو برحسب زمان‌های مختلف در شکل 6 نشان داده شده‌اند. درصد حذف متیلن آبی از آب توسط نانوساختارهای فریت منیزیم پس از 20 دقیقه، برابر با 97% بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحت تابش نور مرئی، شدت قله‌های جذب در محدوده طول موج اندازه‌گیری، به تدریج و بدون ایجاد قله جذبی جدید کاهش پیدا می‌کند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که واکنش تخریب با مکانیسم باز شدن حلقه آروماتیک بدون تشکیل حدواسط‌های پایدار انجام می‌گیرد. با استفاده از معادله $\ln([MB]_0/[MB]_t) = k_{obs}t$ ثابت سرعت مرتبه اول مشاهده شده (k_{obs}) برای واکنش تخریب فتوکاتالیزوری متیلن بلو توسط نانوساختار فریت منیزیم محاسبه شد.



شکل 5. میزان جذب متیلن بلو توسط نانوساختار فریت منیزیم تحت نور مرئی.

Proceedings of 1994 *IEEE 6th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, IEEE, 1994, pp. 371-374.

[7] L. Rashidi, K. Khosravi-Darani, The applications of nanotechnology in food industry, *Critical reviews in food science and nutrition*, **51** (2011) 723-730.

[8] X. Qu, P.J. Alvarez, Q. Li, Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment, *Water research*, **47** (2013) 3931-3946.

[9] F. Patolsky, G. Zheng, C.M. Lieber, Nanowire sensors for medicine and the life sciences, (2006).

[10] M. Franzreb, M. Siemann-Herzberg, T.J. Hobley, O.R. Thomas, Protein purification using magnetic adsorbent particles, *Applied microbiology and biotechnology*, **70** (2006) 505-516.

[11] T. Abraham, Economics of ceramic magnets, *American Ceramic Society Bulletin*, **73** (1994) 62-65.

[12] J. Smit, H.P.J. Wijn, Ferrites: physical properties of ferrimagnetic oxides in relation to their technical applications, (1959).

[13] X. Yang, X. Wang, Z. Zhang, Electrochemical properties of submicron cobalt ferrite spinel through a co-precipitation method, *Journal of crystal growth*, **277** (2005) 467-470.

[14] K. Rane, V. Verenkar, P. Sawant, Dielectric behaviour of $MgFe_2O_4$ prepared from chemically beneficiated iron ore rejects, *Bulletin of Materials Science*, **24** (2001) 323-330.

[15] Y.-L. Liu, Z.-M. Liu, Y. Yang, H.-F. Yang, G.-L. Shen, R.-Q. Yu, Simple synthesis of $MgFe_2O_4$ nanoparticles as gas sensing materials, *Sensors Actuators B: Chemical*, **107** (2005) 600-604.

[16] F. Foroughi, S. Hassanzadeh-Tabrizi, A. Bigham, In situ microemulsion synthesis of hydroxyapatite- $MgFe_2O_4$ nanocomposite as a magnetic drug delivery system, *Materials Science and Engineering: C*, **68** (2016) 774-779.

[17] N. Ma, Y. Yue, W. Hua, Z. Gao, Selective oxidation of styrene over nanosized spinel-type $MgxFe_{3-x}O_4$ complex oxide catalysts, *Applied Catalysis A: General*, **251** (2003) 39-47.

نتیجه گیری

نانوساختارهای فریت منیزیم به روش فراصوت تهیه شدند. الگوی پراش XRD، نشان دهنده تشکیل نانوساختار فریت منیزیم با فاز اسپینلی بود. تصاویر SEM نشان دادند که نانوساختار فریت منیزیم، دارای شکل کروی و توزیع تقریباً یکنواختی با اندازه‌های 10-15 nm تشکیل شده‌اند که در اثر تجمع ناشی از برهم‌کنش‌های مغناطیسی و الکترواستاتیکی خوشه‌هایی به ابعاد 100-300nm را به وجود آورده‌اند. گاف انرژی از طریق نمودار جذب UV-Vis برای گذار مستقیم eV 2/8 به دست آمد. منحنی پسماند نانوساختار فریت منیزیم نشان می‌دهد که این ماده در دمای اتاق رفتار سوپرپارامغناطیس جزئی از خود نشان می‌دهند. درصد حذف متیلن بلو از محلول‌های آبی توسط نانوساختار فریت منیزیم بررسی شد و میزان حذف در مدت زمان 45 دقیقه، برابر با 99٪ به دست آمد.

مرجع‌ها

[1] G. Cao, Nanostructures & nanomaterials: synthesis, properties & applications, *Imperial college press*, 2004.

[2] T. Hanemann, D.V. Szabó, Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications, *Materials*, **3** (2010) 3468-3517.

[3] R. Das, M.E. Ali, S.B.A. Hamid, S. Ramakrishna, Z.Z. Chowdhury, Carbon nanotube membranes for water purification: a bright future in water desalination, *Desalination*, **336** (2014) 97-109.

[4] J. Theron, J. Walker, T. Cloete, Nanotechnology and water treatment: applications and emerging opportunities, *Critical reviews in microbiology*, **34** (2008) 43-69.

[5] A. Fojtik, D. Horák, K. Píková, T.Q. Trung, T. Škřeň, Magnetic and metallic nanoparticles for biomedical application, *Nano Con*, (2009).

[6] S.P. Beaumont, The applications of nanotechnology in electronic devices, in:

- powder XRD structural refinements and Mössbauer spectroscopy, *American Mineralogist*, **77** (1992) 725-740.
- [28] A. Afkhami, M. Saber-Tehrani, H. Bagheri, Modified maghemite nanoparticles as an efficient adsorbent for removing some cationic dyes from aqueous solution, *Desalination*, **263** (2010) 240-248.
- [29] F. Ge, M.-M. Li, H. Ye, B.-X. Zhao, Effective removal of heavy metal ions Cd²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles, *Journal of hazardous materials*, **211** (2012) 366-372.
- [30] S. Saha, *Molecular Photochemistry-Variou Aspects*, 2012.
- [31] L.S. Tsui, W.R. Roy, M.A. Cole, Removal of dissolved textile dyes from wastewater by a compost sorbent, *Coloration Technology*, **119** (2003) 14-18.
- [32] V. Ponnusami, S. Vikram, S. Srivastava, Guava (*Psidium guajava*) leaf powder: novel adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions, *Journal of hazardous materials*, **152** (2008) 276-286.
- [33] G. Asgari, A. Dargahi, S.A. Mobarakian, Equilibrium and synthetic equations for index removal of methylene blue using activated carbon from oak fruit bark, *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, **24** (2015) 172-187.
- [34] W. Konicki, D. Sibera, E. Mijowska, Z. Lendzion-Bieluń, U. Narkiewicz, Equilibrium and kinetic studies on acid dye Acid Red 88 adsorption by magnetic ZnFe₂O₄ spinel ferrite nanoparticles, *Journal of colloid and interface science*, **398** (2013) 152-160.
- [35] S. Hashemian, Modified sawdust for removal of methyl violet (basic dye) from aqueous solutions, *Asian Journal of chemistry*, **21** (2009) 3622-3630.
- [36] V. Meshko, L. Markovska, M. Mincheva, A. Rodrigues, Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite, *Water research*, **35** (2001) 3357-3366.
- [37] K. Dutta, S. Mukhopadhyay, S. Bhattacharjee, B. Chaudhuri, Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like
- [18] H. Tian, J. Peng, T. Lv, C. Sun, H. He, Preparation and performance study of MgFe₂O₄/metal-organic framework composite for rapid removal of organic dyes from water, *Journal of Solid State Chemistry*, **257** (2018) 40-48.
- [19] S.-S. Hong, Catalytic removal of carbon particulates over MgF₂O₄ catalysts, *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, **84** (2005) 311-317.
- [20] E.M. de Moura, M.A. Garcia, R.V. Gonçalves, P.K. Kiyohara, R.F. Jardim, L.M. Rossi, Gold nanoparticles supported on magnesium ferrite and magnesium oxide for the selective oxidation of benzyl alcohol, *RSC Advances*, **5** (2015) 15035-15041.
- [21] E. Finocchio, V. Lorenzelli, M. Trombetta, S.A. Rossini, IR study of alkene allylic activation on magnesium ferrite and alumina catalysts, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, **92** (1996) 4687-4693.
- [22] R. Köferstein, T. Walther, D. Hesse, S.G. Ebbinghaus, Preparation and characterization of nanosized magnesium ferrite powders by a starch-gel process and corresponding ceramics, *Journal of materials science*, **48** (2013) 6509-6518.
- [23] S. Verma, P. Joy, Y. Kholam, H. Potdar, S. Deshpande, Synthesis of nanosized MgFe₂O₄ powders by microwave hydrothermal method, *Materials letters*, **58** (2004) 1092-1095.
- [24] H. Liu, H. Liu, Synthesis of nanosize quasispherical MgFe₂O₄ and study of electrochemical properties as anode of lithium ion batteries, *Journal of electronic materials*, **43** (2014) 2553-2558.
- [25] N. Mongia, A. Srivastava, D. Bansal, Effect of pH on Magnetic and Structural Properties of Low Temperature Synthesized MgFe₂O₄ Nanoparticles, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP, 2010, pp. 394-400.
- [26] M. Gateshki, V. Petkov, S.K. Pradhan, T. Vogt, Structure of nanocrystalline MgFe₂O₄ from X-ray diffraction, Rietveld and atomic pair distribution function analysis, *Journal of applied crystallography*, **38** (2005) 772-779.
- [27] H.S.C. O'Neill, H. Annersten, D. Virgo, The temperature dependence of the cation distribution in magnesioferrite (MgFe₂O₄) from

- Stabilization of Monodisperse, Phase-Pure MgFe_2O_4 Nanoparticles in Aqueous and Nonaqueous Media and Their Photocatalytic Behavior, *The Journal of Physical Chemistry C*, **121** (2017) 27126-27138.
- [47] P. Hankare, S. Jadhav, U. Sankpal, R. Patil, R. Sasikala, I. Mulla, Gas sensing properties of magnesium ferrite prepared by co-precipitation method, *Journal of Alloys Compounds*, **488** (2009) 270-272.
- [48] A. Pradeep, P. Priyadharsini, G. Chandrasekaran, Sol-gel route of synthesis of nanoparticles of MgFe_2O_4 and XRD, FTIR and VSM study, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320** (2008) 2774-2779.
- [49] W.-z. LU, B. LIU, X.-k. YOU, J.-q. LI, Sonochemical Synthesis of Nano Phase MgFe_2O_4 Powders [J], *Electronic Components & Materials*, **2** (2005) 000.
- [50] L. Zhang, X. Zhou, X. Guo, X. Song, X. Liu, Investigation on the degradation of acid fuchsin induced oxidation by MgFe_2O_4 under microwave irradiation, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **335** (2011) 31-37.
- [51] M. Pavlović, Č. Jovalekić, A. Nikolić, D. Manojlović, N. Šojić, Soft mechanochemical synthesis of MgFe_2O_4 nanoparticles from the mixture of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ with $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and $\text{Fe}(\text{OH})_3$ with $\text{Mg}(\text{OH})_2$, *Materials Science and Technology*, **26** (2010) 968-974.
- [52] J. Fu, J. Zhang, C. Zhao, Y. Peng, X. Li, Y. He, Z. Zhang, X. Pan, N.J. Mellors, E. Xie, Solvent effect on electrospinning of nanotubes: the case of magnesium ferrite, *Journal of Alloys Compounds*, **577** (2013) 97-102.
- [53] A.A. Thant, S. Srimala, P. Kaung, M. Itoh, O. Radzali, A. Fauzi, Low temperature synthesis of MgFe_2O_4 soft ferrite nanocrystallites, (2010).
- [54] K. Suslick, Homogeneous sonochemistry, Ultrasound: its chemical, physical, and biological effects, (1988) 123-163.
- [55] S. Sharma, R. Kumar, S. Kumar, V.S. Kumar, M. Knobel, V. Reddy, A. Banerjee, M. Singh, Magnetic study of $\text{Mg}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles, *solid state communications*, **141** (2007) 203-208.
- [56] M. Singh, A comparative study of the electrical and the magnetic properties and reaction, *Journal of hazardous materials*, **84** (2001) 57-71.
- [38] C. Sun, J.S. Lee, M. Zhang, Magnetic nanoparticles in MR imaging and drug delivery, *Advanced drug delivery reviews*, **60** (2008) 1252-1265.
- [39] E. Casbeer, V.K. Sharma, X.-Z. Li, Synthesis and photocatalytic activity of ferrites under visible light: a review, *Separation Purification Technology*, **87** (2012) 1-14.
- [40] Z.Y. Kong, N.X. Wong, S.W. Lum, S.Y. Tan, M.R. Khan, C.K. Cheng, The Application Of Magnesium Ferrite Photocatalyst For Photo Treatment Of Methylene Blue, *Journal of Engineering Science and Technology*, **10** (2015) 1-10.
- [41] S. Wang, D. Li, C. Yang, G. Sun, J. Zhang, Y. Xia, C. Xie, G. Yang, M. Zhou, W. Liu, A novel method for the synthesise of nanostructured MgFe_2O_4 photocatalysts, *Journal of Sol-Gel Science Technology*, **84** (2017) 169-179.
- [42] A. Manohar, C. Krishnamoorthi, Photocatalytic study and superparamagnetic nature of Zn-doped MgFe_2O_4 colloidal size nanocrystals prepared by solvothermal reflux method, *Journal of Photochemistry Photobiology B: Biology*, **173** (2017) 456-465.
- [43] X. Yuan, H. Wang, Y. Wu, X. Chen, G. Zeng, L. Leng, C. Zhang, A novel $\text{SnS}_2\text{-MgFe}_2\text{O}_4$ /reduced graphene oxide flower-like photocatalyst: solvothermal synthesis, characterization and improved visible-light photocatalytic activity, *Catalysis Communications*, **61** (2015) 62-66.
- [44] M. Shahid, L. Jingling, Z. Ali, I. Shakir, M.F. Warsi, R. Parveen, M. Nadeem, Physics, Photocatalytic degradation of methylene blue on magnetically separable MgFe_2O_4 under visible light irradiation, *Materials Chemistry*, **139** (2013) 566-571.
- [45] A. Radoń, A. Drygała, Ł. Hawelek, D. Łukowiec, Structure and optical properties of Fe_3O_4 nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers, *Materials Characterization*, **131** (2017) 148-156.
- [46] K. Kirchberg, A. Becker, A. Bloesser, T. Weller, J. Timm, C. Suchomski, R. Marschall,

Occurrence and Uses, in, *VCH Verlagsgesellschaft GMBH Weinheim, Germany*, 1996.

[59] J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vancu, Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *physica status solidi (b)*, **15** (1966) 627-637.

Mössbauer studies of normal and hot pressed $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **299** (2006) 397-403.

[57] M. Singh, S. Sud, Controlling the properties of magnesium–manganese ferrites, *Materials Science and Engineering: B*, **83** (2001) 180-184.

[58] R. Cornell, U. Schwertmann, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions,