

بررسی خواص فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن ساخته شده به روش تخلیه قوس الکتریکی در محیط مایع به منظور استفاده در کاربردهای زیست محیطی

بهاره محمدی^۱، علی اکبر آشکاران^{۱*} و مرتضی محمودی^۲

۱- گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- مرکز تحقیقات نانو فناوری، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۳/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۵/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۵/۳۰

چکیده

در این کار تحقیقاتی نانوذرات اکسید آهن به روش تخلیه قوس الکتریکی در محلول نمک آهن سه ظرفیتی با غلظت مناسب ساخته شدند و توسط آنالیزهای متعددی شامل میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، طیفسنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR)، پراش اشعه ایکس (XRD) و طیفسنجی فرابنفش مرئی (UV-Vis) مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته‌اند. همچنین به منظور بررسی قابلیت این ماده در کاربردهای زیست محیطی خواص فوتوکاتالیستی این ماده در تجزیه آلاینده مدل رودامین B (Rhodamine B) تحت تابش نور ماورا بنفش مورد مطالعه قرار گرفت. آنالیز XRD و FT-IR از نمونه‌های بدست آمده بعد از انجام عملیات حرارتی در هوای معمولی و دمای ۶۰۰ °C، نشان دهنده تشکیل فاز آلفای اکسید آهن است. تصاویر TEM نیز بیانگر تشکیل ذراتی نانومتری، شبه کروی و با میانگین اندازه‌ای در حدود ۹۵±۵ nm است. مطالعات حاصل از طیفسنجی نوری نانوذرات پخت شده نیز وجود یک لبه جذب در حدود ۳۷۰ nm که با افزایش زمان تخلیه الکتریکی در محلول به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابجا می‌شود، را نشان می‌دهد. خاصیت فوتوکاتالیستی نانوذرات بعد از انجام عملیات حرارتی نیز بیانگر قابلیت بسیار خوب این نانوذرات در تجزیه ماده رنگی استاندارد رودامین B تحت تابش نور ماورا بنفش بوده است.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات اکسید آهن، تخلیه الکتریکی در محلول، خواص فوتوکاتالیستی.

۱- مقدمه

ایجاد رویکردی نوین در صنعت فوتوکاتالیست آینده‌ای بسیار وسیع را برای این زمینه نوید می‌دهد. اهمیت مواد نانو ساختاری این است که در این مقیاس مواد خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت از توده ماده از خود نشان می‌دهند. علاوه بر تفاوت خواص آنها با توده، در این حوزه ویژگی‌های ماده به اندازه و شکل آنها ارتباط پیدا می‌کند. با توجه به این موضوع با استفاده از تغییراتی در شکل و اندازه

فرآیندهای فوتوکاتالیستی سال‌هاست که به عنوان یکی از راهکارهای زیست محیطی در کشورهای صنعتی دنیا به کار می‌رود و دارای سابقه طولانی است. در این میان هر روزه مواد جدید فوتوکاتالیست با خواص گوناگون وارد بازار می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. فناوری نانو با

* عهده‌دار مکاتبات: علی اکبر آشکاران

نشانی: بابلسر، دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک حالت جامد

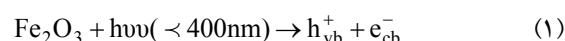
تلفن: ۰۱۱-۳۵۳۰۲۴۸۵، دورنگار: ۰۱۱-۳۵۳۰۲۴۸۵، پست الکترونیکی: ashkarran@umz.ac.ir

می‌شوند. در اثر شکستن پیوندهای مواد آلی و تجزیه آنها، خواص سمی و خطرناک آنها از بین رفته و محصولات تولید شده به مراتب کم خطرتر و غیرسمی‌تر از مواد اولیه هستند. در سال ۲۰۱۲ و همکارانش نانوذرات اکسید آهن دوکی شکلی را به روش شیمیایی ساختند و برای تجزیه رودامین B مورد آزمایش قرار دادند. آنها دریافتند که فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن به میزان بسیار زیادی در اثر جفت شدن با نیمه‌هادی دیگری مثل اکسید روی می‌تواند بهبود پیدا کند [۷]. همچنین در سال ۲۰۱۳ کاتو و همکارانش با ساخت آرایه‌های منظمی از نانولوله‌های اکسید آهن دریافتند که خواص فوتوکاتالیستی این نانوساختارها در تجزیه کلروفنول به شدت وابسته به قطر نانولوله‌های اکسید آهن می‌باشد. در واقع هرچه قطر نانولوله‌ها کمتر باشد بازده فعالیت فوتوکاتالیستی نیز بیشتر خواهد شد [۸]. در این تحقیق از تخلیه الکتریکی بین الکترودهای تیتانیم در یک محلول با غلظت مناسب از نمک کلرید آهن سه ظرفیتی، نانوذرات اکسید آهن ساخته شده‌اند. همچنین آنالیزهای مختلفی جهت مشخصه‌یابی و بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی محصولات تولید شده، انجام شده است. در پایان نیز میزان فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات تولید شده تحت تابش نور فرابنفش و در دمای آزمایشگاه به کمک یک ماده رنگی استاندارد به عنوان مدل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

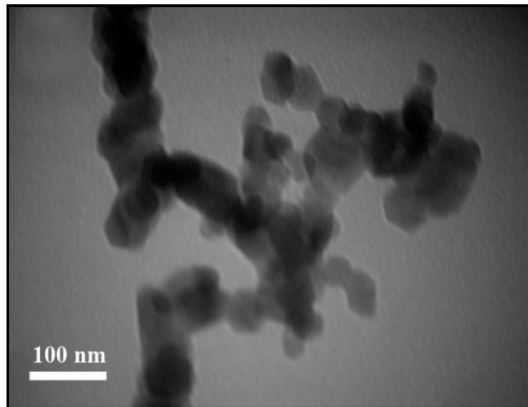
۲- فعالیت‌های تجربی

در روش تخلیه قوس الکتریکی در محیط مایع با عبور یک جریان الکتریکی مستقیم و زیاد بین دو الکتروود فلزی چگالی جریان بسیار بالایی از دو الکتروود عبور کرده و این امر منجر به بخار شدن اتم‌های فلز از سطح الکتروود آند می‌شود. اتم‌های بخار شده از سطح فلز به صورت خوشه‌هایی با ابعاد مختلف در محیط مایع چگالش حاصل کرده و نانوساختارهایی با ویژگی‌های مختلف و از جنس همان الکتروود را تشکیل خواهند داد. این در حالی است که در این تحقیق جهت ساخت نانوذرات اکسید آهن از

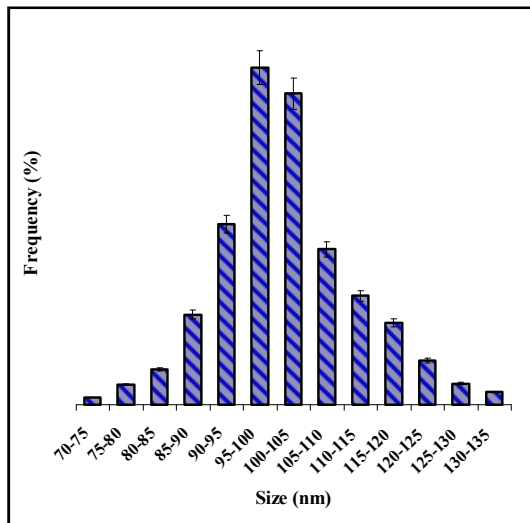
ساختارها می‌توان به موادی با خواص جدید دست یافت. فوتوکاتالیست‌های نانوساختار اکسید آهن با خواص فوتوکاتالیستی زیاد به علت نسبت سطح به حجم بسیار بالای آنها یکی از فناوری‌های کلیدی در کنترل آلودگی‌های زیست محیطی به شمار می‌رود [۲،۳]. از این فناوری در سیستم‌های تصفیه آب، پساب و هوا می‌توان به نحو مطلوبی بهره برد و با حذف آلودگی‌های شیمیایی محیطی سالم را فراهم نمود [۴]. این خواص به روش و شرایط ساخت وابسته است. با توجه به این مطلب و نیازهای دیگر از جمله قیمت تمام شده محصولات نانوساختاری، روش‌های مختلفی برای ساخت نانوذرات ابداع شده است. در روش ارائه شده در این مقاله (تخلیه قوس الکتریکی در محلول)، امکان ساخت نانوذرات اکسید آهن بدون استفاده از الکترودهای فلزی آهن، که نقش اساسی و مستقیم در فاز محصول نهایی دارند، وجود دارد [۵،۶]. در واقع در این پژوهش جهت ساخت نانوذرات اکسید آهن به روش تخلیه الکتریکی در محیط مایع از الکترودهای آهن استفاده نکرده‌ایم تا مستقیماً به نانوذرات اکسید آهن دست پیدا کنیم. ساز و کار واکنش‌های فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن با معادلات زیر داده می‌شود.



در واقع در اثر تابش نور ماورا بنفش به نانوذرات اکسید آهن زوج الکترون-حفره تشکیل می‌شود. الکترون‌ها در طی یک واکنش کاهشی با اکسیژن مولکولی واکنش داده و رادیکال‌های آنیون سوپر اکسید تولید می‌کنند. حفره‌های تولید شده در طی یک واکنش اکسایشی با آب واکنش داده و تولید رادیکال‌های OH می‌کنند. این دو رادیکال تولید شده بسیار پرنرژی و واکنش‌پذیر هستند و با ترکیبات آلی و آلودگی‌های مختلف واکنش داده و باعث تجزیه آنها



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) تصویر TEM نانوذرات اکسید آهن بعد از اعمال فرآیند عملیات حرارتی در 600°C و (ب) منحنی توزیع اندازه ذرات تشکیل شده.

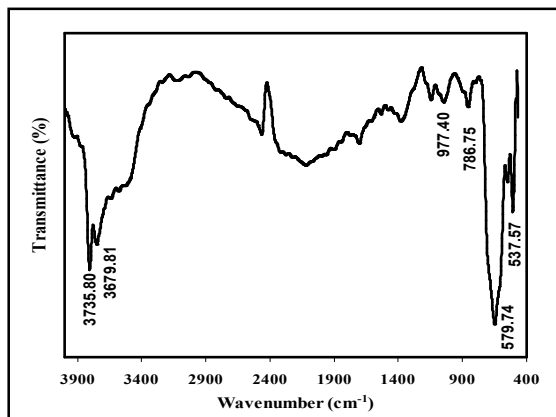
بررسی نتایج حاصل از آنالیز TEM نشان می‌دهد که با اعمال فرآیند عملیات حرارتی در 600°C به مدت ۲ ساعت نانوذرات کروی و شبه کروی و با میانگین اندازه‌ای در حدود 100 nm حاصل می‌شوند. میانگین اندازه نانوذرات تولید شده که با شمارش تعداد ذرات موجود در ۲ تصویر متفاوت TEM حاصل شده است، در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار پیداست، ذراتی با اندازه میانگین $95 \pm 5\text{ nm}$ نانومتر و پهنای توزیعی در حدود 45 nm بعد از انجام عملیات حرارتی به مدت ۲ ساعت در دمای 600°C روی نانوذرات بلافاصله بعد از ساخت به دست آمده است. هر چند میانگین اندازه ذرات به دست

الکترودهای فلزی آهن به طور مستقیم استفاده نشده است. در واقع از تخلیه الکتریکی بین الکترودهای تیتانیم (با قطر 2 mm و با خلوص $99/99\%$ از شرکت Alfa Aesar) در جریان آستانه تخلیه الکتریکی (A 15) و در یک محلول با غلظت 40 mM از نمک کلرید آهن سه ظرفیتی جهت تولید نانوذرات اکسید آهن بهره گرفته‌ایم. در واقع در جریان آستانه تخلیه الکتریکی فقط فرآیند تخلیه الکتریکی بین الکترودهای تیتانیم اتفاق افتاده و میزان خوردگی الکتروود در تشکیل نانو ساختارهای بر پایه تیتانیم و یا اکسید تیتانیم در محیط بسیار ناچیز است. با اعمال فرآیند تخلیه الکتریکی از صفر تا 10 دقیقه رنگ اولیه محلول نیز کاملاً دستخوش تغییر می‌شود و نانوذرات اکسید آهن در محلول به دلیل تزریق الکترون از محیط پلاسمای تشکیل شده به محلول تشکیل می‌شوند.

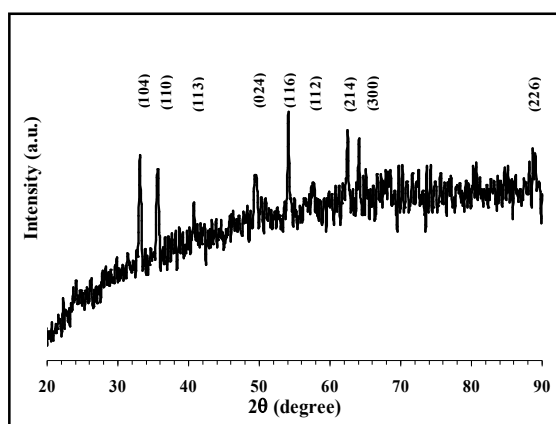
TEM با استفاده از دستگاه LEO 912 AB و در ولتاژ $100 - 50\text{ kV}$ با استفاده از دستگاه Phillips و اشعه $K\alpha$ مس و بررسی طیف جذبی نمونه‌ها نیز با دستگاه Optizen POP و در بازه $1100 - 200\text{ nm}$ و آنالیز FT-IR به کمک دستگاه Bruker مدل Tensor27 انجام گرفته است. همچنین کلیه آزمایش‌های فوتوکاتالیستی نیز در حضور 30 mL از نانوذرات اکسید آهن و 30 mL از ماده رنگی رودامین B با غلظت 10^{-5} M و تحت تابش نور ماورا بنفش با طول موج 254 nm انجام گرفته است.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی اندازه و شکل نانوذرات تولید شده از آنالیز TEM بهره گرفته‌ایم. شکل ۱ تصویر نوعی نانوذرات اکسید آهن بعد از فرآیند حرارتی را نشان می‌دهد. در واقع به دلیل کلوخه شدن شدید ذرات و عدم حصول بزرگنمایی مناسب از آنالیز SEM جهت تعیین شکل و اندازه نانوذرات استفاده نشده است. در واقع میکروسکوپ TEM به دلیل برخورداری از بزرگنمایی بسیار بهتر جزئیات بیشتری از شکل، اندازه و توزیع نانوذرات تشکیل شده خواهد داد.



شکل ۲: نتیجه آنالیز FT-IR برای نمونه‌ای بعد از پخت.



شکل ۳: نتیجه آنالیز XRD برای نمونه‌ای بعد از پخت.

تخلیه الکتریکی بین الکترودهای تیتانیم در محلول نمک آهن فاز $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ بوده است. طیف جذبی نانوذرات بدست آمده در زمان‌های مختلف تخلیه الکتریکی در شکل ۴ نشان داده شده است. طیف جذبی بدست آمده نشان دهنده یک لبه جذب شانه‌ای شکل که مشخصه اصلی نانوذرات نیمه‌هادی است، می‌باشد.

همان گونه که از نمودار جذبی پیداست با افزایش زمان تخلیه الکتریکی لبه جذب نانوذرات از ۳۷۰ nm به طول موج‌های بلندتر جابجا خواهد شد (تصویر داخلی شکل ۴-الف مربوط به نانوذرات تشکیل شده در انتهای فرآیند تخلیه الکتریکی در بازه‌های زمانی مختلف است). هیچ گونه تغییر رنگ قابل ملاحظه‌ای بعد از زمان ۱۰ دقیقه فرآیند تخلیه الکتریکی در محلول نهایی مشاهده نشده است. این امر موید این مطلب است که در مدت زمان ۱۰ دقیقه تقریباً

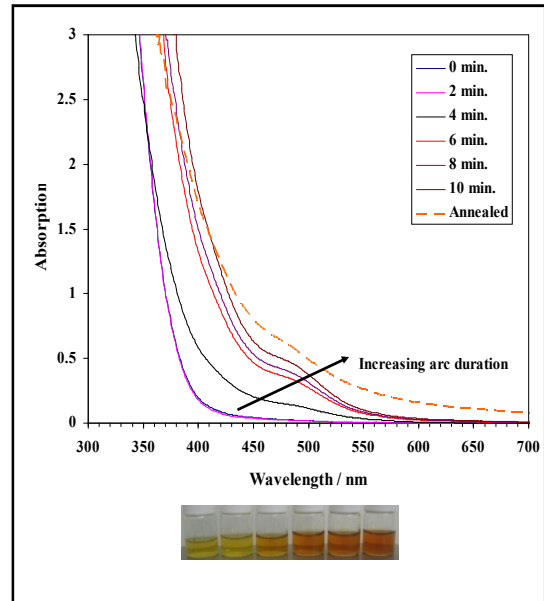
آمده در روش کنونی بزرگ‌تر و توزیع اندازه آن نیز پهن‌تر از روش‌های متداول در ساخت نانوذرات آهن مانند تجزیه حرارتی است، ولیکن روش حاضر یک روش ساده، ارزان و بدون حضور عوامل شیمیایی نظیر احیا کننده‌ها و سورفاکتنت‌ها می‌باشد [۹]. معمولاً کنترل پذیری روی اندازه ذرات در روش‌های شیمیایی به مراتب بیشتر از روش‌هایی مثل تخلیه الکتریکی در محلول است.

آنالیز FT-IR نیز یکی از روش‌های بسیار متداول و مرسوم جهت شناسایی و مشخصه‌یابی مواد آلی و غیر آلی می‌باشد. شکل ۲ طیف FT-IR نانوذرات اکسید آهن به دست آمده بعد از انجام عملیات حرارتی در دمای 600°C به مدت ۲ ساعت را نشان می‌دهد. طیف حاصل حضور باندهای نسبتاً قوی را در محدوده فرکانس‌های پایین ($500\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$) بدلیل ساختار بلوری اکسید آهن نشان می‌دهد. قله‌های ظاهر شده در این محدوده با قله‌های ناشی از فاز هماتیت اکسید آهن همخوانی کامل دارد [۹]. حضور باند مشخصه Fe-O در 579 cm^{-1} موید این مطلب است که اغلب ذرات تشکیل شده دارای فاز بلوری Fe_2O_3 هستند [۱۰]. عدم وجود باندهایی در ناحیه $3400\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ الی 3700 cm^{-1} نشان از حذف گروه‌های هیدروکسیل از سطح نانوذرات در اثر اعمال فرآیند حرارتی می‌دهد [۱۱].

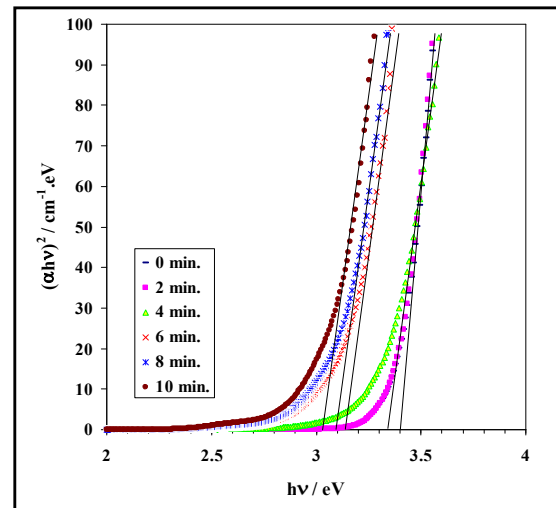
برای اطمینان از تشکیل فاز بلوری Fe_2O_3 از نانوذرات تولید شده بعد از اعمال فرآیند حرارتی آنالیز XRD به عمل آمده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس برای نمونه بعد از پخت در دمای 600°C در کوره به مدت ۲ ساعت حضور قله‌های نسبتاً تیزی در زوایای $33/1^\circ$ ، $35/6^\circ$ ، $40/8^\circ$ ، $49/5^\circ$ ، $54/1^\circ$ ، $62/4^\circ$ ، 64° و $88/5^\circ$ درجه را نشان می‌دهد که متناظر با تشکیل فاز آلفای اکسید آهن و منطبق بر کارت استاندارد شماره ۰۶۶۴-۰۰۳۳ می‌باشد [۱۲]. همچنین میانگین اندازه بلورک‌های بدست آمده با استفاده از رابطه دبی-شرر در حدود ۲۰ nm بوده است. بنابراین با استفاده از دو آنالیز XRD و FT-IR با دقت قابل قبولی می‌توان گفت که محصول تولید شده ناشی از اعمال فرآیند

زمان تخلیه الکتریکی اندازه ذرات تشکیل شده بزرگ تر و شکاف انرژی نانوذرات حاصل کوچک تر خواهد شد. همان گونه که پیش تر نیز بدان اشاره شد یکی از کاربردهای بسیار مهم نانوذرات اکسید آهن در مصارف کاتالیستی است که به دلیل شکاف انرژی مناسب این ماده (۳/۱ eV) می باشد. شکل ۵ نمودار لگاریتمی تغییرات جذبی رودامین B نسبت به غلظت اولیه آن را در حضور نانوذرات اکسید آهن نشان می دهد. همان گونه که از نمودار نیز مشخص است با افزایش زمان تابش نور ماورا بنفش غلظت این ماده رنگی در محیط کاهش می یابد. این امر بیانگر تجزیه این ماده رنگی تحت تابش نور ماورا بنفش در حضور نانوذرات اکسید آهن و کاهش غلظت آن در محیط است. در واقع هنگامی که اشعه ماورای بنفش با یک فوتوکاتالیست نیمه هادی مانند اکسید آهن برخورد می کند، رادیکال ها و یون هیدروکسیل OH تشکیل می شود که قادر به تجزیه و از بین بردن ترکیبات آلی فرار و مضر نظیر فرمالدهید، آمونیاک و ترکیبات مضر دیگری که توسط مصالح ساختمانی، پاک کننده های خانگی و غیره وارد هوا، آب و یا محیط اطراف می شوند، می گردد.

روسلان و همکارانش در سال ۲۰۱۴ نانوذرات Fe_2O_3 را به روش شیمیایی ساخته و برای تجزیه آلاینده مدل فنول مورد

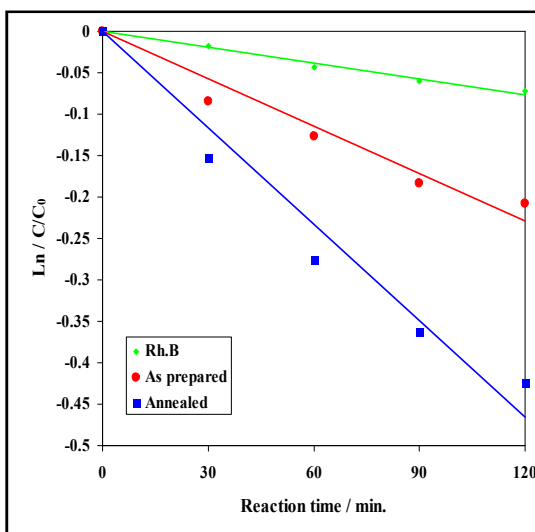


(الف)



(ب)

شکل ۴: طیف جذبی نانوذرات بدست آمده در زمان های مختلف تخلیه الکتریکی (ب) منحنی $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ جهت تعیین شکاف انرژی نانوذرات.



شکل ۵: نمودار لگاریتمی تغییرات جذبی رودامین B در حضور نانوذرات اکسید آهن و تحت تابش نور ماورا بنفش.

اغلب یون های آهن موجود در محلول نمک آهن تبدیل به نانوذرات اکسید آهن شده اند. شکاف انرژی نانوذرات نیز که به کمک رابطه تاوک بدست آمده است در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده از رسم خط مماس بر منحنی $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ بیانگر این است که با افزایش زمان تخلیه الکتریکی از صفر تا ۱۰ دقیقه شکاف انرژی نانوذرات تولیدی از ۳/۴۱ eV به ۳/۰۳ eV کاهش می یابد. به عبارتی دیگر می توان نتیجه گرفت که با افزایش

۴- نتیجه گیری

به کمک منبع سرشار از الکترون پلاسما تخلیه الکتریکی، نانوذرات اکسید آهن در فاز آلفا و با استفاده از احیای نمک آهن برای اولین بار ساخته شده‌اند. نتایج آنالیز XRD و FT-IR نانوذرات تولیدی بعد از عملیات حرارتی، موید تشکیل فاز بلوری اکسید آهن در انتهای فرآیند تخلیه الکتریکی به مدت ۱۰ دقیقه در محلول نمک آهن بوده است. مطالعات میکروسکوپی نیز بیانگر تشکیل ذرات نانومتری با میانگین اندازه‌ای در حدود ۱۰۰ nm بوده که بعد از اعمال عملیات حرارتی به شکل کروی و شبه کروی در آمده‌اند. طیف‌سنجی نوری UV-Vis نیز یک لبه جذب در حدود ۳۷۰ nm را نشان می‌دهد که با افزایش زمان تخلیه الکتریکی در محلول به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابجا می‌شود. خاصیت فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن تولیدی نیز جهت تجزیه ماده رنگی رودامین B به عنوان یک آلاینده مدل و استاندارد تحت تابش نور فرابنفش انجام شد و نتایج بدست آمده بیانگر قابلیت بسیار خوب این نانوذرات در تجزیه ماده رنگی رودامین B بوده است.

مراجع

- [1] S. Guo, G. Zhang, J. Wang, *Journal of Colloid and Interface Science*, **433**, 2014, 1.
- [2] S.K. Maji, N. Mukherjee, *Polyhedron*, **33**, 2012, 145.
- [3] N.A. Roslan, H.O. Lintang, L. Yuliaty, *Materials Research Innovations*, **18**, 2014, S6.
- [4] Y.H. Tan, P.S. Goh, *International Biodeterioration and Biodegradation*, **102**, 2015, 346.
- [5] A. Ashkarran, *Current Applied Physics*, **10**, 2010, 1442.
- [6] A. Ashkarran, *Journal of Cluster Science*, **22**, 2011, 233.
- [7] W. Wu, S. Zhang, X. Xiao, J. Zhou, F. Ren, L. Sun, C. Jiang, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **4**, 2012, 3602.
- [8] R. Kato, T. Komatsu, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **23**, 2013, 167.
- [9] M. Mahmoudi, H. Hosseinkhani, M. Hosseinkhani, S. Boutry, A. Simchi, W.S. Journeay, K. Subramani, S. Laurent, *Chemical Reviews*, **111**, 2011, 253.
- [10] M. Mahmoudi, S. Sant, B. Wang, S. Laurent, T. Sen, *Advanced Drug Delivery Reviews*, **63**, 2011, 24.
- [11] L. Minati, V. Micheli, B. Rossi, C. Migliaresi, L. Dalbosco, G. Bao, S. Hou, G. Speranza, *Applied Surface Science*, **257**, 2011, 10863.
- [12] D. Wodka, R.P. Socha, E. Bielanska, M. Elzbieciak-Wodka, P. Nowak, *Applied Surface Science*, **319**, 2014, 173.

ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که انجام عملیات حرارتی بر نانوذرات اکسید آهن در ۹۷۳ K باعث بهبود خواص فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن خواهد شد. در واقع بازده فرآیند فوتوکاتالیستی نانوذرات تولید شده جهت از بین بردن فنول بعد از زمان ۱۵ ساعت در حدود ۱۰۰٪ بوده است [۳]. در کار حاضر نیز مشخص شده که با اعمال فرآیند حرارتی مناسب بر روی نانوذرات اولیه و بلوری شدن آنها بازده واکنش‌های فوتوکاتالیستی در تجزیه نمونه مدل رودامین B نیز افزایش خواهد یافت. در واقع میزان بلورینگی و سطح موثر دو پارامتر بسیار مهم و تاثیرگذار بر میزان فعالیت فوتوکاتالیستی نانوذرات می‌باشد که در کارهای تحقیقاتی سایر محققین نیز بدان اشاره شده است.

جدول ۱ مقادیر ثابت سرعت واکنش‌های فوتوکاتالیستی مربوط به نانوذرات اکسید آهن بلافاصله بعد از ساخت، بعد از عملیات حرارتی در ۶۰۰ °C و همچنین نمونه رودامین B تنها جهت مقایسه را نشان می‌دهد. همان گونه که از جدول نیز پیداست با اعمال فرآیند حرارتی مناسب بر نانوذرات اولیه و بلوری شدن آنها بازده واکنش‌های فوتوکاتالیستی در تجزیه نمونه مدل رودامین B نیز افزایش داشته است. نتایج به دست آمده بیانگر توانایی نانوذرات اکسید آهن تولید شده به این روش در تجزیه آلاینده استاندارد رودامین B و کاربردهای فوتوکاتالیستی آن تحت تابش UV می‌باشد.

جدول ۱: مقادیر ثابت سرعت مربوط به واکنش‌های فوتوکاتالیستی نانوذرات اکسید آهن و نمونه مرجع.

رديف	نمونه	ثابت سرعت واکنش ($\times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)
۱	رودامین B	۶
۲	نانوذرات اکسید آهن بلافاصله بعد ساخت	۱۹
۳	نانوذرات اکسید آهن بعد از عملیات حرارتی	۳۹