

دوپ کردن قابل کنترل نانوذرات مغناطیسی بر روی نانولوله‌های پوشش داده شده با سیلیکا و بررسی خصوصیت فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$)

ساناز سعیدی راد¹، جمیله سیدزیدی²، سیده هدی حکمت‌آرا^{3*}

1. کارشناسی ارشد، فیزیک حالت جامد، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

2. دانشیار، گروه فیزیک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

3. استادیار، گروه فیزیک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

تاریخ دریافت: 1399/08/05 تاریخ پذیرش: 1399/09/20

Controllable Doping of Magnetic Nanoparticles on Silica-Covered Carbon Nanotubes and Investigating the Photocatalytic Property of ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$) Nanocomposite

S. Saedirad¹, J. Seyyed Yazdi², H. Hekmatara^{3*}

1. Ms.C. in Condensed Matter Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

2. Associate Professor, Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

3. Assistant Professor, Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Received: 2020/10/26

Accepted: 2020/12/10

Abstract

In this paper, functionalized carbon nanotubes were covered with a biocompatible shell of silica ($\text{MWCNT}/\text{SiO}_2$). Having a high amount of OH groups, silica shells avoid nanotubes agglomeration and are able to uniformly capture and stabilize arbitrary amounts of nanoparticles on their surface. $\text{MWCNT}/\text{SiO}_2$ doped with different amounts of Fe_3O_4 nanoparticles. Three samples of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ nanocomposites prepared by 1, 2, and 3 weight ratio of Fe_3O_4 to $\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ are labeled S1, S2, and S3, respectively. Then, they were characterized by X-ray diffraction spectroscopy (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The magnetic property of samples was investigated with vibrational sample magnetometer (VSM), which indicated the superparamagnetic property of nanocomposites. Due to their biocompatibility, nanocomposites were used as recyclable photocatalysts to remove methylene blue dye.

Keywords

$\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$, Magnetic Property, Photocatalyst.

چکیده

در این مقاله، نانولوله کربنی عامل‌دار (MWCNT-COOH) با لایه‌هایی از پوشش زیست سازگار دی‌اکسید سیلیسیوم (سیلیکا) پوشش داده شد. این پوشش به دلیل دارا بودن گروه‌های هیدروکسیل (OH) متعدد در سطح خود، علاوه بر آنکه از تجمع نانولوله‌ها جلوگیری می‌کند، قابلیت گیراندازی و پایدار کردن نانوذرات مختلف را به طور یکنواخت و به اندازه دلخواه روی سطح خود دارد. نانولوله پوشیده با سیلیکا ($\text{MWCNT}/\text{SiO}_2$) با درصد‌های مختلفی از نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) دوپه شد. نسبت‌های 1، 2 و 3 برابر Fe_3O_4 به $\text{MWCNT}/\text{SiO}_2$ به ترتیب S1، S2 و S3 نامیده شدند. نانوکامپوزیت‌های حاصل ($\text{MWCNT}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$) توسط طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخصه یابی شد. خاصیت مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از مغناطش‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) بررسی شد که نشان‌دهنده خاصیت سوپرپارامغناطیس نانوکامپوزیت‌ها بود. به دلیل دارا بودن خاصیت زیست سازگاری، هر سه نمونه از نانوکامپوزیت تهیه شده به عنوان فوتوکاتالیست‌های قابل بازیافت (به دلیل دارا بودن خاصیت مغناطیسی) برای حذف رنگ متیلن آبی مورد استفاده قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی

$\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ ، $\text{MWCNT}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ، خاصیت مغناطیسی، فوتوکاتالیست

مقدمه

نانولوله کربنی یکی از آلوتروپ‌های کربن است. نانولوله‌های کربنی از پیچیده شدن ورقه‌های گرافیتی، به صورت لوله‌ای شکل درست می‌شوند. نانولوله‌ها دارای مقاومت و استحکام بالا و هدایت الکتریکی و حرارتی عالی هستند [2: 61]. نانولوله‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان مانند مساحت سطح بالا، هدایت الکتریکی عالی، مقاومت الکتریکی قابل توجه، کاربردهای بالقوه و پایداری شیمیایی بالا، توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف علمی به خود جلب کرده‌اند [3: 36]. در میان تمام مواد کربنی، نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT)، به دلیل قیمت مناسب و نسبت سطح به حجم بالا می‌توانند حامل خوبی برای قرار گیری نیمه‌رساناهای اپتیکی باشند. آنها می‌توانند حجم بالایی از نانوذرات را بر روی دیواره خود قرار دهند و با این کار باعث پراکندگی نانوذرات می‌شوند که به علت فعالیت بالای سطح‌شان تمایل زیادی به توده‌ای شدن دارند. پراکندگی نانوذرات نیمه‌رسانا نقش مهمی در افزایش خاصیت فوتوکاتالیزوری آنها دارد. زیرا به راحتی می‌توانند در دسترس مولکول آلاینده قرار گیرند و این مولکول‌ها را اکسید و تجزیه کنند [4: 7]. مسئله مهمی که در استفاده از نانوذرات و نانولوله‌ها به عنوان فوتوکاتالیست وجود دارد، آلاینده‌های خود این فوتوکاتالیست‌ها است که در برخی موارد از آلاینده‌های محیطی خطرناک‌تر است [5: 34]. برای رفع این مشکل می‌توان سطح این فوتوکاتالیست‌ها را با موادی زیست‌سازگار که شفاف هم باشند (اشعه UV را جذب نکنند) پوشاند تا بتوان از عدم رهائش آلودگی آنها در محیط زیست، اطمینان حاصل کرد [6: 227]. مشکل دیگر در کاربرد برخی از این فوتوکاتالیست‌ها، قیمت بالای آنهاست که استفاده از آنها را در مقاصد عملی محدود می‌کند. برای حل این مشکل نیز استفاده از فوتوکاتالیست‌های بازگشت‌پذیر و به اصطلاح چند بار مصرف که قابلیت جداسازی از محیط آلاینده را داشته باشند، پیشنهاد شده است که از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است [7: 325]. در این تحقیق از همه روش‌های نوین که در بالا بدان اشاره شد، استفاده شد تا نانوکامپوزیتی را به عنوان فوتوکاتالیست تهیه کنیم تا اولاً هیچ آلودگی‌ای در محیط زیست ایجاد نکنند و ثانیاً با

داشتن قابلیت جداسازی از محیط، امکان استفاده مجدد را داشته باشند. نانوکامپوزیت تهیه شده شامل نانولوله‌های کربنی چند دیواره است که با پوششی از سیلیکا (SiO_2) که به خاطر خواص منحصر به فرد خود مانند ثبات شیمیایی، سازگاری زیستی، وجود گروه‌های عاملی زیاد بر روی آن و واکنش‌پذیری زیاد با گروه‌های عاملی واسطه گزینه مناسبی است، پوشانده شده است و ترکیب MWCNT/SiO_2 به دست آمد. پوشش سیلیکا علاوه بر فواید زیست محیطی و فعالیت شیمیایی، به دلیل دارا بودن گاف انرژی پهن، بسیار شفاف است. بنابراین مانع از رسیدن اشعه UV-Vis به سطح نانولوله نمی‌شود. سپس نانوذرات اکسید آهن مگنتیت روی پوشش سیلیکا رشد داده شد. مگنتیت (Fe_3O_4) که ماده مغناطیسی مهمی است، می‌تواند خواص نوری (فوتوکاتالیستی)، مغناطیسی و الکتروشیمیایی نانولوله‌ها را بهبود بخشد. مگنتیت یکی از مواد مغناطیسی است که به دلیل زیست سازگاری خوب، خواص پارامغناطیسی قوی، سمیت کم و آماده‌سازی آسان، مورد استفاده قرار می‌گیرد [7: 3]. نقش مگنتیت علاوه بر مزایای ذکر شده به نانوکامپوزیت حاصل خاصیت مغناطیسی قوی می‌دهد که به راحتی جذب یک آهنربای معمولی می‌شود و به آسانی از محیط آبی جدا شده و پس از شستشو می‌تواند دوباره نقش فوتوکاتالیستی خود را در محیط‌های آبی و آلی حفظ کند. نانوکامپوزیت حاصل که $\text{MWCNT/SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ نامیده شد با سه درصد وزنی مختلف از نانوذرات Fe_3O_4 به نانولوله پوشیده شده با دی اکسید سیلیسیوم $\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ به دست آمد که به ترتیب S1، S2 و S3 نامیده شدند.

با افزایش درصد وزنی مگنتیت، همان طور که انتظار می‌رفت در میزان اشباع مغناطش (μS)، به طور قابل توجهی افزایش یافت. از آنجا که نانولوله کربن و نانوذرات مگنتیت، هر دو فوتوکاتالیست خوبی هستند، انتظار می‌رفت، نانوکامپوزیت‌های تهیه شده $\text{MWCNT/SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ دارای خاصیت فوتوکاتالیستی خوبی باشند. از این رو، برای نشان دادن فعالیت فوتوکاتالیستی آن، هر سه نمونه از نانوکامپوزیت به عنوان فوتوکاتالیست در حذف رنگ صنعتی و پرکاربرد متیلن بلو که تخریب نوری آن معمولاً به سختی صورت می‌گیرد، استفاده شدند.

50 میلی گرم بر لیتر را تحت تابش لامپی با توان 250 وات تخریب کند. در حالی که، نمونه S1 توانست 70% رنگ را در این مدت تخریب کند. این نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌های سنتز شده در این پژوهش، در قیاس با فوتوکاتالیست‌های مشابه، بازده تخریب بهتری دارند.

روش‌های تجربی

سنتز نانوکامپوزیت $\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$

در ابتدا 0/5 گرم، نانولوله کربنی عامل‌دار (MWCNT-COOH) را در 30 میلی لیتر اتانول حل کرده و به مدت 10 دقیقه در معرض امواج آلتراسونیک قرار داده، سپس 15 میلی لیتر آمونیاک را به محلول اضافه کردیم و مجدداً به مدت 10 دقیقه در آلتراسونیک قرار دادیم. همزمان به صورت جداگانه 0/5 میلی لیتر، تترااتیل اورتوسیلیکات در 30 میلی لیتر اتانول را تحت همزن مکانیکی قرار دادیم و بعد این محلول را به محلول اولیه قطره قطره اضافه نمودیم و حدود 45 دقیقه محلول را در معرض امواج آلتراسونیک قرار دادیم. سپس محلول حاصل به مدت 24 ساعت تحت هم‌زدن مکانیکی قرار گرفت. در آخر محلول را سانتریفیوژ کرده و چندین بار با اتانول شستشو داده و خشک نمودیم.

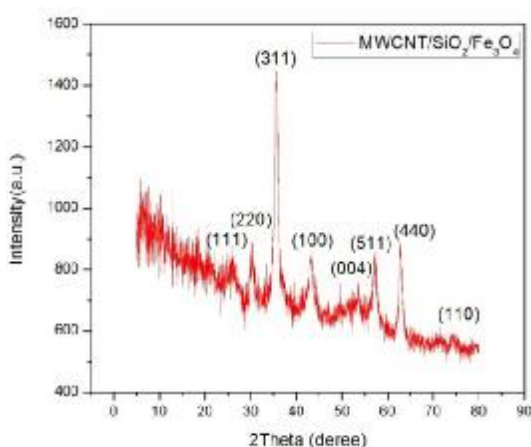
سنتز نانوکامپوزیت‌های $\text{MWCNT}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$

48 میلی گرم از نانوکامپوزیت $\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ تهیه شده را در 30 میلی لیتر آب دیونیزه حل کرده و به مدت 20 دقیقه در معرض ارتعاش آلتراسونیک قرار می‌دهیم. سپس 162 میلی گرم، $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ را در حین هم‌زدن به سوسپانسیون $\text{SiO}_2/\text{MWCNT}$ اضافه نمودیم. پس از هم‌زدن شدید به مدت 30 دقیقه تحت جو نیتروژن در دما 80°C ، 60 میلی گرم، $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ به محلول اضافه شد. محلول واکنش 30 دقیقه دیگر تحت جو نیتروژن در دمای 80°C قرار گرفت. 8 میلی لیتر محلول غلیظ آمونیاک توسط 40 میلی لیتر آب مقطر رقیق شده و قطره قطره به محلول اضافه شد. سپس محلول در دمای 80°C به مدت 2 ساعت تحت جو نیتروژن هم خورد. در نهایت محلول حاصل سانتریفیوژ شده و با آب

متیلن بلو یک کاتیونی محلول در آب است و با علامت اختصاری MB مشخص می‌گردد. پساب‌های حاوی رنگ‌های مصنوعی مانند متیلن بلو برای اکوسیستم و سلامت عمومی خطرناک هستند، این مواد ممکن است با کاهش نفوذ نور بر روی فعالیت نوری گیاهان آبی، افزایش مواد معلق و کدورت آبها تاثیر بگذارند و علاوه بر آن، رنگ‌ها برای انسان سرطان‌زا و جهش‌زا هستند. به همین دلیل با توجه به تحت فشار بودن صنایع از طریق مسئولان و افکار عمومی و همچنین گسترش قوانین زیست محیطی، حذف مواد رنگ‌زا از فاضلاب با یک روش تصفیه مناسب طبق استانداردهای موجود، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های مختلفی برای از بین بردن مواد آلی از پساب خروجی صنایع نساجی به کار می‌روند که شامل روش‌های بیولوژیکی، انعقاد/ لخته‌سازی، الکتروکواگولاسیون، جذب سطحی بر روی کربن و غیره می‌باشد. در این روش‌ها، انتقال رنگ از فاز دیگر به سختی صورت می‌پذیرد، همچنین این روش‌ها به دلیل تولید آلاینده‌های ثانویه نیازمند تصفیه بعدی نیز می‌باشد [8: 157]. امروزه تخریب فوتوشیمیایی رنگ‌ها روشی پیشرفته‌تر و از هر لحاظ مناسب‌تر است. فرحبخش و همکاران به بررسی تخریب رنگ متیلن آبی با غلظت‌های مختلف با استفاده از فوتوکاتالیست $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ در مقدارهای متفاوت و تحت لامپ فرابنفش با قدرت 5 وات پرداختند. نتایج آنها نشان داد، برای رنگ متیلن آبی با غلظت 4 میلی گرم بر لیتر و استفاده از 0/01 گرم از $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ ، تخریب رنگ در مدت 35 دقیقه تخریب رنگ به 100% رسید [9: 18]. دهقانی دشتابی و همکاران از فوتوکاتالیست $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{ZnO}$ با غلظت 60 میلی گرم در لیتر برای تخریب رنگ متیلن آبی با غلظت 10 میلی گرم بر لیتر تحت لامپ 250 وات، استفاده کردند. آنها توانستند در مدت 40 دقیقه 90% رنگ را تخریب کنند [10: 18].

در پژوهش حاضر نتایج بررسی خاصیت فوتوکاتالیستی هر سه نمونه کامپوزیت $\text{MWCNT}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ، نشان داد که 0/001 گرم از نمونه‌های S2 و S3 توانست در مدت زمان 20 دقیقه، 100% رنگ متیلن آبی با غلظت

که تشکیل فاز اسپینل معکوس مگنتیت (Fe_3O_4) را تأیید می‌کند. پیک پراش در $2\theta=23/77$ مربوط به سیلیکون و در $43/36$ و $2\theta=25/9$ مربوط به صفحات بلوری (002) و (110) نانولوله است. قله‌های دیگر در $30/19$ ، $35/55$ ، $43/36$ ، $57/29$ و $2\theta=62/65$ به ترتیب به صفحات (220)، (311)، (400)، (422) و (511) مگنتیت مربوط می‌شوند. این منحنی نشان دهنده حضور ساختار MWCNT، پوشش SiO_2 و نانوذرات مگنتیت است.



شکل 2. الگوی XRD نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ (نمونه S2)

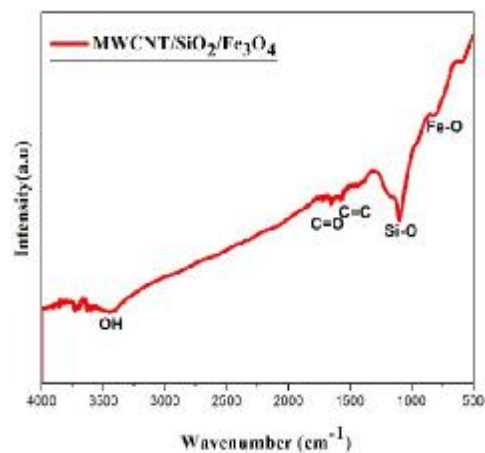
طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ در آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس می‌توان عناصر موجود در نمونه را به صورت نیمه کمی شناسایی کرد. در واقع این طیف به همراه طیف پراش پرتو ایکس XRD، درستی سنتز نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ را نشان می‌دهد. در این طیف، همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، عنصر کربن و اکسیژن مربوط به نانولوله، عنصر سیلیسیم مربوطه به پوشش SiO_2 و عنصر آهن مربوط به Fe_3O_4 دیده می‌شود.

دیونیزه چندین بار شستشو داده شد و در دمای $50^\circ C$ به مدت 24 ساعت خشک شد (نمونه S2). دو نمونه دیگر نانوکامپوزیت را به همین روش، با مقادیر 81 و 324 میلی گرم از $FeCl_3$ و 30 و 120 میلی گرم از $FeCl_2$ ، به ترتیب سنتز نمودیم (S1 و S3).

نتایج

طیف FTIR نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄

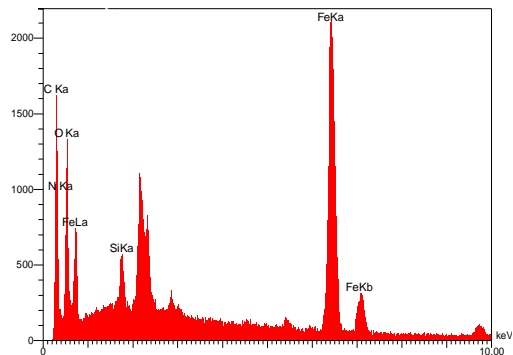
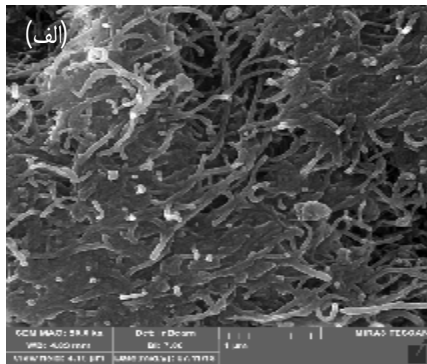
برای تأیید سنتز موفقیت‌آمیز نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄، از طریق تعیین پیوندهای موجود در این ترکیب، از نمونه S2 طیف FTIR گرفته شد (شکل 1). نوار جذبی در 3430 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی پیوند O-H است. نوار جذبی در 1740 cm^{-1} مربوط به پیوند C=O است که به گروه کربوکسیل نانولوله‌های کربنی اختصاص دارد. نوار جذبی در 1620 cm^{-1} مربوط به پیوند C=C در ساختار نانولوله‌های کربنی است. نوار جذبی 1101 cm^{-1} مربوط می‌شود به پیوند Si-O و نوار جذبی در 800 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی پیوند Fe-O نانوذرات Fe_3O_4 است.



شکل 1. طیف FTIR نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄

پراش اشعه ایکس (XRD)

شکل 2 الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ (نمونه S2) را نشان می‌دهد

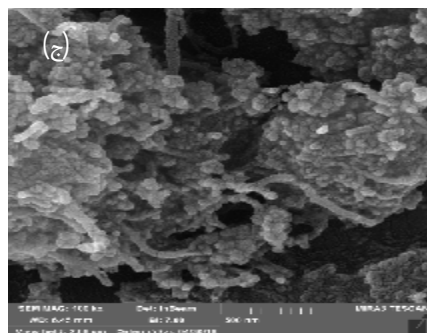


شکل 3. طیف‌سنجی EDS نانوذرات MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄

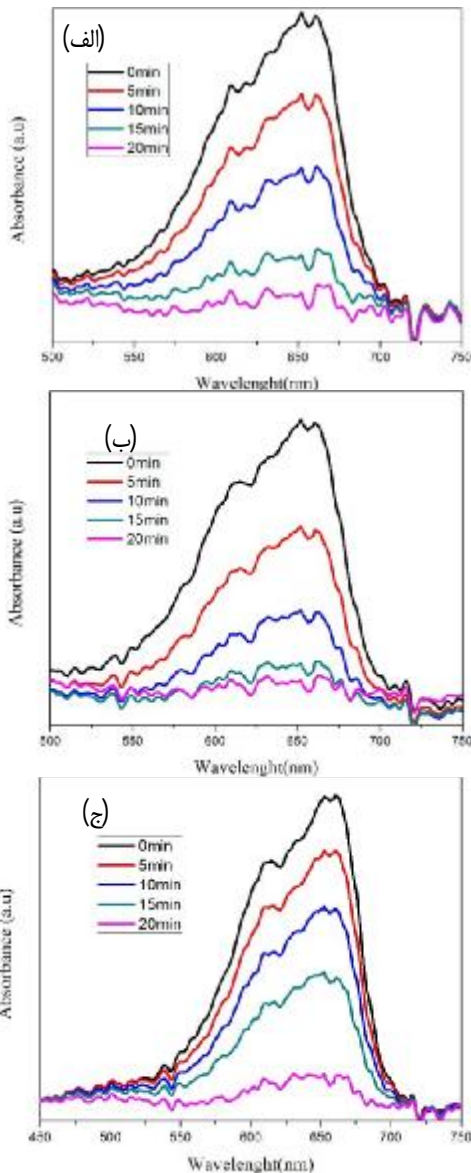


تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نانوکامپوزیت‌های MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄

شکل 4 تصویر SEM نانولوله پوشش داده شده با سیلیکا (MWCNT/SiO₂) و سه نمونه از نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ را نشان می‌دهد. در تصویر MWCNT/SiO₂ شکل ظاهری نانولوله‌ها از حالتی که معمولاً دارند (بدون پوشش) هیچ تغییری نکرده است. این نشان می‌دهد که سیلیکا احتمالاً به صورت لایه نازکی بطور یکنواخت سطح نانولوله را پوشانده است. در تصاویر نانوکامپوزیت‌های MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ به وضوح می‌توان خوشه‌های نانوذرات مگنتیت را دید که روی بدنه نانولوله قرار گرفتند. هر خوشه شامل تعداد بی‌شماری از نانوذرات مگنتیت است که توزیع اندازه یکنواختی دارند. متوسط اندازه این نانوذرات در حدود 10nm است. در تصاویر نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت MWCNT/SiO₂/Fe₃O₄ همچنین می‌توان مشاهده کرد که هر چه نسبت وزنی این نانوذرات در نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد (از نمونه S1 به S2 و S3) خوشه‌هایی که نانوذرات مگنتیت تشکیل دادند بزرگ‌تر می‌شوند و تا جایی که در نمونه S3 آنقدر حجم خوشه‌ها زیاد است که نانولوله‌ها در میان خوشه‌ها گیر افتاده و به ندرت قابل رویت هستند.



شکل 4. تصویر FESEM از MWCNT/SiO₂ (الف)، نمونه S1 (ب)، نمونه S2 (ج) و نمونه S3 (د).



شکل 6. طیف‌های UV-Vis از محلول رنگ متیلن آبی در زمان‌های مختلف از نمونه: S1 (الف)، S2 (ب) و S3 (ج).

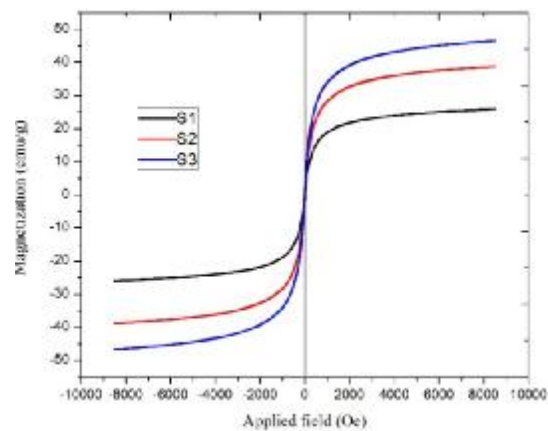
نمودار درصد بازده تخریب نسبت به زمان که با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{بازده تخریب} = \frac{C_0 - C_T}{C_0} \times 100$$

که در آن C_0 غلظت اولیه رنگ و C_T غلظت رنگ در هر زمان نمونه‌گیری است.

مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی VSM

خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت $\text{MWCNT/SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ توسط یک مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت. منحنی مغناطش معمولی به عنوان یک تابع از میدان مغناطیسی اعمال شده در دمای اتاق در شکل 5 نشان داده شده است. هیچ حلقه پسماندی وجود ندارد که نشان دهد که قدرت نگهداری و وادارندگی مغناطیسی این نانوکامپوزیت صفر است. این مشاهدات با رفتار ابرپارامغناطیس نمونه‌های آماده شده سازگار است. مغناطش اشباع نانوکامپوزیت‌ها به ترتیب برای S1، S2 و S3، 25/9، 38/9 و 46/6 است که با افزایش خطی وزن نانوذرات اکسید آهن، مغناطش اشباع نیز به صورت خطی افزایش یافته است.



شکل 5. منحنی مغناطش بر حسب میدان اعمال شده (VSM) برای نانوکامپوزیت‌های $\text{MWCNT/SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$

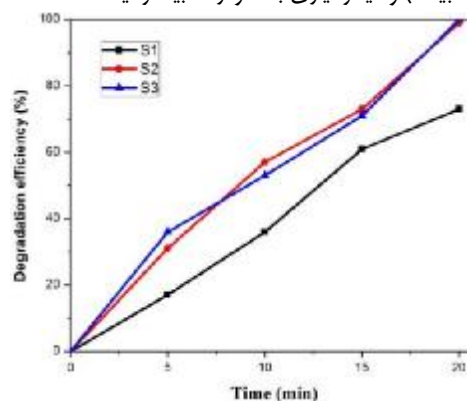
بررسی تخریب رنگ متیلن بلو از محلول‌های آبی

5 میلی گرم از رنگ متیلن آبی را در 20 میلی لیتر آب حل کرده (50 میلی گرم بر لیتر)، سپس 0/001 گرم از نانوکامپوزیت نمونه S2، را تحت امواج مافوق صوت به مدت 10 دقیقه پراکنده نموده و در فاصله 5 سانتی متر از لامپ فرابنفش با توان 250 وات قرار داده شد و هر 5 دقیقه غلظت رنگ متیلن بلو در محلول آبی توسط طیف‌سنجی UV-Vis مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های UV-Vis رنگ متیلن آبی در زمان‌های مختلف در حضور فوتوکاتالست‌های در حضور فوتوکاتالست‌های S1 و S2 و S3 در شکل 6 الف، ب و ج، به ترتیب آمده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی جدید و قابل کنترل (در مقدار آلاینده) برای نشان دادن مقادیر دلخواهی از نانوذرات مغناطیسی بر روی نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده با لایه سیلیکا ارائه شد. سه نمونه از نانوکامپوزیت $MWCNT/SiO_2/Fe_3O_4$ با نسبت‌های وزنی مختلفی از نانوذرات مگنتیت به نانولوله پوشش داده شده با سیلیکا به طور موفقیت آمیزی سنتز شدند. نمونه‌های به دست آمده به دلیل پوشش سیلیکا زیست سازگار و از نظر مغناطیسی دارای خاصیت ابرپارامغناطیسی با مغناطش اشباع بالایی بودند. خاصیت مغناطیسی این نانوکامپوزیت‌ها به آنها این امکان را می‌دهد که به راحتی از محلول‌های آبی قابل جمع‌آوری و جداسازی باشند. فعالیت فوتوکاتالیستی هر سه نمونه در تخریب رنگ متیلن آبی مورد بررسی قرار گرفت که هر سه نمونه بازده تخریب خوبی را در مدت زمان 20 دقیقه نشان دادند. اما بازده تخریب نمونه‌های S2 و S3 با هم برابر و از نمونه S1 بیشتر بود که این نتیجه نشان دهنده این است که نقش نانوذرات مگنتیت در تخریب رنگ بیشتر از نقش نانولوله‌های کربنی است. برابر بودن بازده تخریب نمونه‌های S2 و S3 نشان می‌دهد برای غلظت رنگ به کار رفته، نانوذرات مگنتیت موجود در نمونه S2 کافی است و نیازی به نانوذرات (فوتوکاتالیست) بیشتر نیست.

منحنی تخریب بر حسب زمان برای هر سه نانوکامپوزیت S1 و S2 و S3 در شکل 7 نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند هر سه نانوکامپوزیت قابلیت تخریب بالای 70% رنگ را در مدت زمان 20 دقیقه دارند. نمونه S1 در مقایسه با S2 و S3 بازده تخریب ضعیف‌تری دارد. این نشان می‌دهد که نقش نانوذرات مگنتیت در تخریب رنگ بیشتر از نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده با سیلیکا است. بازده تخریب S2 و S3 تقریباً برابر با یکدیگر و بسیار بالا است. رنگ متیلن آبی در حضور این دو نمونه در مدت زمان 20 دقیقه تماماً (100%) تخریب شد. برابر بودن بازده تخریب این دو نمونه نشان می‌دهد که برای این غلظت مورد نظر از رنگ، چسبیدن مولکول رنگ به نانوذرات مگنتیت به حالت اشباع رسیده (یعنی تمام مولکول‌های رنگ به سطح نانوذرات مگنتیت چسبیدند) و دیگر نیازی به نانوذرات بیشتر نیست.



شکل 7. نمودار در صد بازده تخریب بر حسب زمان برای سه نانوکامپوزیت S1، S2 و S3 است

شور (بارناکل) و آب شیرین (روتیفر)، مجله علمی شایلات ایران، سال بیست و هفت، شماره 3، اردیبهشت 97.

[2] S.Xie, W.Zh.Pan, B.Chang, L.fengSun, Mechanical and physical properties on carbon nanotube, *J. Phys. Chem. Solids* 61 (2000) 1153-1158.
 [3] M. Arvand, M. Hassannezhad, Magnetic core-shell $Fe_3O_4@SiO_2/MWCNT$ nanocomposite modified carbon paste electrode for amplified electrochemical sensing of uric acid. *Mater. Sci.Eng. C* 36 (2014) 160-167.

منابع

[1] مشجور، سکینه؛ یوسف‌زادی، مرتضی؛ علیشاهی، مجتبی (1397). ارزیابی سمیت سوسپانسیون آبی نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) بر شاخص‌های زیستی آب
 [4] L. Zhu, X.Zeng, M.Chen, R.Yu, Controllable permittivity in 3D $Fe_3O_4/CNTs$ network for remarkable microwave absorption performances, *RSC Adv.* 7 (2017) 26801-26808.
 [5] A. P. Francis, T. Devasena, Toxicity of carbon nanotubes: A review, *TOXICOL IND HEALTH.* 34(3) 2018 200-210.
 [6] D. Wang, D. laiHan, Zh. Shi, J. Wang, J. Yang, X. Li, H. Song, Optimized de-

- sign of three - dimensional multi - shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{ZnO}/\text{ZnSe}$ microspheres with type II heterostructure for photocatalytic applications, *APPL CATAL B-ENVIRON* 227 (2018) 61-69.
- [7] H. Rezaei, A. Vahidiana, R. Zareia, A. Soleymani, Degradation of nitroaromatic explosives using recyclable magnetic photocatalyst: Catalyst synthesis and process optimization, *J. Hazard. Mater.* 325 (2017) 310-318.
- [8] B. Hameed, M. El-Khaiary, Equilibrium kinetics and mechanism of malachite green adsorption on activated carbon prepared from bamboo by K_2CO_3 activation and subsequent gasification with CO_2 *J Hazard Mater* 157 (2008) 344-351.
- [9] F. Farahbakhsh, M. Ahmadi, H. S. Hekmatara, M. Sabet, E. Heydari-Bafrooei, Improvement of Photocatalyst Properties of Magnetic NPs by New Anionic Surfactant, *MATER CHEM PHYS.* 224 (2018) 279-285.
- [10] M. Dehghani-Dashtabi, H. Hekmatara, J. Seyed-Yazdi, Synthesis and improved photoactivity of magnetic quaternary nanocomposites consisting of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ core@shell nanoparticles decorated on graphene-oxide grafted poly-citric acid *Physica B Condens. Matter* 553 (2018) 11-17.