فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۷، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۷

تاثیر ناخالصی کبالت (Co) بر ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی نانوکریستال‌های اکسید روی (ZnO) تهیه شده با روش همرسوبی

مجید فرهمند جو[۱*]، فرشته اختری[۲]، محمد باقر مرامی[۳]

[۱] دانشیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

[۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال، تهران، ایران

[۳] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

* farahmandjou@iauvaramin.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۶ مهر ۱۳۹۷

پذیرش: ۳ آذر ۱۳۹۷

کلید واژه:

نانوذرات اکسید روی، ناخالصی کبالت، ساختار کریستالی، همرسوبی، سنتز شیمیایی

چکیده:

در این تحقیق نانوذرات خالص ZnO و آلیاژی Co-ZnO با درصدهای ناخالصی ۵٪ و ۱۰٪ کبالت و با پیش ماده‌های جدید سولفات روی و کلرید کبالت در حضور پایدارسازهای $NaBH_4$ و CTAB با روش همرسوبی ساخته شدند. به منظور تعیین خواص بلوری، اپتیکی و موفولوژیکی از نمونه‌ها آنالیزهای XRD، FTIR، TEM، EDX، FESEM و UV-DRS صورت گرفت. نتایج ساختاری XRD نشان داد که نمونه‌های خالص و به همراه ناخالصی دارای ساختار هگزاگونال هستند. همچنین نتایج پراش اشعه ایکس نشان داد که با افزایش ناخالصی Co از اندازه نانوذرات تا ۴۰nm برای حالت ۱۰٪ کاسته می‌شود. نتایج آنالیز FESEM حاکی از یکنواختی نانوذرات می‌باشد، بطوری‌که با افزایش ناخالصی کبالت از میزان یکنواختی آنها کاسته می‌شود. نتایج آنالیز عنصری EDX نشان داد که درصد وزنی Zn برای نمونه‌های ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ بترتیب برابر با ۸۱wt%، ۷۹/۲wt% و ۷۴/۴wt% می‌باشد که این کاهش، نشان دهنده ورود ناخالصی کبالت بصورت درون شبکه‌ای و جایگزینی آن با اتم‌های Zn می‌باشد. نتایج آنالیز TEM نشان دادند که نانوذرات با ناخالصی ۵٪ بصورت شبه کروی در اندازه ۵۵nm تشکیل می‌شوند. نتایج آنالیز FTIR حاکی از قله جذب بسیار شدیدی در عدد موج $۴۳۴cm^{-1}$، متعلق به پیوند ارتعاشی Zn-O و قله جذب ایجاد شده در عدد موج $۳۴۳۴cm^{-1}$ مربوط به فعالسازی رادیکال‌های OH می‌باشد که با افزودن ناخالصی مقدار جذب آن افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش فعالیت فتوکاتالیستی در این نمونه می‌شود. آنالیز UV-DRS، نشان داد که گاف نوار انرژی نمونه با افزایش ناخالصی کبالت، از ۳/۱۷eV برای نمونه خالص اکسید روی تا ۲/۸۸eV در نمونه‌ای با ناخالصی ۱۰٪ بطور چشمگیری کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

امروزه ساخت نانوذرات اکسید فلزی کاربردهای فراوانی را در زمینه‌های صنعت و پزشکی پیدا کرده‌اند[۱-۲۲]. نانوذرات اکسید روی (ZnO) یکی از مهمترین نیمرسانا ها است که در زمینه‌های قطعات اپتیکی، الکترونیکی و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

سرامیک‌ها بیشترین کاربردها را به خود اختصاص داده است. اخیرا سنتز نانوذراتی متشکل از اکسیدهای فلزات واسطه، در سال‌های اخیر، علایق زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲۳-۲۵]. به تازگی نانوذرات ZnO توسط گروه ما با روش‌های شیمیایی در آزمایشگاه ساخته شده‌اند [۲۶و۲۷]. تحقیقات نشان می‌دهند که آلایش اکسید روی با فلزات واسطه مورد توجه بیشتری قرار گرفته است، زیرا توسعه و بهبود ویژگی‌های الکتریکی، اپتیکی، ترموالکتریکی و مغناطیسی بخصوص خاصیت فرومغناطیسی آنها در دمای اتاق زمینه‌ی کاربری آنها را در آشکارسازها، سنسورهای با حساسیت بالا، تجهیزات اپتیکی و سلول‌های خورشیدی، مهیاتر می‌کند. اکسید روی یک نیمرسانای گروه II-VI با ساختار کریستالی هگزاگونال ورتزایت و باند گاف پهن و مستقیم ۳/۳۷ eV با انرژی بستگی اکسایتونی ۶۰ MeV در دمای اتاق است. گزارشات متعددی در زمینه ی دوپ فلزاتی از قبیل Ni, Fe, Mn, Co درون ZnO منتشر شده است [۲۸-۳۰]. از بین فلزات واسطه کبالت کاندید بهتری برای آلایش با این نانوذرات است، چرا که شعاع یونی Co^{2+} بسیار نزدیک به شعاع یونی Zn^{2+} است که باعث می‌شود یون‌های دوپ شده درون ماتریس میزبان به طور همگن جایگزین شوند، بدون آنکه ساختارکریستالی آن را تغییر دهد و یا فازهای ثانویه یا ساختار خوشه ای تشکیل دهند. همچنین با افزودن Co به درون ساختار ZnO، خواص اپتیکی، مغناطیسی و همچنین فتوکاتالیستی بهبود می‌یابد. روش‌های متعددی برای ساخت این نانوذرات از قبیل همرسوبی، سل ژل، هیدروترمال و ... گزارش شده است [۳۱و۳۲]. در تحقیقی، نائم و همکاران (۲۰۰۶)، نانوذرات Co:ZnO را با پیش‌ماده‌های استات روی و استات کبالت در حضور پایدارساز اتیلن گلیکل با درصدهای متفاوت سنتز کردند و اندازه متوسط نانوذرات را در حدود ۲۲ نانومتر بدست آوردند. آنها بهترین درصد ناخالصی کبالت را ۸ درصد گزارش کردند [۳۳]. در تحقیقی دیگر باسیس و همکاران (۲۰۱۴)، نانوذرات اکسید روی آلائیده با اتم‌های کبالت با درصدهای مختلف را با روش سریع احتراق به کمک مایکروویو با پیش‌ماده‌های نیترات روی و سولفات روی و همچنین اوره به عنوان سوخت، نانوذرات در بازه ۱۹ تا ۲۴ نانومتر که گاف نوار انرژی را تا ۲/۸۸eV کاهش داد، تولید کردند [۳۴]. اخیرا گروه تحقیقاتی فرهمندجو و همکاران (۲۰۱۸)، نانوذرات Co-ZnO را با پیش ماده‌های نیترات روی و سولفات کبالت با درصدهای متفاوت ۱ تا ۱۰ درصد کبالت [۳۵] و در روشی دیگر با پیش ماده‌های نیترات روی و کلرید کبالت با پیش ماده‌های متفاوت ۱تا ۲۵ درصد کبالت در حضور پایدار ساز اتیلن گلیکل و رسوبگر سود با موفقیت با روش همرسوبی سنتز کردند و خواص کریستالی، مورفولوژیکی و اپتیکی آنها را مورد بررسی قرار دادند [۳۶]. روش همرسوبی در مقایسه با سایر روش‌ها دارای سنتز آسان‌تر و از نظر اقتصادی به صرفه تر است، مهم‌تر آنکه غلظت پیش ماده‌ها، زمان واکنش آنها، دما و همگن بودن محصولات به دقت قابل کنترل است [۳۷]. در این کار تحقیقی نانوذرات خالص ZnO و آلیاژی Co/ZnO با درصدهای مختلف کبالت با پیش ماده‌های جدید سولفات روی و کلرید کبالت در حضور پایدارسازهای $NaBH_4$ و CTAB با روش همرسوبی برای اولین بار ساخته می‌شوند. هدف از انجام این پژوهش، یافتن درصد مناسبی از کبالت

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

است که بدون تغییر در ساختار بلوری اکسید روی، با کاهش اندازه نانوکریستال‌ها، باعث کاهش در گاف نـواری و بهبـود خواص اپتوالکترونیکی شـود. همچنـین تـاثیر ایـن دو نـوع پایدارساز بر خواص مورفولوژیکی، بلوری و اندازه کریـستالی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- فعالیت‌های تجربی

نانوذرات ZnO خالص و آلیاژی Co-doped ZnO با روش همرسوبی ساخته شدند. برای سـاخت نمونـه خـالص ابتـدا، پیش ماده‌های سولفات روی و کلرید کبالت را در ۵۰ml آب خالص بصورت ۱ مولار توسط همزن مغناطیـسی در دمـای اتاق حل شـدند. پـس از گذشـت ۱۰ دقیقـه، پایدارسـازهای $NaBH_4$ و CTAB بـصورت محلـول در آب حـل شـدند و دمای محلول تا ^oC ۸۰ افزایش داده شد و اجازه داده شد تـا محلول به طور کامل خشک شود. پس از آن به منظور حذف ناخالصی‌ها، پودر نمونه‌های حاصـل را چنـدین بـار بـا آب و اتانول شستـشو داده و در نهایـت در آون در دمـای ^oC ۱۰۰ خشک شدند. برای ساخت نمونه ناخالص درصدهـای مـولی ٪۵ و ۱۰٪ از کبالت را به محلول روی اضافه کرده و مـشابه روش ساخت نمونه خالص، پس از خالص سـازی و خـشک شدن نمونه‌هـای پـودری در دمـای ^oC ۶۰۰ بـرای مـدت ۴ ساعت تحت عملیات گرمـایی قـرار گرفتنـد. بـرای مطالعـه نمونه‌ها، خواص ساختاری، اپتیکی و مورفولوژیکی نـانوذرات مورد مطالعـه و بررسـی قـرار گرفتنـد. الگوهـای XRD بـا استفاده از یک دستگاه پـراش اشـعه ایکـس (XRD) مـدل X'Pert PRO MPD PANalytical Compan سـاخت کشور هلند، با تابش Kα مس (Cu) ثبت شد. انـدازه‌گیـری طیـف بازتـاب/عبـور پخـشی (DRS) منتـشر شـده توسـط دستگاه اندازه‌گیری اسپکترومتر Avantes مدل Avaspec-2048-TEC بـا AvaLamp DH-S Setup انجـام شـد. اندازه‌گیری طیف عبور نوری در ناحیه طیفـی مـادون قرمـز (FTIR) توسط دستگاه طیف سنجی تبـدیل فوریـه مـادون قرمـــز مـــدل Spectrum RX I ســـاخت شـــرکت PerkinElmer ایـالات متحـده آمریکـا بـه ثبـت رسـید. همچنین برای بررسـی سـاختار میکروسـکوپی و یکنـواختی نـــانوذرات از میکروســـکوپ الکترونـــی روبـــشی انتـــشار میـدانی (FESEM) بـا دسـتگاه MIRA3 شـرکت TE-SCAN استفاده شده است.

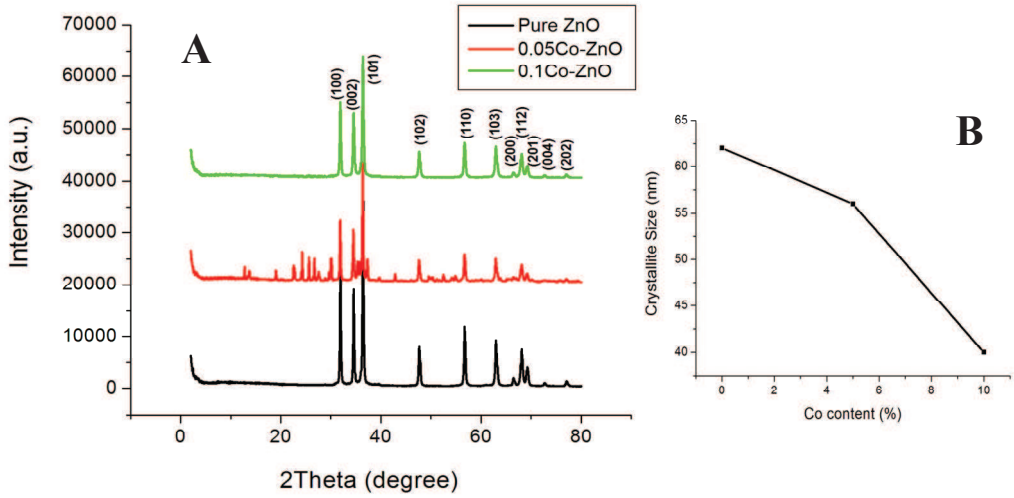
۳- نتایج و بحث

شکل ۱A نتایج آنالیز XRD نمونه‌های خالص و نمونه‌های ٪۵ و ٪۱۰ ناخالصی Co را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در دمـای ^oC ۶۰۰ برای مدت ۴ ساعت گرمادهی شدند. قله‌های بوجود آمده نشانگر ساختار هگزاگونال ZnO در نمونه‌ها می‌باشـند. هیچ اثری از قله‌های ناخالصی ZnO در طیف اشعه X دیده نمی‌شود که این حاکی از نفـوذ یـون‌هـای Co در مـاتریس ZnO می‌باشد. اندازه نانوکریستال‌ها با استفاده از رابطه شرر بدست می‌آید [۳۸]. نتایج منحنی ۱B، حاکی از آن است که با افزایش ناخالصی Co اندازه نانوکریستال‌ها از ۶۲nm برای نمونه‌ی ZnO خالص بـه ۵۷ nm و ۴۰ nm بترتیـب بـرای نمونه‌ها با ناخالصی‌های ٪۵ و ٪۱۰ کاهش مـی‌یابـد. علـت کاهش اندازه ذرات با افزایش ناخالصی Co، ایـن اسـت کـه چـون شـعاع یـونی Co^{+2} ($0.58A^o$) از شـعاع یـونی Zn^{+2} ($0.6A^o$) کمتر اسـت، یـون اتـم‌هـای Co در مـاتریس Zn

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

جایگزین شده و باعث کاهش اندازه نانوذرات می‌شود [۲۷]. همچنین در جدول ۱، اطلاعات پارامترهای شبکه و فاصله بین صفحات و زوایای پراش اشعه ایکس صفحات بلوری برای نمونه خالص و نمونه با درصدهای مختلف ناخالصی کبالت آورده شده است. همانطوریکه از جدول ۱ مشخص است، برای نمونه‌های ناخالص، زوایای پراش اشعه ایکس به سمت زوایای کمتر میل کرده‌اند و طبق رابطه پراش فاصله بین صفحات افزایش یافته است. همچنین با افزایش ناخالصی Co، ثابت‌های شبکه و همچنین حجم سلول واحد افزایش یافته که نشانگر ورود ناخالصی کبالت به درون شبکه‌ای و یا بین صفحه‌ای اکسید روی می‌باشد.



شکل ۱- الگوهای XRD مربوط به ZnO (A) خالص و به همراه ناخالصی (B) تغییرات اندازه ذره با درصد ناخالصی Co

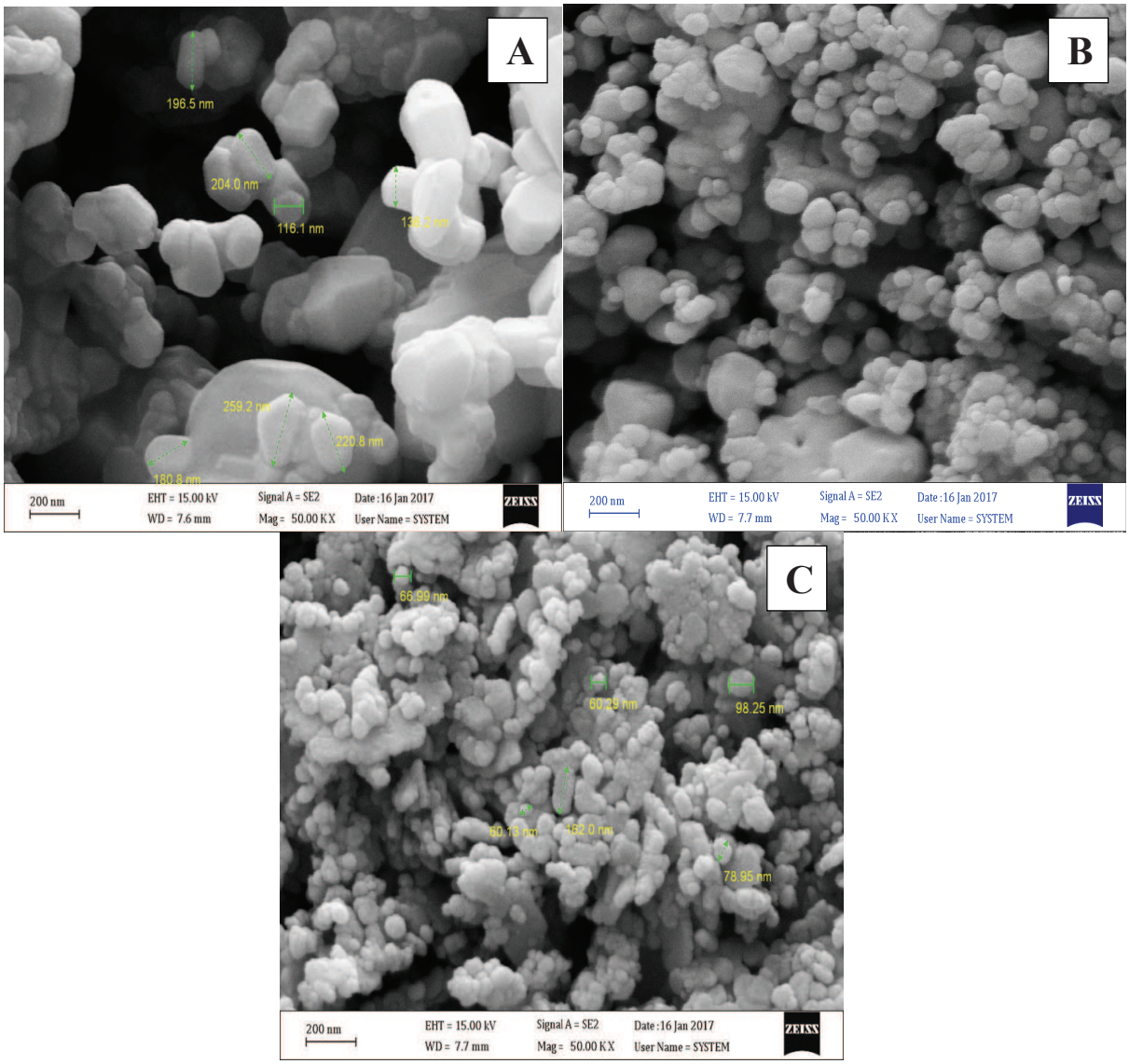
جدول ۱- زوایای پراش اشعه ایکس صفحات بلوری، فاصله بین صفحات و پارامترهای شبکه نمونه خالص و به همراه ناخالصی

درصد ناخالصی کبالت	2θ(101) (°)	d(101) (Å)	2θ(002) (°)	d(002) (Å)	2θ(100) (°)	d(100) (Å)	a=b(Å)	c(Å)	V(Å^3)
۰٪	۳۶/۳۸۴	۲/۴۶۷۲	۳۴/۵۵۹	۲/۵۹۳۲۸	۳۱/۹۰۱۱	۲/۸۰۳۰۵	۳/۲۳۷۲	۵/۱۸۷۲	۴۷/۰۷۴۹
۵٪	۳۶/۳۲۵	۲/۴۷۱۱۶	۳۴/۵۰۶	۲/۵۹۷۱۸	۳۱/۸۴۵	۲/۸۰۸۷۲	۳/۳۰۳۳۸	۵/۱۹۴۳۷	۴۹/۰۸۷۱
۱۰٪	۳۶/۳۶۲	۲/۴۶۸۷۰	۳۴/۵۴۱	۲/۵۹۴۵۲	۳۱/۸۸۰	۲/۸۰۴۸۲	۳/۲۹۹۸۴	۵/۱۸۹۳۰	۴۸/۹۳۴۲

شکل ۲، مورفولوژی سطح و تصاویر FESEM نانوذرات خالص ZnO و ناخالص Co-ZnO با ناخالصی‌های ۵٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل مشخص است با اضافه کردن کبالت، اندازه نانوذرات کاهش می‌یابد. در حقیقت با کاهش اندازه، نیروهای بین اتمی و مولکولی و نیروی جاذبه افزایش می‌یابند و بنابراین نانوذرات تمایل بیشتری برای نزدیک شدن به یکدیگر پیدا می‌کنند و این منجر به کلوخه‌ای شدن آنها می‌شود. اندازه میانگین محاسبه شده برای نانوذرات خالص ۶۲nm و برای نانوذرات ناخالص ۵٪ و ۱۰٪ بترتیب برابر با ۵۶nm و ۳۹nm اندازه‌گیری شد که در توافق با گزارشات XRD می‌باشد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

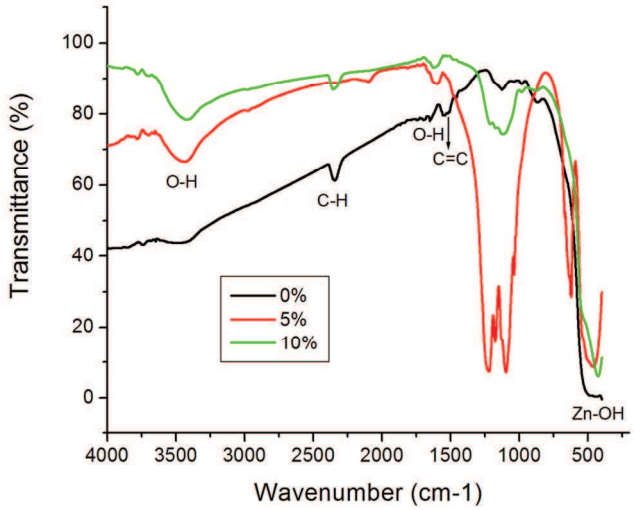


شکل ۲- تصاویر FESEM **نانوذرات** ZnO (A) **خالص،** (B) **ناخالصی کبالت ٪۵ و** (C) **ناخالصی کبالت ٪۱۰**

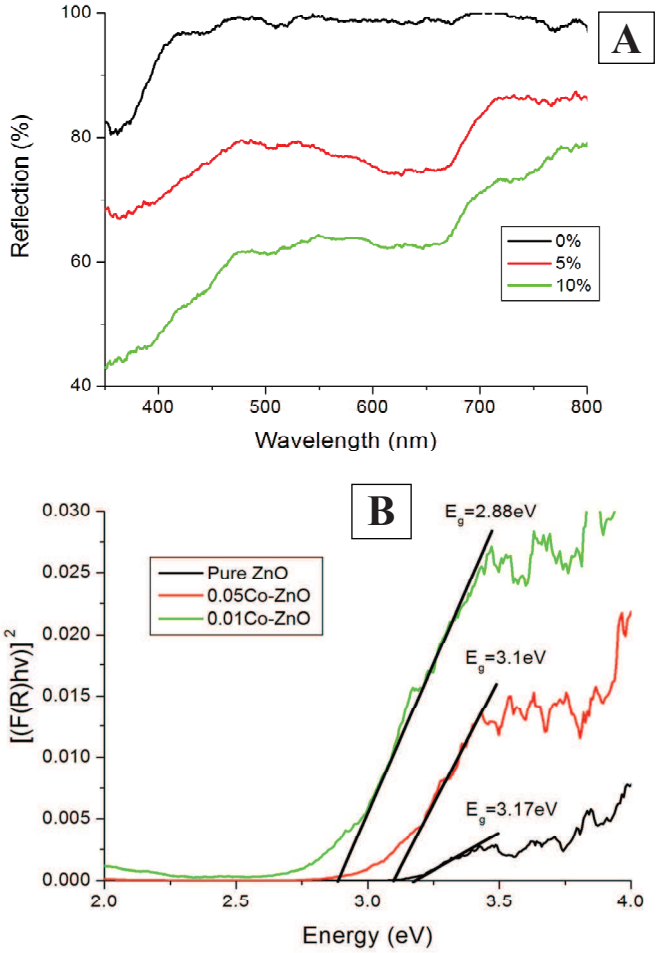
برای تعیین گروه‌های عاملی و پیوندهای ارتعاشی نمونه از آنالیز طیف عبوری مادون قرمز FTIR استفاده شد. شکل ۳، میزان عبور از نمونه ناخالص بر حسب عدد موج را نشان می‌دهد. مطابق شکل قله‌های ایجاد شده در عدد موج‌های $3434cm^{-1}$ و $3424cm^{-1}$ مربوط به پیوند ارتعاشی O-H گروه الکل می‌باشد. قله جذب بسیار شدیدی در محدوده عدد موج $434-537cm^{-1}$ مربوط به گروه Zn-OH می‌باشد، بطوری‌که برای نمونه‌های خالص، ٪۵ و ٪۱۰، این قله جذب بترتیب در عدد موج‌های ۴۳۴، ۴۶۳ و ۴۲۷ cm^{-1} ظاهر می‌شوند. همانگونه که از شکل مشخص است در محدوده $3424-3497cm^{-1}$، با افزایش ناخالصی Co مقدار جذب OH افزایش می‌یابد که حاکی از فعال شدن رادیکال‌های OH و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی می‌باشد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]



شکل ۳- طیف مادون قرمز (FTIR) نمونه‌های نانوذرات خالص و ناخالص

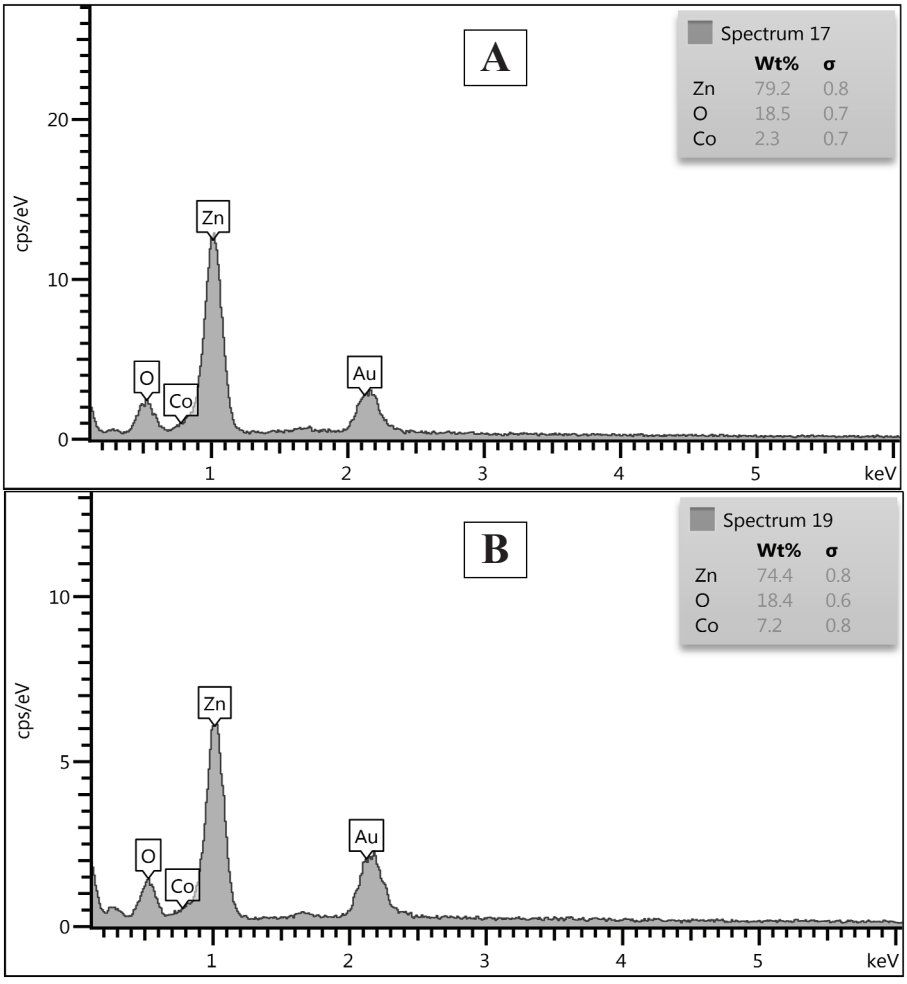


شکل ۴- (A) منحنی بازتاب نمونه با درصدهای مختلف ناخالصی Co (B) منحنی تائوک نمونه‌های ZnO خالص و ناخالصی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

شکل ۴A طیف انعکاسی UV-DRS برای نمونه‌های خالص و ناخالص را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است، با افزایش ناخالصی، طول موج جذب λ_{edge} به سمت طول موج‌های بیشتر میل می‌کند که حاکی از ایجاد انتقال قرمز (red-shift) و کاهش گاف نواری در نمونه می‌باشد. به منظور محاسبه گاف نواری نمونه‌ها، منحنی تائوک $(F(R)h\upsilon)^{1/2}$ برحسب انرژی فوتون $E(h\upsilon)$ رسم می‌شود که $F(R)$ تابع کوبلکا- مونک نامیده می‌شود و بصورت $[(1-R)^2/2R]$ تعریف می‌شود. بیشترین شیب خط مماس بر منحنی و محل تلاقی آن با محور انرژی، میزان گاف نواری در نمونه را بدست می‌دهد [۳۹و۴۰]. مطابق شکل 4B، نتایج نشان می‌دهند که با اضافه نمودن ناخالصی کبالت، گاف نواری انرژی کاهش می‌یابد، به طوری‌که برای نمونه‌ی خالص گاف نواری ۳/۱۷eV و برای نمونه‌ها با ناخالصی ۵٪ و ۱۰% مقدار گاف نواری بترتیب به ۳/۱ eV و ۲/۸۸ eV کاهش می‌یابد. عواملی نظیر نقص شبکه و تغییر در پارامترهای شبکه در اندازه گاف انرژی موثر است. همچنین محققان گزارش کرده‌اند که کاهش گاف نواری در نتیجه تبادل sp-d بین الکترون‌های نواری در ZnO و الکترون‌های d نوار ناخالصی Co^{2+} می‌باشد [۳۹].



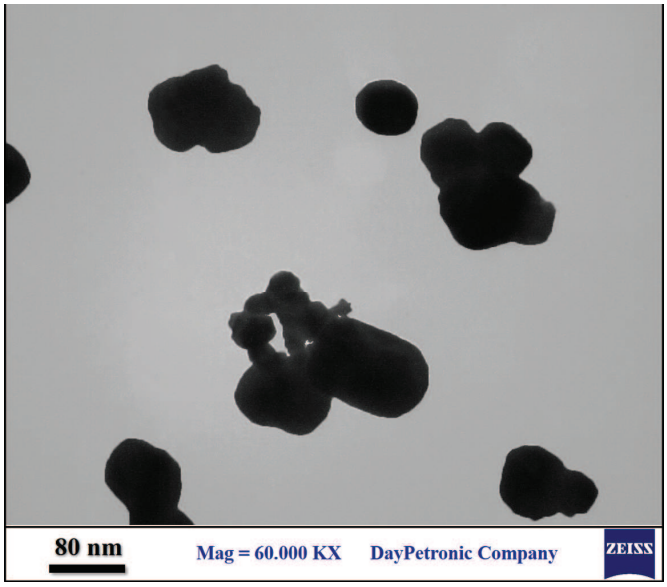
شکل ۵- آنالیز عنصری EDX نانوذرات ZnO با ناخالصی‌های (A) ٪۵ و (B) ٪۱۰

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

به منظور تعیین درصد عنصری نمونه، آنالیز EDX انجام شد. شکل ۵، آنالیز EDX نمونه‌های ناخالص ۳ و ٪۱۰ را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است، بجز اتم‌های Zn و Co و O عنصر دیگری وجود ندارد، که حاکی از خلوص نمونه می‌باشد. همچنین درصد وزنی کبالت برای نمونه‌های ٪۵ و ٪۱۰ بترتیب برابر با ۲/۳ wt% و ۷/۲wt% می‌باشد که بدلیل آنالیز سطحی، کمتر از مقدار درصد مولی است. همچنین درصد وزنی Zn برای نمونه‌های ٪۰، ٪۵ و ٪۱۰ بترتیب برابر با ۸۱wt%، ۷۹/۲ wt% و ۷۴/۴wt% می‌باشد که این کاهش، نشان دهنده ورود ناخالصی کبالت بصورت درون شبکه‌ای و جایگزینی آن با اتم‌های Zn می‌باشد.

برای تعیین اندازه دقیق و شکل ظاهری نانوذرات از آنالیز TEM استفاده شد. همانگونه که از شکل ۶ مشخص است نانوذرات با درصد ناخالصی کبالت ٪۵، بصورت کلوخه‌ای تشکیل شده‌اند که این ناشی از حذف پایدارسازها پس از گرمادهی در دمای ۶۰۰°C می‌باشد. درحقیقت با حذف پایدارسازها، نیروی جاذبه بین اتمی نانوذرات افزایش یافته و باعث کلوخه‌ای شدن آنها می‌شود. همچنین مغناطیسی بودن نمونه نزدیک شدن نانوذرات به یکدیگر را شدت می‌بخشد. اندازه میانگین آنها ۵۵nm اندازه‌گیری می‌شود که در تطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده با آنالیز XRD می‌باشد.



شکل ۶- تصویر TEM نانوذرات ZnO با ناخالصی ٪۵

۴- نتیجه‌گیری

نانوذرات اکسید روی ZnO خالص و آلیاژی Co-ZnO با ناخالصی های متفاوت با روش همرسوبی با پیش ماده‌های جدید با موفقیت ساخته شدند. نتایج ساختاری XRD نشان داد که ساختار نمونه بصورت هگزاگونال می‌باشد و با افزودن ناخالصی کبالت ساختار نمونه بدون تغییر ماند و نفوذ اتم‌های Co^{2+} درون ماتریس ZnO باعث شد تا اندازه آنها کاهش یابد. همچنین نتایج آنالیز TEM نشان داد که

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

نانوذرات با ناخالصی ٪۵ بصورت شبه کروی در اندازه ۵۵nm تشکیل می‌شوند. نتایج آنالیز FTIR نشان داد که قله جذب ایجاد شده در عدد موج $۳۴۳۴cm^{-1}$ مربوط به فعالسازی رادیکال‌های OH می‌باشد که با افزودن ناخالصی مقدار جذب آن افزایش می‌یابد. در نهایت، آنالیز اپتیکی UV-DRS، نشان داد که طول موج جذب با وجود ناخالصی کبالت افزایش می‌یابد که منجر به ایجاد انتقال قرمز و کاهش گاف نواری تا ۲/۸۸eV در نمونه با ناخالصی ٪۱۰ شد که نسبت به نمونه‌های مشابه دارای کاهش بیشتری در گاف نوار انرژی می‌باشد. بهبود خواص اپتیکی نمونه‌های ساخته شده با این روش، این امکان را فراهم می‌سازد تا از آنها در ساخت ادوات اپتیکی و قطعات نیمرسانا استفاده شود.

مراجع

[1] S. Jurablu, M. Farahmandjou, and T.P. Firoozabadi, "Multiple-layered structure of obelisk-shaped crystalline nano-ZnO prepared by sol–gel route," Journal of Theoretical and Applied Physics, vol. 9, pp. 261–266, 2015.

[2] M. Farahmandjou, and F. Soflaee, "Polymer-Mediated Synthesis of Iron Oxide (F_{e2O3}) Nanorods," Chinese Journal of Physics, vol. 53, pp. 080801-080809, 2015.

[3] M. Farahmandjou and F. Soflaee, "Synthesis and characterization of α-Fe_2O_3 nanoparticles by simple co-precipitation method," Physical Chemistry Research, vol. 3, pp. 193-198, 2015.

[4] M. Zarinkamar and M. Farahmandjou and T.P. Firoozabadi, "Diethylene Glycol-Mediated Synthesis of Nano-Sized Ceria (CeO_2) Catalyst," Journal of Nanostructures, vol. 6, pp. 114-118, 2016.

[5] M. Farahmandjou, "Magnetocrystalline properties of Iron-Platinum (L_{10}-FePt) nanoparticles through phase transition," Iranian Journal of Physics Research, vol. 16, pp. 1-5, 2016.

[6] M. Farahmandjou, and P. Khalili, "Morphology Study of anatase nano-TiO_2 for Self-cleaning Coating," International of Journal of Fundamental Physical Sciences, vol. 3, pp. 54-56, 2013.

[7] M. Farahmandjou, and M. Ramazani, "Fabrication and Characterization of Rutile TiO_2 Nanocrystals by Water Soluble Precursor," Physical Chemistry Research, vol. 3, pp. 293-298, 2015.

[8] S. Shadrokh, M. Farahmandjou, and T.P. Firozabadi, "Fabrication and Characterization of Nanoporous Co Oxide (Co_3O_4) Prepared by Simple Sol-gel Synthesis," Physical Chemistry Research, pp. 4, pp. 153-160, 2016.

[9] M. Farahmandjou, S. Honarbakhsha and S. Behrouziniab, "PVP-Assisted Synthesis of Cobalt Ferrite ($CoFe_2O_4$) Nanorods," Physical Chemistry Research, vol. 4, pp. 655-662, 2016.

[10] M. Dastpak, M. Farahmandjou, and T.P. Firoozabadi, "Synthesis and Preparation of Magnetic Fe-Doped CeO_2 Nanoparticles Prepared by Simple Sol-Gel Method," Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, vol. 29, pp. 2925-2929, 2016.

[11] M. Farahmandjou, "Synthesis of ITO Nanoparticles Prepared by Degradation of Sulfide Method," Chinese Physics Letter, vol. 29, pp. 077306-077309, 2012.

[12] M. Farahmandjou and N. Golabiyan, "Synthesis and characterization of Alumina (Al_2O_3) nanoparticles prepared by simple sol-gel method," International Journal of Bio-Inorganic Hybrid Nanomaterials, vol. 5, pp. 73-77, 2016.

[13] M. Farahmandjou, "Synthesis and Structural Study of L_{10}- FePt nanoparticles," Turkish. Journal of Engineering and Environmental Sciences, vol. 34, pp. 265-270, 2014.

[14] B. Khoshnevisan, M.B. Marami and M. Farahmandjou, "Fe^{3+}-Doped

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

Anatase TiO_2 Study Prepared by New Sol-Gel Precursors. Chinese Physics Letters, vol. 35, pp. 027501-027505, 2018.

[15] M.B. Marami, B. Khoshnevisan and M. Farahmandjou, "Solgel Synthesis of Fe-doped TiO_2 Nanocrystals," Journal of electronic Materials, vol. 47, pp. 3741-3749, 2018.

[16] Jafari, S. Khademi, M. Farahmandjou, "Nano-crystalline Ce-doped TiO_2 Powders: Sol-gel Synthesis and Optoelectronic Properties," Material Research Express, vol. 5, pp. 095008-095017, 2018.

[17] M. Farahmandjou, S. Honarbakhsh, and S. Behrouzinia, "FeCo Nanorods Preparation Using New Chemical Synthesis," Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, vol. 31, pp. 4147–4152, l2018.

[18] M. Farahmandjou, and P. Khalili, "Study of Nano SiO_2/TiO_2 Superhydrophobic Self-Cleaning Surface Produced by Sol-Gel," Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 7, pp. 462-465, 2013.

[19] M. Farahmandjou, and M. Dastpak, "Fe-Loaded CeO_2 Nanosized Prepared by Simple Co-Precipitation Route," Physical Chemistry Research, vol. 6, pp. 713-720, 2018.

[20] M. Farahamndjou, "The study of electro-optical properties of nanocomposite ITO thin films prepared by e-beam evaporation," Revista Mexica de Física, vol. 59, pp. 205-207, 2013.

[21] Khodadadi, M. Farahmandjou and M. Yaghoubi, "Investigation on synthesis and characterization of Fe-doped Al2O3 nanocrystals by new sol–gel precursors", Material Research Express, vol. 6, pp. 025029-025038, 2019.

[22] S. Jurablu, M. Farahmandjou, and T.P. Firoozabadi, "Multiple-layered structure of obelisk-shaped crystalline nano-ZnO prepared by sol–gel route," Journal of Theoretical and Applied Physics, vol. 9, pp. 261–266, 2015.

[23] S. Doke, K. Sonawane, A. Banerjee and S. Mahamuni, "Evidence of various stabilizing mechanisms in ferromagnetic Co doped ZnO nanocrystals," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 729, pp. 947-954, 2017.

[24] E. Abdeltwab, and F.A. Taher, "Polar and nonpolar self-assembled Codoped ZnO thin films: structural and magnetic study," Thin Solid Films, vol. 636, pp. 200-206, 2017.

[25] S. Jurablu, M. Farahmandjou and T.P. Firoozabadi, "Multiple-layered structure of obelisk-shaped crystalline nano-ZnO prepared by solgel route," Journal of Theoretical and Applied Physics, vol. 9, pp. 261-266, 2015.

[26] S. Jurablu, M. Farahmandjou and T.P. Firoozabadi, "Sol-Gel Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles: Study of Structural and Optical Properties," Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, vol. 26, pp. 281-285, 2015.

[27] Z.H. Wu, H.Q. Xie and Y.B. Zhai, "Preparation and thermoelectric properties of Co-doped ZnO synthesized by sol-gel," Journal of Nano Nanotechnology, vol. 15, pp. 3147-3150, 2015.

[28] D. Sharma, and R. Jha, "Structural and optical properties of Co-doped ZnO nano-ampoules synthesized by co-precipitation method," Material Letters, vol. 190, pp. 9-12, 2017.

[29] V. Strelchuk, O. Kolomys and S. Rarata, "Raman submicron spatial mapping of individual Mn-doped ZnO nanorods," Nanoscale Research Letters, vol. 12, pp. 351-356, 2017.

[30] J. Chauhan, N. Shrivastav, A. Dugaya, D. Pandey and J. Nanomed, "Synthesis and characterization of Ni and Cu doped

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]

ZnO," Nanotechnology, vol. 8, pp. 1000429-1000436, 2017.
[31] M.F. Khouzani, Z. Fereshteh, M.R. Loghman-Estarki, and R.S. Razavi, "Different morphologies of ZnO nanostructures via polymeric complex sol-gel method: synthesis and characterization," Journal of Sol-Gel Science and Technology, vol. 64, pp.193-199, 2012.
[32] S. A. Ansari, A. Nisar, B. Fatma, W. Khan, and A.H. Naqvi, "Investigation on structural, optical and dielectric properties of Co doped ZnO nanoparticles synthesized by gel-combustion route," Material Science Engineering B, vol. 177, pp. 428-435, 2012.
[33] M. Naeem, S.K. Hasanain, M. Kobayashi, Y. Ishida, A. Fujimori, S. Buzby and S.I. Shah, "Effect of reducing atmosphere on the magnetism of $Zn_{1-x}Co_xO$ ($0 \leq x \leq 0.10$) nanoparticles, Nanotechnology, vol. 17, pp. 2675–2680, 2016.
[34] N. M. Basith, J. Judith Vijaya, L. John Kennedy, M. Bououdina, S. Jenefar, and V. Kaviyarasan, "Co-Doped ZnO Nanoparticles: Structural, Morphological, Optical, Magnetic and Antibacterial Studies", Journal of Materials Science & Technology, vol. 30, pp. 1108-1117, 2014.
[35] F. Akhtari, S. Zorriasatein, M. Farahmandjou, and S.M, Elahi, "Structural, optical, thermoelectrical, and magnetic study of $Zn_{1-x}Co_xO$ ($0 \leq x \leq 0.10$) nanocrystals," International Journal of Applied Ceramic Technology, vol. 15, pp. 723-733, 2018.
[36] F. Akhtari, S. Zorriasatein, M. Farahmandjou, and S.M. Elahi, "Synthesis and optical properties of Co^{2+}-doped ZnO Network prepared by new precursors," Material Research Express, vol. 5, pp. 065015-065024, 2018.
[37] S. B. Rana, P. Slngh, A. K. Sharma, and H. A. W. Carbonari, Dogra AR, "Synthesis and characterization of pure and doped ZnO nanoparticles," Journal of Optoelectronic and Advanced Materials. vol. 12, pp. 257-261, 2010.
[38] P. Scherrer, "Bestimmung der Grosse und der Inneren Struktur von Kolloidteilchen Mittels Rontgenstrahlen, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften," Gottingen. Mathematisch-Physikalische Klasse, vol. 2, pp. 98-100, 1918.
[39] R. D. Shannon, "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomie distances in halides and chaleogenides," Acta Crystallogr A, vol. 32, pp. 751-767, 1976.
[40] M. Farahmandjou and N. Golabiyan, "Solution combustion preparation of nano-Al_2O_3: synthesis and characterization", Transp. Phenom. Nano. Micro. Scales, vol. 3, pp. 100-105, 2015.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.2.6.2]