

سنتز نانوذرات آلفا آلومینای آلائیده شده با ناخالصی Fe^{3+} با روش سل-ژل و مطالعه ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی آن‌ها

ابوالفضل خدادادی^۱، مجید فرهمندجو^{۲*} و مجتبی یعقوبی^۱

۱- گروه فیزیک، واحد آیت‌اله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

۲- گروه فیزیک، واحد ورامین، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۷/۰۸/۱۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱

چکیده

در این تحقیق، نانوذرات آلومینای خالص (Al_2O_3) و آلومینای آلائیده شده با ناخالصی آهن ($Fe-Al_2O_3$)، با روش شیمیایی سل-ژل با پیش ماده‌های جدید ساخته شدند. خواص بلوری، اپتیکی، مغناطیسی و مورفولوژیکی آلومینا و تاثیر آهن در آن‌ها، با آنالیزهای XRD، FESEM، TEM، VSM، UV-DRS و FTIR مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. نتایج آنالیز XRD نشان داد که ساختار نانوذرات آلومینا گرمادهی شده در دمای $1000^\circ C$ با وجود ناخالصی آهن، بصورت هگزاگونال در فاز آلفا بدون تغییر باقی می‌ماند. نتایج همچنین نشان داد که اندازه نانوذرات با افزایش درصد ناخالصی کاهش می‌یابد، به طوری که برای نمونه خالص اندازه میانگین نانوذرات ۵۵ nm و برای نمونه ناخالص با درصد ناخالصی ۵٪ اندازه آنها برابر ۴۸ nm به دست می‌آید. نتایج آنالیز اپتیکی FTIR نشان داد که پیوند ارتعاشی در عدد موج 584 cm^{-1} نشانگر پیوند Al-O در نمونه می‌باشد. آنالیز اپتیکی UV-DRS نشان داد که گاف نوار انرژی با وجود ناخالصی ۵٪، از مقدار ۴/۳۴ eV به ۳/۴۰ eV کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آنالیز فتولومینسانس نشان داد که با افزایش درصد ناخالصی از شدت PL کاسته می‌شود که این امر حاکی از کاهش بازترکیب زوج الکترون-حفره و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی نمونه می‌باشد. در نهایت آنالیز مغناطیسی VSM نشان داد که با اعمال ناخالصی، نمونه کامپوزیت به حالت فرومغناطیس تبدیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوکاتالیست، آلومینا، سل ژل، ساختار بلوری، خواص اپتیکی، ناخالصی آهن.

۱- مقدمه

اپتوالکترونیک و پزشکی دارند [۵-۱]. یکی از این اکسیدهای فلزی، اکسید آلومینیوم می‌باشد که یک عایق الکتریکی دارای رسانایی گرمایی نسبتاً بالایی است و بدلیل بالا بودن نقطه ذوب، مقاومت حرارتی بالایی دارد. اکسید

امروزه نانوذرات اکسیدهای فلزی کاربردهای بسیار فراوانی در نیمه رساناها، کاتالیست‌ها، سلول‌های خورشیدی،

* عهده‌دار مکاتبات: مجید فرهمندجو

نشانی: ورامین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت‌اله آملی، گروه فیزیک

تلفن: ۰۱۱-۴۳۲۱۷۶۰۱، دورنگار: ۰۱۱-۴۳۲۱۷۶۰۱، پست الکترونیکی: majidfarahmandjou@gmail.com

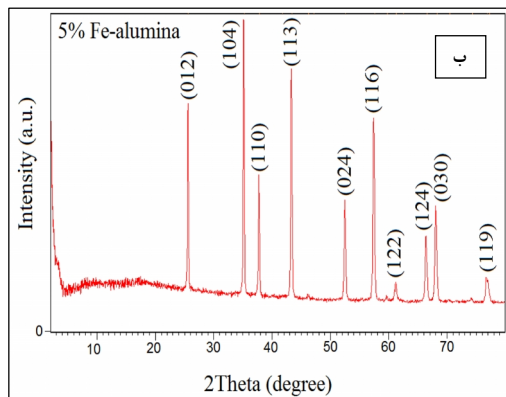
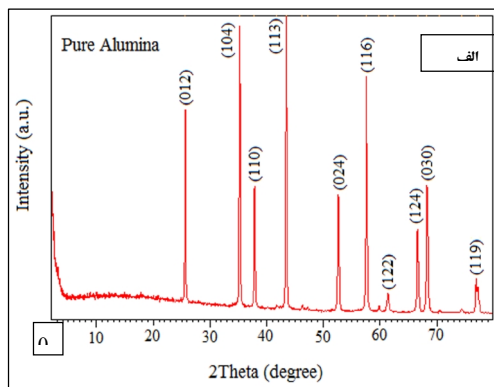
تحقیق، نانوذرات آلومینای خالص و آلومینای آلائیده شده با اتم‌های آهن با روش سل-ژل به کمک پیش ماده‌های جدید $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ و $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ در حضور پایدارساز پلی وینیل پیرولیدون (PVP) ساخته شده‌اند. تفاوت این روش ساخت با سایر مطالعات انجام شده، استفاده از پیش ماده‌های جدید با روش سل-ژل و همچنین استفاده از پایدارساز پلیمری در جهت جلوگیری از کلوخه‌ای شدن نانوذرات و کاهش دمای گذار فاز به حالت آلفا آلومینای و در نهایت بهبود خواص الکترواپتیکی و کاهش E_g از ناحیه فرابنفش می‌باشد. به منظور مطالعه نانوذرات، پس از انجام عملیات گرمایی، تاثیر ناخالصی بر خواص ساختاری، اپتیکی، مورفولوژیکی و مغناطیسی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.

۲- فعالیت‌های تجربی

نانوذرات خالص آلومینا و کامپوزیتی Fe/Al_2O_3 با روش سل-ژل با پیش ماده‌های $AlCl_3$ و $FeCl_3$ ساخته شدند. ابتدا برای ساخت نمونه خالص، محلول ۲ مولار نمک هیدراته $AlCl_3$ تهیه شد. سپس محلول در دمای اتاق تحت همزن مغناطیسی هم‌زده می‌شود، تا محلول شفاف فرامی‌گردد. دمای محلول آلومینا تا $70^\circ C$ افزایش داده و سپس مقدار ۲ ml پایدارساز PVP به محلول اضافه شد. سپس دمای محلول تا $80^\circ C$ افزایش داده و اجازه داده شد تا محلول در مدت زمان ۱۴۰ دقیقه بطور کامل خشک شود. pH محلول در طول آزمایش مقدار ۳ اندازه‌گیری شد. پودر حاصل چندین مرتبه با آب مقطر و اتانول شستشو داده شد تا ناخالصی‌ها از نمونه حذف شوند. برای ساخت نمونه ناخالص Fe/Al_2O_3 ، ابتدا محلول ۲ مولار نمک هیدراته $FeCl_3$ را آماده و سپس این محلول را با درصد مورد نظر به محلول آلومینا اضافه کرده و مشابه با حالت خالص، آزمایش انجام شد. سپس پودرهای نانوذرات بدست آمده در $1000^\circ C$ برای مدت ۳ ساعت تحت عملیات گرمایی قرار داده شدند.

آلومینیوم (آلومینا) ماده جاذبی است که بعنوان کاتالیست و پایه کاتالیست استفاده می‌شود. آلومینا یک عایق شفاف با گاف نوار انرژی ۶-۸ الکترون ولت است. فازهای کریستالی آلومینا شامل: α ، η و γ ، θ ، δ ، β ، κ ، χ ، ϵ و α می‌باشند که دو فاز مهم آن، فاز α دارای ساختار بلوری شش گوشه و فاز γ دارای ساختار مکعبی می‌باشد. فاز α آلومینا (کوراندوم) در دمای بالای $1200^\circ C$ تشکیل می‌شود که پایدارترین فاز ترمودینامیکی آلومینا می‌باشد [۹-۶]. اخیراً نانوذرات آلومینا با روش‌های شیمیایی توسط فرهمندجو و همکاران، ساخته شدند [۱۱، ۱۰]. یون‌های اکسیژن و آلومینیوم در ساختار کوراندوم به صورت هگزاگونال متراکم ظاهر می‌شوند. همچنین فاز گامای آن به عنوان کاتالیست و محافظ کاتالیست کاربرد زیادی در کامپوزیت‌های ساختاری و صنعت سرامیک دارد و از نظر تجاری نیز در تزئینات، داروسازی و رنگرزی وسیع استفاده می‌شود. بسیاری از خواص فیزیکی و شیمیایی آلومینا را می‌توان با آلائیدن مقدار کمی از عناصر واسطه نظیر Zn، Cu و Fe بهبود بخشید. از بین این فلزات واسطه، ناخالصی آهن در اکسید آلومینیوم به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات، سبب بهبود خاصیت کاتالیستی و خواص مغناطیسی آن می‌شود. با وارد کردن یون‌های آهن به درون شبکه آلومینا، خواص فیزیکی آن بطور چشمگیر زیاد شده و بهبود می‌یابد. در این نانومواد، قابلیت جذب بیشتری برای Al_2O_3 وقتی اتم‌های Fe^{3+} در سطح آنها قرار می‌گیرند، نسبت به حالت حجمی وجود دارد [۱۲]. در تحقیقی دیگر فرهمندجو و همکاران [۱۱، ۱۰] نشان دادند که ضمن اینکه آلومینا در حالت کلی یک ماده دیامغناطیس است، با اضافه کردن ناخالصی آهن، خاصیت فرومغناطیس در آن ایجاد می‌شود. روش‌های شیمیایی نسبت به روش‌های فیزیکی، به سبب انجام فرآیند در دمای پایین، کنترل در یکنواختی و رشد نانوذرات و اقتصادی بودن آن قابلیت بالایی در تولید نانومواد دارا می‌باشند که از آن جمله می‌توان به روش سل-ژل و روش هم‌رسوبی اشاره کرد [۱۷-۱۳]. در این

ساختار هگزاگونال می‌باشند. اندازه نانوکریستال‌ها با استفاده از رابطه شرر [۱۸]، برای نمونه خالص برابر ۵۵ nm و برای نمونه با ناخالصی ۵٪ اندازه آنها برابر با ۴۸ nm به دست می‌آید. در طیف پراش اشعه ایکس، هیچ اثری از قله‌های اتم‌های ناخالصی Fe در نمونه دیده نمی‌شود، که نشان دهنده جایگزینی مناسب یون‌های آهن Fe^{3+} در شبکه آلومینا و حل شدن ساختاری می‌باشد، بطوریکه جابجایی در تمامی قله‌ها به سمت زوایای کمتر و افزایش در فاصله بین صفحه‌های مشاهده می‌شود. همچنین هیچ اثری از فازهای دیگر آلومینا در آنالیز XRD مشاهده نمی‌شود، که نشان دهنده خلوص نمونه می‌باشد. در این روش ساخت، دمای گذار فاز از حالت γ به حالت α آلومینا به $1000^\circ C$ کاهش داشته است که نسبت به گزارش‌های قبلی بهبود یافته است [۸-۱۱].



شکل ۱: الف) الگوهای XRD مربوط به نانوذرات آلومینا خالص و ب) آلومینا با ناخالصی ۵٪ آهن.

۳-۲- بررسی مورفولوژی سطح

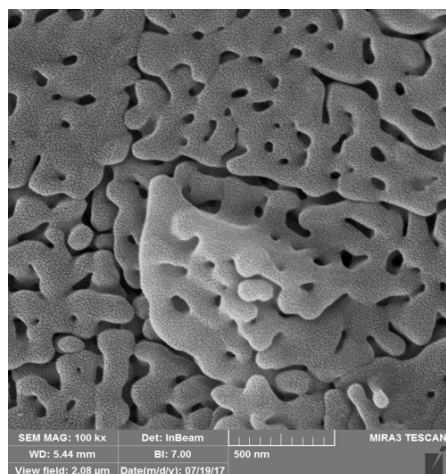
به منظور تعیین مورفولوژی نانوذرات آلومینا (Al_2O_3) از آنالیز

برای مطالعه نمونه‌ها، خواص ساختاری، اپتیکی و مورفولوژیکی نانوذرات مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. الگوهای XRD با استفاده از یک دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل X'Pert PRO MPD PANalytical Compan ساخت کشور هلند، با تابش طول موج $K\alpha$ مس ثبت شد. اندازه‌گیری طیف بازتاب/عبورپختی (DRS) منتشر شده با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری اسپکترومتر Avantes مدل Avaspec-2048-TEC با AvaLamp DH-S Setup انجام شد. اندازه‌گیری طیف عبور نوری در ناحیه طیفی مادون قرمز (FTIR) توسط دستگاه طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مدل Perkin Elmer Spectrum RX I ساخت شرکت ایالات متحده آمریکا به ثبت رسید. برای اندازه‌گیری طیف فتولومینسانس (PL) ماده از یک دستگاه طیف‌سنجی اسپکترومتر Avaspec2048-TEC که تولید شرکت Avantes هلند است در طول موج تحریک ۲۷۹ نانومتر استفاده شد. همچنین برای بررسی ساختار میکروسکوپی و یکنواختی نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FESEM) با دستگاه MIRA3 شرکت TE-SCAN استفاده شده است.

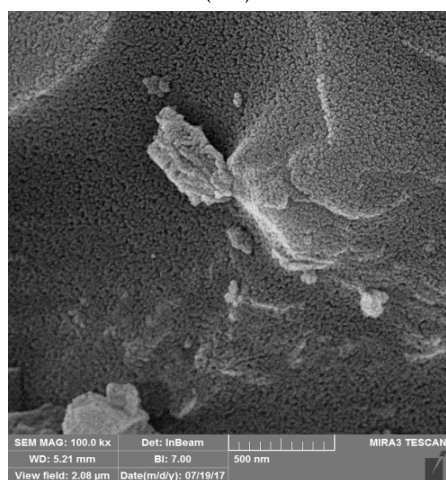
۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز XRD

شکل ۱، آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه خالص آلومینا و نمونه ناخالص Fe/Al_2O_3 را نشان می‌دهد. ساختار بلوری، اندازه ذره و فازهای موجود در نمونه با آنالیز XRD در دمای اتاق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. همان‌گونه که از تصاویر مقایسه‌ای XRD مشخص است، ساختار نمونه بصورت هگزاگونال می‌باشد، که با افزودن ناخالصی Fe، ساختار بدون تغییر باقی می‌ماند. به طوری که یون‌های ناخالصی Fe^{3+} در ماتریس Al_2O_3 جایگزین یون‌های Al^{3+} با تغییر کمی در ثابت‌های شبکه شده است. قله‌های ایجاد شده در طیف پراش اشعه ایکس (XRD)، نشانگر فاز α آلومینا با



(الف)



(ب)

شکل ۲: تصاویر FESEM نانوذرات Al_2O_3 (الف) نمونه خالص و (ب) نمونه‌های آلاییده شده با آهن ۵٪.

نهایت قله جذب شدید در عدد موج 584 cm^{-1} مربوط به ارتعاش Al-O می‌باشد. دو قله جذبی در عدد موج‌های 845 cm^{-1} و 631 cm^{-1} مربوط به ارتعاش AlO_4 سایت تراهدرال و AlO_6 سایت اکتاهدرال آلومینا می‌باشد [۹،۱۰].

۳-۵- آنالیز UV-Vis

به منظور تعیین طول موج جذب و تعیین انرژی گاف نواری نمونه‌ها از آنالیز تابش ماورای بنفش استفاده شد. نتایج بدست آمده در شکل ۵، نشان دادند که با وجود ناخالصی Fe، طول موج جذب از 285 nm برای نانوذرات خالص به 365 nm

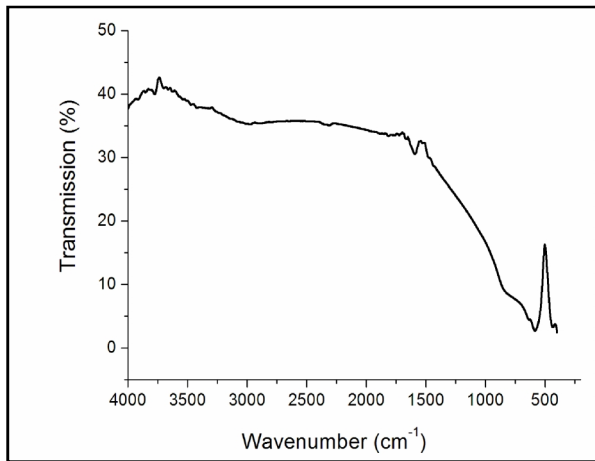
میکروسکوپ الکترونی اثر میدانی (FESEM) استفاده گردید. شکل ۲ تصویر FESEM نانوذرات خالص Al_2O_3 (شکل الف) و نانوذرات کامپوزیتی با ناخالصی آهن ۵٪ (شکل ب) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است با افزایش ناخالصی، یکنواختی نانوذرات افزایش یافته است، در حالی که اندازه آنها نسبت به نمونه خالص نانوذرات بطور میانگین تا 48 nm کاهش داشته است. در واقع با کاهش اندازه نانوذرات، نیروی بین مولکولی و بین اتمی افزایش یافته و موجب نزدیک شدن نانوذرات به یکدیگر می‌شود [۱۸].

۳-۳- آنالیز EDX

به منظور تعیین درصد عنصری نمونه، آنالیز EDX انجام شد. شکل ۳، آنالیز EDX نمونه های خالص و ناخالص ۵٪ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، بجز اتم های Al، Fe و O عنصر دیگری وجود ندارد، که حاکی از خلوص نمونه می‌باشد. درصد وزنی آهن در نمونه ناخالص $2/51\%$ می‌باشد که مقداری کمتر از مقدار درصد مولی است. مقدار کمی ناخالصی آهن در نمونه خالص دیده می‌شود که ناشی از آلودگی سیستم اندازه گیری می‌باشد. همچنین درصد وزنی Al برابر با $64\text{ wt.}\%$ و درصد وزنی O برابر با $35/61\text{ wt.}\%$ می‌باشد، که نشان دهنده تشکیل ساختار شیمیایی مناسب برای Al_2O_3 در نمونه خالص می‌باشد.

۳-۴- آنالیز FTIR

به منظور تعیین گروه عاملی و پیوندهای ارتعاشی در نمونه از آنالیز تبدیل فوریه تابش قرمز (FTIR) در بازه عدد موج $4000-400\text{ cm}^{-1}$ استفاده شد. شکل ۴، طیف FTIR نمونه با ناخالصی ۵٪ را نشان می‌دهد. برای این نمونه، قله جذب ایجاد شده در عدد موج 2349 cm^{-1} مربوط به پیوند ارتعاشی C-H می‌باشد و قله ایجاد شده در عدد موج 1561 cm^{-1} مربوط به پیوند ارتعاشی کششی C=C و در



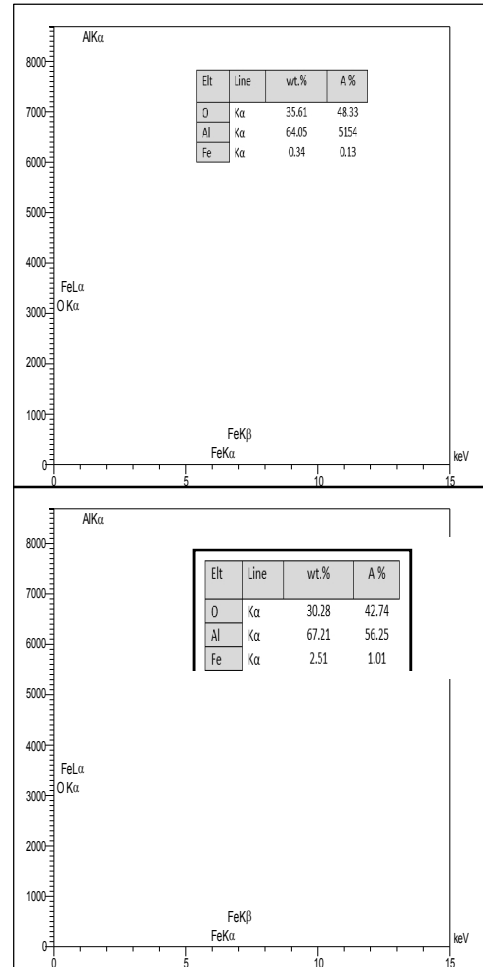
شکل ۴: طیف مادون قرمز (FTIR) نمونه ناخالص ۵٪.

Al₂O₃ می باشد [۱۲].

با توجه به شکل ۱ مشاهده می شود که می توان جهت تفسیر رفتار سینترینگ اسپینل سه مرحله را از یکدیگر متمایز نمود. در مرحله اول با عبور جریان از نمونه و قالب، تغییری در جابجایی اتفاق نمی افتد و فقط گرم شدن پودر و قالب به طور همزمان انجام می شود. در مرحله دوم با گذشت زمان و به دنبال آن افزایش دما، مشاهده می شود که نمودار جابجایی به سمت منفی محور حرکت کرده و در حقیقت انبساطی در نمونه اتفاق می افتد. این انبساط را می توان به فرآیند بازآرایی ذرات و سنتز اسپینل نسبت داد. در مرحله سوم با ادامه فرآیند گرمایش، انقباض نمونه رخ داده و نمودار جابجایی در جهت مثبت محور حرکت کرده و در حقیقت افزایش چگالی نمونه اتفاق خواهد افتاد. افزایش انقباض ناشی از به هم فشردن ذرات پودری و همچنین اعمال فشار بر نمونه می باشد. در انتهای فرآیند نیز جابجایی ثابت بوده و هیچ گونه تغییری نداشته است.

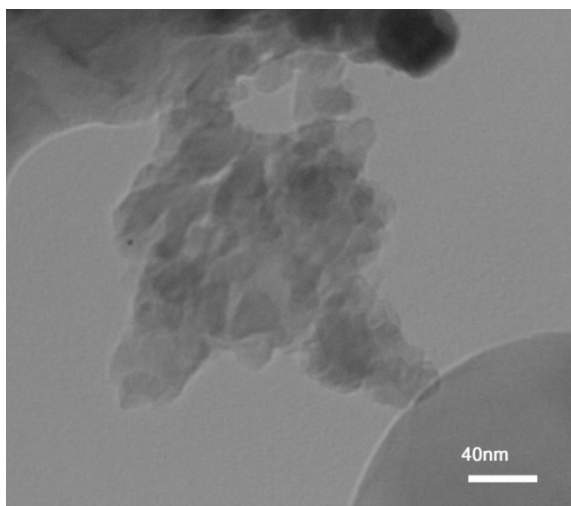
۳-۶- آنالیز TEM

به منظور تعیین اندازه دقیق و شکل ظاهری نانوذرات، آنالیز TEM انجام گرفت. برای این منظور، پودر نانوذرات در حلال اتانل حل شده و سپس روی صفحه های مسی قرار داده شد. شکل ۶، آنالیز TEM نانوذرات Al₂O₃ با ناخالصی ۵٪ را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است، شکل



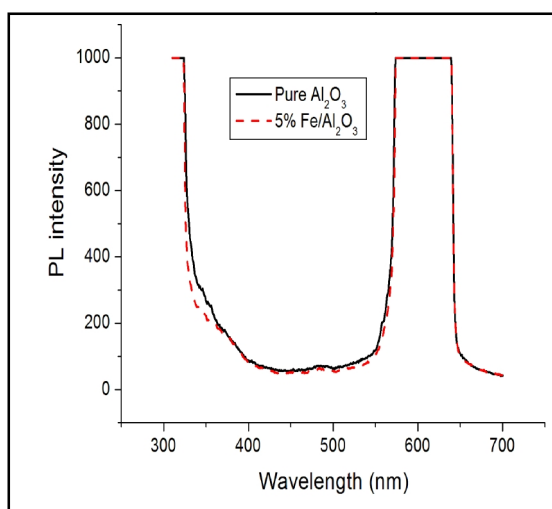
شکل ۳: آنالیز درصد عنصری نمونه های، الف) آلومینا خالص و ب) آلومینا همراه با ناخالصی آهن ۵٪.

برای نانوذرات با ناخالصی ۵٪ افزایش می یابد که نشان دهنده انتقال قرمز در نمونه با اعمال ناخالصی می باشد. برای محاسبه گاف نوار انرژی، با استفاده از تابع Tauc (تائوک)، منحنی $(F(R)hv)^2$ بر حسب انرژی رسم شد، به طوری که $F(R)$ تابع کوبلکا-مونک تعریف می شود [۲۲-۱۷]. نتایج نشان می دهند که گاف نواری برابر با ۴/۳۴ eV و ۳/۴۰ eV به ترتیب برای نمونه های خالص (شکل الف) و نمونه با ناخالصی ۵٪ (شکل ب) به دست می آید. نتایج نشان می دهند که گاف نواری محاسبه شده در این روش در مقایسه با گزارش های منتشر شده، $(E_g=6 \text{ eV})$ به مقدار قابل توجهی کاهش داشته است [۸-۱۱]. علت کاهش گاف نوار انرژی با افزایش درصد ناخالصی، برهم کنش های sp-d نوار انرژی الکترون های d نوار ناخالصی Fe^{3+} و الکترون های نواری در پایین نوار رسانش

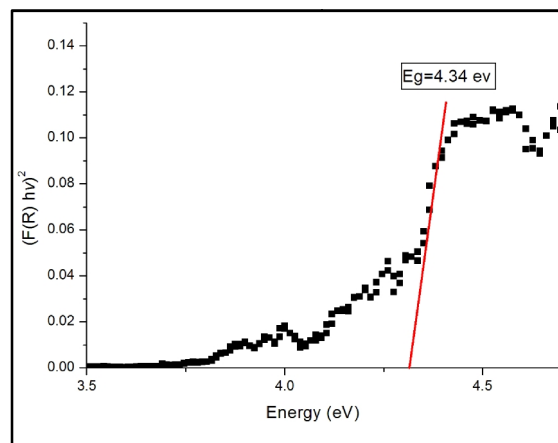


شکل ۶: تصویر TEM نمونه‌های سنتز شده با درصد ناخالصی ۵٪.

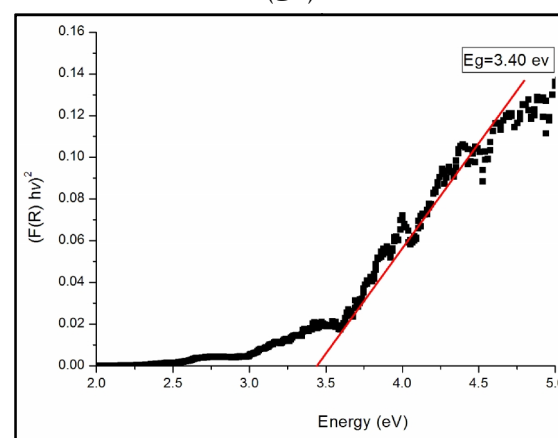
افزایش می‌دهد. قله‌هایی در نمونه ایجاد می‌شوند که ناشی از نقص شبکه به واسطه تهی‌جای اکسیژن پایین نوار رسانش در شبکه Al_2O_3 می‌باشد. در واقع با افزودن ناخالصی Fe^{3+} یک نوار ناخالصی در پایین نوار رسانش Al_2O_3 ایجاد می‌شود، که از باز ترکیب مجدد الکترون حفره جلوگیری کرده و باعث جداسازی الکترون حفره می‌شود. این نوار ناخالصی با نوار انرژی شبکه O هیبرید کرده و با تشکیل نوار ناخالصی از به دام افتادن حفره‌ها توسط نوار رسانش آلومینا، جلوگیری کرده و باعث کاهش گاف نوار انرژی و در نتیجه کاهش شدت PL می‌شود [۱۲].



شکل ۷: طیف فتولومینسانس (PL) نمونه‌های خالص و ناخالص بر حسب طول موج.



(الف)



(ب)

شکل ۵: منحنی تانوک نمونه‌های، الف) خالص و ب) با ناخالصی ۵٪ برای محاسبه گاف نواری.

نانوذرات بصورت شبه کروی می‌باشد که تا اندازه‌ای به هم چسبیده می‌باشند، که این بدلیل حذف پایدارساز PVP پس از گرمادهی در دمای $1000^\circ C$ می‌باشد. در حقیقت با حذف پایدارسازها، نیروی جاذبه بین اتمی و بین مولکولی نانوذرات افزایش یافته و باعث کلوخه ای شدن آنها می‌شود [۲۴-۲۹].

۳-۷- آنالیز فتولومینسانس

به منظور تعیین برهمکنش زوج الکترون-حفره در نمونه‌ها، از آنالیز فتولومینسانس (PL) استفاده شد. شکل ۷، آنالیز PL را برحسب طول موج نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، در نمونه با ناخالصی ۵٪، شدت PL کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان باز ترکیب زوج الکترون-حفره کاهش می‌یابد و این عامل، بازدهی فتوکاتالیستی نمونه را

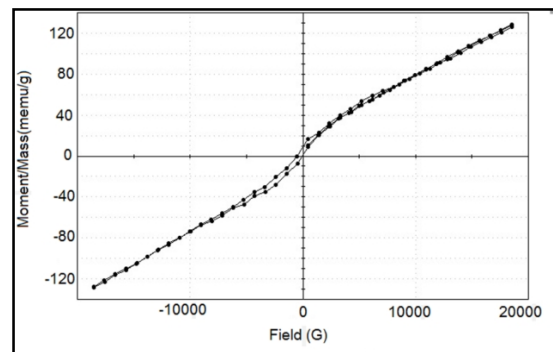
در نمونه وجود داشته باشد، تا ۴۸ nm کاهش می‌یابد، در حالی که ساختار آلومینا بدون تغییر است. آنالیز ایتیکی UV-DRS نشان داد که با افزایش ناخالصی Fe، گاف نوار انرژی در مقایسه با گزارش‌های منتشر شده قبلی ($E_g = 6 \text{ eV}$)، کاهش قابل توجهی داشته و به مقدار ۳/۴ eV تقلیل می‌یابد. آنالیز فتولومینسانس نشان داد که فعالیت فتوکاتالیستی نمونه با کاهش باز ترکیب الکترون-حفره، برای نمونه ناخالص افزایش می‌یابد. در نهایت آنالیز مغناطیسی VSM حاکی از ایجاد خاصیت فرومغناطیس در دمای اتاق در نمونه برای نانوذرات کامپوزیتی آهن-آلومینا می‌باشد، که با توجه به گزارشات قبلی، اندازه میدان وادارندگی از مقدار ۲۲/۶۹ G به ۱۲۸ G در این تحقیق افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] S. Shadrokh, M. Farahmandjou, T.P. Firozabadi, *Physical Chemistry Research*, **4**, 2016, 153.
- [2] M. Farahmandjou, N. Golabiyani, *International Journal of Bio-Inorganic Hybrid Nanomaterials*, **5**, 2016, 73.
- [3] M. Dastpak, M. Farahmandjou, T.P. Firozabadi, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **29**, 2016, 849.
- [4] M. Farahmandjou, S. Honarbakhsh, S. Behrouziniab, *Physical Chemistry Research*, **4**, 2016, 655.
- [5] M. Farahmandjou, F. Soflaee, *Transport Phenomena in Nano and Micro Scales*, **3**, 2015, 100.
- [6] R. Annamalai, F. Nekatibeb, A. Upadhyaya, D.K. Agrawal, *Materials Research Innovations*, **17**, 2013, 10.
- [7] R. Annamalai, A. Upadhyaya, D. Agrawal, *Bulletin of Materials Science*, **36**, 2013, 447.
- [8] D. Jeyasimman, R. Narayanasamy, R. Ponalagusamy, V. Anandakrishnan, M. Mamaraj, *Materials & Design*, **64**, 2014, 783.
- [9] D. Jeyasimman, K. Sivaprasad, S. Sivasankaran, R. Ponalagusamy, R. Narayanasamy, V. Iyer, *Advanced Powder Technology*, **26**, 2015, 139.
- [10] M. Farahmandjou, N. Golabiyani, *Transport Fenomena in Nano & Micro Scale*, **3**, 2015, 100.
- [11] M. Farahmandjou, N. Golabiyani, *Journal of Ceramic Processing Research*, **16**, 2015, 237.
- [12] A. Mahapatra, B.G. Mishra, G. Hota, *Journal of hazardous materials*, **258**, 2013, 116.
- [13] M. Farahmandjou, M. Ramezani, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **11**, 2015, 115.
- [14] M. Farahmandjou, S. Jorablu, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, **26**, 2015, 281.
- [15] M. Farahmandjou, P. Khalili, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **7**, 2013, 462.
- [16] M. Farahmandjou, M. Zarinkamar, *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, **48**, 2015, 5.
- [17] M. Farahmandjou, S. Jurablu, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **9**, 2015, 261.
- [18] P. Scherrer, *Mathematisch-Physikalische Klasse*, **2**, 1918, 98.
- [19] B. Khoshnevisan, M.B. Marami, M. Farahmandjou, *Chineses Physics Letters*, **35**, 2018, 027501.

۳-۸- آنالیز مغناطیسی VSM

آلومینا یک عایق شفاف می‌باشد و از نظر مغناطیسی، رفتار دیامغناطیس دارد. با اعمال ناخالصی Fe به ساختار Al_2O_3 ، رفتار آنها به حالت فرومغناطیس تغییر می‌کند و اثر مغناطیسمقاومت تونلی در آنها ایجاد می‌شود که در حوزه اسپین الکترونیک کاربرد ویژه‌ای دارند. برای تعیین رفتار مغناطیسی نمونه، آنالیز VSM انجام شد. شکل ۸، منحنی مغناطش برحسب میدان مغناطیسی H نمونه با ناخالصی ۵٪ را نشان می‌دهد. مقدار مغناطش اشباع (M_s) و میدان وادارندگی (H_c) برای نمونه ناخالص به ترتیب برابر با ۰/۱۴ emu/g و ۱۲۸ G به دست می‌آید، که نشان دهنده رفتار فرومغناطیسی آلومینا در دمای اتاق، با وارد شدن ناخالصی Fe در نمونه است. در مقایسه با دیگر مطالعات، میدان وادارندگی و مغناطش اشباع به میزان قابل توجه افزایش پیدا کرده است [۳۰].



شکل ۸: منحنی مغناطش نمونه $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ با ناخالصی ۵٪ بر حسب میدان مغناطیسی.

۳- نتیجه‌گیری

نانوذرات آلومینای خالص به همراه نانوذرات کامپوزیتی آهن-آلومینا، با روش سل-ژل با پیش ماده‌های جدید با موفقیت سنتز شدند. نتایج XRD نشان دادند که فاز آلfa آلومینا با ساختار هگزاگونال که در گزارشات قبلی در دمای بالای 1200°C تشکیل می‌گردید، در این تحقیق با کاهش دما، در دمای 1000°C ایجاد شدند. همچنین نتایج نشان دادند که اندازه نانوذرات در حالتی که ناخالصی آهن به میزان ۵٪

- [25] M. Farahmandjou, M. Zarinkamar, *Journal of Ceramic Processing Research*, **17**, 2016, 166.
- [26] M. Farahmandjou, M. Ramezani, *Physical Chemistry Research*, **3**, 2015, 293.
- [27] M. Farahmandjou, *Journal of nanostructures*, **2**, 2014, 413.
- [28] M. Farahmandjou, F. Soflaee, *Physical Chemistry Research*, **3**, 2015, 193.
- [29] M. Farahmandjou, F. Soflaee, *Chinese Journal of Physics*, **53**, 2015, 080801.
- [30] K. Nomura, R. Kinoshita, I. Sakamoto, J. Okabayashi, Y. Yamada, *Hyperfine Interact*, **208**, 2012, 65.
- [20] M.B. Marami, M. Farahmandjou, B. Khoshnevisan, *Journal of electronic Materials*, **47**, 2018, 3741.
- [21] F. Akhtari, S. Zorriasatein, M. Farahmandjou S.M. Elahi, *International Journal of Applied Ceramics Technology*, **15**, 2018, 723.
- [22] A. Jafari, S. Khademi, M. Farahmandjou, *Materials Research Express*, **5**, 2018, 095008.
- [23] F. Akhtari, S. Zoriasatain, M. Farahmandjou, S.M. Elahi, *Materials Research Express*, **5**, 2018, 065015.
- [24] M. Farahmandjou, *Journal of superconductivity and novel magnetism*, **25**, 2012, 2075.