مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۱ تا ۱۸

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir
مقاله پژوهشی

تخریب فتوکاتالیستی رنگ متیلن اورانژ توسط نانوذرات روی-سولفید سنتز شده به روش هیدروترمال

مهران ریاضیان[۱،*]، مریم یوسف پور[۲]
۱- گروه فنی و مهندسی، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران
۲- گروه شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

واژگان کلیدی: نانوذرات روی-سولفید، هیدروترمال، تخریب فتوکاتالیستی، گاف انرژی اپتیکی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
m.riazian@toniau.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: در پژوهش اخیر، ساخت، بررسی ویژگی اپتیکی و فتوکاتالیستی نانوذرات روی-سولفید ZnS در فاز بلوری زینک بلند به روش هیدروترمال گزارش شده است. روش اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از نانوفتوکاتالیست‌ها، یکی از روش‌های مناسب با کارایی بالا برای حذف این رنگ‌هایی با ترکیبات پیچیده آلی از پساب‌های نساجی و صنعتی است. عملکرد و فعالیت فتوکاتالیستی نانوذرات متاثر از ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی آنها است. یکی از مهمترین ویژگی‌های تاثیرگذار بر تخریب فتوکاتالیستی نانوذرات، پهنای باند گاف اپتیکی آنهاست که در جذب فوتون‌های تابشی در ناحیه مرئی و فرابنفش و تولید رادیکال‌های آزاد برای تخریب آلایندگی‌های پیچیده کربنی عامل مهمی به شمار می‌رود. پهنای گاف اپتیکی مانند سایر خواص نانوذرات متاثر از سه پارامتر هندسی مهم یعنی اندازه، بعد و شکل ذرات بوده و همچنین تابع شیمی سنتز یعنی نوع پیش ماده‌ها و روش ساخت آنها است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه نانوساختاری نانوذرات سنتز شده روی-سولفید، ویژگی‌های اپتیکی و اثر فتوکاتالیستی آن بر روی تخریب رنگ متیلن اورانژ است.

روش بررسی: آزمایش تخریب رنگ شامل ۷۰ mg از نانوذرات سنتز شده در ۱۰۰ mL محلول رنگی حاوی ۳/۷۵ ppm رنگ متیلن اورانژ در pH برابر با ۵/۵ است. تمام مراحل آزمایش سه مرتبه تکرار شدند. ویژگی‌های نانوساختاری و مشخصه یابی نانوذرات سه بعدی روی-سولفید توسط تکنیک‌های پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراکندگی انرژی پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی عبوری، تبدیل فوریه جذب مادون قرمز، طیف نگاری جذب فرابنفش و جذب-واجذب نیتروژن مورد مطالعه واقع شده است.

یافته‌ها: ویژگی‌های شبکه مانند چگالی، مساحت سطح ویژه، اندازه، کرنش، تنش و دانسیته انرژی تغییر شکل یافته شبکه بلوری با تحلیل مدل‌های مختلف ویلیامسون- هال ((Williamson-Hall(W-H) و هالدر- وگنر ((Halder-Wagner(H-W) مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ تخریب فتوکاتالیستی رنگ متیلن اورانژ 1/min (k) ۰/۰۵۲ محاسبه شده و این در حالی است که بعد از min ۶۰، ۹۵ درصد رنگ تخریب گردید. میانگین قطر حفرات، مساحت موثر سطح S_{BET} و حجم تخلخل کل با استفاده از تحلیل‌های جذب-واجذب نیتروژن، به‌ترتیب ۲۰/۶۹ mn، ۱۹/۱۲ m^2/g و ۰/۰۶۵ m^3/g معین شدند. گاف نواری اپتیکی نانوذرات با استفاده از روش تاوک، ۳/۴۷ eV اندازه‌گیری شد. در مقایسه با نانوذرات ZnS ساخته شده به روش هیدروترمال در فاز بلوری ورتزایت (نمونه ۲)، نمونه‌های سنتز شده (نمونه ۱)، دارای کرنش و تنش الاستیک کمتری بوده، اندازه نانوبلورک‌های کوچکتری داشته و فعالیت فتوکاتالیستی بالاتری نیز دارند.

نتیجه‌گیری: سنتز نانوذرات روی-سولفید بدون دوپه فلزی و یا سرامیکی با استفاده از روش هیدروترمال و پیش ماده‌های کلرید روی و تیواستامید در حضور اولییک اسید به شکل موفقی به سنتز نانوبلورک‌هایی در فاز بلوری مکعبی زینک بلند ختم شدند. فعالیت فتوکاتالیستی نانوذرات با تخریب یا دکلره کردن محلول رنگی متیلن اورانژ تحت تابش نور UV محرز گردید. با مقایسه با نتایج دیگر محققان، بدون اضافه کردن آلاینده فلزی و یا سرامیکی از گاف انرژی اپتیکی مناسبی برخوردار بوده و تخریب فتوکاتالیستی نانوذرات سنتز شده دارای سرعت تخریب و کارایی بالاتری هستند. در مقایسه با مطالعات مشابه، نتایج نشان دهنده کاهش گاف نواری اپتیکی از ۳/۸۴ eV به ۳/۴۷ eV بوده و این کاهش سبب افزایش سرعت تخریب فتوکاتالیستی از ۰/۰۳۱ به ۰/۰۵۲ می‌شود. در این پژوهش نشان داده شده با استفاده از نانوذرات روی-سولفید به روش هیدروترمال بدون استفاده از هیچ آلاینده‌ای، پهنای باند گاف اپتیکی کاهش و در پی آن فعالیت فتوکاتالیستی افزایش می‌یابد.

Please cite this article as: Riazian M, Yousefpoor M. Photo-degradation of Methylene Orange by zinc-sulfide nanoparticles synthesized via hydrothermal method. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(1):1-18.

Copyright © 2021 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

مقدمه

بـا پیشـرفت تکنولـوژی و گسـترش دانـش، اسـتفاده از ترکیبـات پیچیـده شـیمیایی و آلـی شـتاب گرفتـه و در کنـار ایـن توسـعه، معضـلات حذف پسـماندها و پسـاب‌های این ترکیبـات روز به روز در حـال افزایـش اسـت. مشـکل آلودگـی خـاک و آب و همچنین اشـاعه بیماری‌هـای نویـن شـامل بیماری‌هـای سیسـتم عصبـی و سـرطان‌های مرتبـط بـا ایـن ترکیب‌هـا، ارمغـان جدیـد توسـعه صنعتـی اسـت. صنایع نسـاجی، فـرش سـازی، کاغذ سـازی، چرم سـازی و رنگ‌سـازی بـا اسـتفاده از ترکیبـات رنگـی و آروماتیـک سـمی در طبیعـت بسـیار دیـر تجزیـه و با مانـدگاری بـالا فعالیت می‌کننـد. رنـگ آنیونی متیلن اورانژ جـزء رده رنگ‌هـای آزو (دارای پیونـد -N=N-) و متصـل بـه سیسـتم آروماتیک بـوده و به دلیل یکنواخـت شـوندگی خـوب، تثبیـت نـوری بـالا و قیمت مناسـب بسـیار پرکاربرد اسـت.

حـذف پسـاب‌های رنگـی به صـورت کلـی بـه دو روش فیزیکی یا شـیمیایی و بیولوژیکی تقسـیم می‌شـوند. در روش بیولوژیکی که براسـاس وجـود یـا عـدم وجود اکسـیژن بـه هـوازی و بی هـوازی تقسـیم می‌شـوند با بکارگیـری میکروارگانیسـم‌های بیولوژیک به تجزیـه و نابـودی آلاینده‌هـا می‌پردازنـد. روش‌هـای فیزیکی مانند ترسـیب (رسـوب گیـری و شـناور سـازی)، جـذب بـر روی کربـن فعـال شـده، فیلتراسیون-اسـمز معکـوس اسـت. روش شـیمیایی نسـبت به روش‌های قبلی دارای بازده بیشـتر اسـت که با اسـتفاده از مـواد شـیمیایی، تصفیـه پسـاب‌ها را ممکـن می‌سـازد و شـامل اکسیداسـیون-احیاء، تعویض یون و خنثی سـازی است. روش‌های اکسایشـی رنـگ زدایـی در بسـیاری از مـوارد از یک عامل اکسـید کننـده ماننـد H_2O_2 در شـرایط مختلفـی ماننـد تابـش UV و تزریـق ازون انجـام می‌شـود. همـه روش‌های اشـاره شـده در عمل دارای محدودیت‌هایـی اسـت. یکـی از روش‌هـای کارآمـد تجزیـه ایـن رنگ‌هـا در پسـماند صنایـع یـاد شـده، روش اکسیداسـیون پیشـرفته (Advanced Oxidation Processes) اسـت (۱-۴). ایـن روش بـر مبنـای تخریـب فتوکاتالیسـتی نانـوذرات فعـال تحـت تابـش نورمرئی یا فرابنفـش و تولید رادیکال‌هـای آزاد حمله کننـده بـه گروه‌های پیچیده کربنی اسـت (۹-۱). نانوسـاختارهای نیمـه رسـاناها و فلزات مـی توانند فعالیت فتوکاتالیسـتی نانوذرات را تغییـر و ارتقـاء دهند. ایـن عمل با فراهم نمودن جدایش سـریع الکترون‌هـا و حفره‌هـای تولید شـده توسـط پرتو نـور فرابنفش در دو سـوی مخالـف و بـه تاخیر انداختـن بازترکیب جفـت الکترون-حفـره میسـر می‌گـردد (۴، ۱۴-۱۰). پژوهش‌هـای متعـددی بـه مطالعـه و بررسـی اثـر آلایـش فلـزات در فعالیـت فتوکاتالیسـتی معطوف شـده‌اند که نشـان دهنده افزایش فعالیت فتوکاتالیستی و نـرخ تخریـب آلاینده‌های کربنی توسـط نانوذرات اسـت (۲۱-۱۵). ویژگی‌های فیزیکی و شـیمیایی نانوسـاختار روی-سـولفید شدیدا بـه شـیمی سـنتز، انـدازه و ریخـت ذرات، بعـد و روش سـاخت نانوذرات وابسـته اسـت. ابعاد مختلـف نانوذرات شـامل صفر بعدی کـه در آشکارسـازی و برچسـب زنـی بیولوژیکـی کاربـرد دارد و سـاختارهای یک بعدی (نانو سـیم، نانو ملیه و نانو لولـه)، دو بعدی (نانوصفحات) و سـه بعدی شـامل آرایه‌ای از ساختارهای یک بعدی که کاربردهای بسـیار متنوع و برجسـته از خـواص اپتوالکترونیکی دارنـد، نمایـش می‌دهنـد (۲۵-۲۲). روش‌هـای مختلفـی بـرای سـنتز نانوذرات روی-سولفید مانند نشسـت الکتروشیمیایی (۲۶)، میکروامولسـیون (۲۷)، حـلال گرمایـی (۲۸)، سـل-ژل (۲۹، ۳۰)، هـم رسـوبی (۳۱، ۳۲)، احتراقـی (۳۳)، پایرولیـز (۳۴)، فرسـاب لیزری (۳۵)، رونشسـت فیزیکی (۳۶) و هیدروترمال (۳۷) گزارش شـده اسـت. روش هیدروترمال روشـی دارای تنوع و قابلیت کنترل و تنظیـم ذرات، پرمحصـول، آلودگـی و ناخالصی کـم، تولید ذرات یـک دسـت و یکنواخـت، ارزان و بـدون نیـاز بـه عملیـات دیگری چون آسـیاب کاری و کلسـینه سـازی اسـت (۴۰-۳۸).

بـرای تولیـد نانوذرات از روش‌های مختلف سـنتز و همچنین پیش ماده‌هـای گوناگـون بهره برده می‌شـود. این امر به تولیـد نانوذراتی بـا آرایـش سـاختاری و فـاز بلـوری منحصر بـه فردی می‌شـود که در قالب خودآراییدگی سـاختاری در علم نانو شـناخته شـده است. در بسـیاری از پژوهش‌هـای انجـام پذیرفته به منظـور کاهش گاف انـرژی اپتیکـی، از عناصر و اکسـیدهای سـرامیکی و فلزی بصورت دوپـه (آلاینـده) بهره برده می‌شـود. یون‌های ایـن عناصر می‌توانند در ماتریـس خالـص نانـوذرات ZnS با ایجاد تلـه (میان گیر) عمل جهـش الکترون‌هـا را از نوار ظرفیت به نوار هدایت اپتیکی تسـهیل

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

نمـوده و در نتیجـه نانوذرات فتوکاتالیسـتی با جذب طـول موج‌های بلندتـر از ۳۸۵ nm و شـیفت از ناحیـه فرابنفـش بـه ناحیـه مرئی، امـکان تولیـد رادیکال‌هـای آزاد را محقـق سـازند (۴۱، ۴۲). تحقیق نویسـنده و پژوهش‌هـای انجـام شـده در سـنتز نانـوذرات نشـان دادنـد کـه فـاز بلـوری زینـک بلنـد نانـوذرات ZnS دارای فعالیـت فتوکاتالیسـتی بهتری نسـبت به فـاز ورتزایت اسـت. در مقایسـه با نتایـج دیگـر محققـان، بـدون اضافـه کـردن هیچ مـاده آلاینـده‌ای (دوپنت) نانوذرات سـنتز شـده دارای یکنواختی بیشـتری در اندازه، مقدار کمتر گاف انرژی اپتیکی و فعالیت فتوکاتالیسـتی بالاتر اسـت (۱، ۴۳، ۴۴). Riazian و همکار (نویسـندگان مقاله حاضر) به روش هیدروترمـال و پیـش ماده‌های دی هیدرات اسـتات روی، تیوسـمی کاربازید و اتیلن دیامین به سـنتز نانوذرات سـه بعدی روی-سـولفید در فـاز ورتزایـت شـش گوشـه‌ای و مطالعـه خـواص آن پرداخته‌انـد (۱)، کـه در ایـن مقالـه به منظور تحلیـل بهتر، نتایج به‌دسـت آمده بـا آن نمونـه (نمونـه ۲)، نیـز مقایسـه می‌گـردد. در ایـن تحقیق با روش سـنتز هیدروترمال و اسـتفاده از پیش ماده‌هـای روی کلرید و تیواسـتامید در حضور اولییک اسـید به عنـوان عامـل گردآورنده به تولید نانوذرات روی-سـولفید پرداخته و ویژگی‌های نانوسـاختاری و فتوکاتالیستی نانوذرات روی-سولفید به روش (AOP) برای تخریب یکـی از آلاینده‌هـای پرکاربرد و آروماتیک در صنعت نسـاجی به نام متیلـن اورانژ انجام شـده اسـت.

مواد و روش‌ها

پیش ماده‌های کلرید روی با خلوص بیش از ۹۹ درصد، تیواسـتامید بـا خلـوص بیـش از ۹۸ درصد، اتانـول با خلوص بیـش از ۹۸ درصد، آب دو بـار تقطیـر شـده، اولییک اسـید با خلـوص ۹۷ درصـد و آب دیونیـزه در مراحل سـنتز بـه‌کار برده شـدند. در ابتدا اولییک اسـید در اتانـول بـا نسـبت مولـی ۱:۲۰۶ بـر روی همزن مغناطیسـی حل شـده سـپس تیواسـتامید و کلریـد روی در آب دیونیـزه ۲ :۱: ۰/۵ حـل شـده و محلول حاصلـه مجددا به محلـول اولیه اضافـه گردید. محلـول نهایـی به مـدت ۱ h در همزن مغناطیسـی همزده شـده و سـپس ۱۰ min در حمـام اولتراسـونیک (مـدل Sono Swiss در ۴۵ kHz) در اتـاق دمـای یکنواخت شـدند. محلـول حاصله به یک اتـوکلاو بـا دیـواره فولاد زنـگ نزن به محفظـه درونـی به گنجایش ۸۰ mL کـه جداره‌هـای آن از جنـس تفلـون اسـت انتقـال داده می‌شـود تـا بتوانـد دمـا، فشـار و زدایش شـیمیایی را تحمـل کند. واکنش شـیمیایی به مـدت ۱۰ h در دمـای ۲۰۰ °C انجام پذیرفته و نهایتـا محفظـه واکنش به‌صورت سـریع به حمام یـخ انتقال یافت تا از شـکل گیری کمپلکـس ZnS0.5 جلوگیری شـود. از محتوای درون محفظه تفلونی ژل سفـید رنگی تـشکیل می‌شـود که با سـانتریفوژ در ۵۰۰ rpm، ذرات بسـیار کوچک آن جمع آوری شده و چندیـن مرتبـه بـا آب دیونیـزه و اتانـول بمنظور حـذف آلاینده‌ها و ناخالصی‌هـا شستشـو داده شـد. در انتها محـصول درون آون با دمـای ۶۰ °C به مـدت ۲۴ h خشک شد. الگوهای پراش پرتو ایکـس بـه مـدل (GBC-MMA 007) و پـراش نـگار Cu-Kα در طـول موج ۰/۱۵۴۱۸ nm با گام ۰/۰۲ درجـه و با سـرعت min/ درجـه ۱۰ انجـام پذیرفـت. میکروسـکوپ الکترونـی عبوری بـه مـدل (CM10Philips) بـرای مطالعـه سـاختار و مورفولـوژی نانوذرات استفاده شد. میکروسکوپ روبشی اثر مـیدانی به مـدل (S-4160 Hitachi) بـرای بررسـی موفولـوژی و انـدازه نانـوذرات اسـتفاده شـد. تخریب فتوکاتالیسـتی متیلن اورانژ توسـط نانوذرات روی-سولفید معیاری از فعالیت فتوکاتالیستی نانوذرات اسـت. برای این مـنظور محـلول استوک (مادر) شـامل ۷۰ mg از نانـوذرات سـنتز شـده در ۱۰۰ mL محـلول رنگی حـاوی ۳/۷۵ ppm رنـگ متیلـن اورانـژ در ۵/۵ pH تهیه و در محفظـه‌ای کاملا تاریک نگهـداری شـد. نتایج تجربی نشـان دادنـد که نورمرئی تاثیر بسـیار ناچیـزی روی تخریـب فتوکاتالیسـتی رنـگ نامبـرده دارد. در تمـام مراحـل آزمایـش دمـای محیـط فتوراکتـور در ۲۷±۱ °C با تهویه کوچکـی ثابت نگهداشـته شـد. به منظور انـدازه گیری غلظت رنگ هر ۱۰ min، ۱۰ mL از محلول اسـتوک برداشـته شده و در تاریکی بـه مدت ۵ min عملیات فراصوت شـده تا نانوذرات بطور یکنواخت پراکنـده شـوند و تعـادل جذب-واجـذب ممکـن گـردد. سـپس در بازه‌هـای زمانی ۱۰ min مـحـلول مورد نـظر تحت تابـش دو لامپ جـیوه‌ای تولید کننـده پرتو فرابنفش در ناحیـه UV-C به مشـخصات(۲۵۳/۷nm Philips) و شـدت تابش ۳۳/۶ $\mu W/cm^3$ قرار گرفتند و سپس به مدت ۲ min با دور ۵۰۰ rpm سانتریـفوژ شـدند بلافاصـله با فیـلتر مـیلی پـور ۰/۱ μm نانـوذرات معـلق از محـلول جدا شـده تا تاثیری را در میزان جذب محلول نشان ندهند.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

درنهایت جذب محلول فیلترشده در طول موج λ_{max} = ۴۶۵ nm توسط دستگاه اسپکتروفتومتر دیجیتال (VARIAN, uv-vis50Scan) اندازه گیری شد. اندازه گیری FT-IR به صورت تهیه قرص زمینه KBr با دستگاه (Perkin-Elmer 1600) انجام گردید. تمام داده‌های پراکندگی پرتو ایکس با استفاده از نرم افزارهای X'Pert HighScore Plus و Match Crystal Impact (3.8.1.143 64) مورد بررسی قرار گرفتند و همچنین نمودارها و تحلیل‌های محاسباتی با استفاده از نرم افزار Origin Lab 2020 انجام پذیرفته است (۴۵،۱).

یافته‌ها

_ مشخصه‌یابی نانوذرات روی-سولفید به روش هیدروترمال

طرح پراش پرتو ایکس نانوذرات روی-سولفید برای برآورد پهن شدگی، تعیین فاز بلوری، اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۱، شدت خوب فاز مکعبی زینک بلند است، درحالی‌که پیک‌های دیگر که نشان دهنده ناخالصی و فازهای نامرتبط هست، وجود ندارد. پرشدت‌ترین پیک‌ها به درستی با شماره کارت JCPDS (2100-77) (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) با ثابت‌های شبکه a = ۰/۵۳۷ nm مرتبط با فاز زینک بلند (گروه فضایی مکعبی F-43 m) مطابقت می‌نماید. مشخصات این پیک‌ها شامل 2θ، شاخص‌های میلر (hkl)، پهن شدگی در نصف بیشینه پیک پراش (Full Width at Half Maximum) و فاصله بین صفحات (d-space) که از رابطه براگ به‌دست می‌آید ($n\lambda=2d\sin\theta$) در جدول ۱ خلاصه شده است. ثابت‌های شبکه و حجم سلول واحد از رابطه هندسی شبکه برای سیستم مکعبی که در معادلات ۱ و ۲ تعریف شده، به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (۱)$$

$$V = a^3 \quad (۲)$$

پراش پرتو ایکس برای تخمین میزان دانسیته نابجایی شبکه هم بکار می‌رود (۴۶، ۴۷). دانسیته نابجایی (δ) شبکه از رابطه $\delta = 1/D^2$ به دست می‌آید که D اندازه بلورک‌ها بر حسب nm است. δ بیانگر میزان نقص بلوری درون ساختار بلور است و به‌صورت طول خطوط نابجایی در واحد حجم بلور تعریف می‌شود (۴۸). مقادیر زیاد نابجایی، بسیاری از خواص و ویژگی‌های مواد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که بلورهایی با دانسیته نابجایی زیاد، سخت‌تر هستند. نشان داده شده که کاهش اندازه بلورک‌ها سبب افزایش دانسیته نابجایی و همچنین کرنش شبکه می‌شود (۴۹). تخمین مساحت سطح ویژه (Specific Surface Area) نانوذرات روی-سولفید نیز با استفاده از تحلیل پراش پرتو ایکس مقدور است. SSA یک مشخصه بسیار مهم برای فتوکاتالیست‌ها و فعالیتشان محسوب می‌شود. این مشخصه، ویژگی‌های مهمی مانند جذب، ناهمگونی کاتالیزورها و واکنش در سطح‌شان را نمایان می‌سازد. دانسیته نانوذرات روی-سولفید از روی داده‌های پرتو ایکس مطابق معادله ۳ قابل محاسبه است (۵۰، ۵۱):

$$D_x = \frac{nM}{N_A a^3} \quad (۳)$$

که n تعداد اتم‌ها در سلول واحد، M جرم مولی نمونه، N_A عدد آووگادرو و V حجم سلول اولیه است. مقدار دانسیته نانوذرات سنتز شده از معادله ۳ در جدول ۳ نشان داده شده است. مساحت سطح ویژه و ضریب سطح به حجم S_A/V با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد (۵۴-۵۲). SSA و S_A/V از معادلات ۴ و ۵ به‌دست می‌آیند:

$$SSA = \frac{SA}{V \times D_x} \quad (۴)$$

$$SSA = \frac{6 \times 10^8}{D \times \rho} \quad (۵)$$

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

که D_X دانسیته نانوذرات روی-سولفید در فاز زینک بلند برابر $4/28\ g/cm^3$ بوده و V حجم نانو بلورک‌های کروی برابر $\frac{4}{3}\pi(\frac{D}{2})^3$ است که D اندازه نانوبلورک‌ها است (۵۴-۵۲). مقادیر محاسبه شده در جدول ۳ نمایش داده شده است. فاصله نزدیک‌ترین همسایه در ساختار زینک بلند برای نانوذرات روی-سولفید از معادله ۶ به‌دست می‌آید (۵۵) و در جدول ۲ گزارش شده است.

$$R^{ZB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a \qquad (۶)$$

که a ثابت شبکه مکعبی فاز بلوری زینک بلند است. اندازه بلورک‌ها از روی پرشدت‌ترین پیک پراش با استفاده از رابطه شرر-دبای به‌دست می‌آید (معادله ۷).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta Cos\theta} \qquad (۷)$$

که D اندازه بلور، k فاکتور شکلی مساوی ۰/۹، λ طول موج پرتو ایکس مساوی ۰/۱۵۴۱۸ nm، θ زاویه براگ مربوط به پیک ناشی از پراش بر حسب درجه و β بر حسب رادیان پهن شدگی در نصف بیشینه پیک پراش پرتو ایکس است. محاسبه فوق برای نانوذرات سنتز شده مقدار ۳۳/۱۱ nm محاسبه شده است. لازم به ذکر است که پهن شدگی پیک به‌دلیل پهن شدگی دستگاهی سبب افزایش محاسبه اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه می‌گردد (۵۶). به منظور حذف سهم پهن شدگی دستگاهی (β_s) از پهن شدگی اندازه گیری شده (β_m)، پهن شدگی یک نمونه استاندارد (سیلیکون) را در معادله ۸ قرار می‌دهیم.

$$\beta = \sqrt{\beta_m^2 - \beta_s^2} \qquad (۸)$$

برای تعیین اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه روش‌های مختلفی شامل روش (W-H) و روش (H-W) به‌کار برده می‌شوند. مطابق روش (W-H)، طبق معادله ۹ پهن شدگی پیک‌ها ناشی از سهم اندازه بلورک‌ها و سهم کرنش شبکه است. بنابراین پهنای کل پیک به صورت یک رابطه مستقل از عوامل یاد شده در نظر گرفته می‌شود و توسط معادله (W-H) بیان می‌گردد (۱، ۴۵):

$$\beta_{hkl} = \beta_{size} + \beta_{strain} \qquad (۹)$$

$$\beta_{hkl}\cos\theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\varepsilon\sin\theta \qquad (۱۰)$$

β_{hkl} پهن شدگی کل در نیم پهنای بیشینه پیک، λ طول موج پرتو ایکس و ε کرنش شبکه است. معادله فوق، روش تغییرات شکل یکنواخت (Uniform Deformation Method (UDM)) را معرفی می‌کند که مطابق آن کرنش شبکه و تغییر شکل در تمام جهت‌های بلور بصورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (معادله ۱۰). این مدل ماهیت بلوری و ویژگی‌های مواد را به صورت همسانگرد و مستقل از جهت‌های بلوری در نظر می‌گیرد. مطابق این مدل مقدار $\beta_{hkl}\cos\theta$ بر حسب $4\sin\theta$ برای پیک‌های مهم پراکندگی پرتو ایکس مطابق نمودار ۱-الف نمایش داده شده است. مقادیر اندازه نانو بلورک‌ها و کرنش کشسان شبکه به ترتیب از مقدار عرض از مبداء و شیب نمودار خطی برازش شده به‌دست می‌آید. در مدل کرنش تغییر شکل یافته غیریکنواخت (Uniform Deformation Strain model (USDM))، ماهیت بلوری و کرنش شبکه به صورت ناهمسانگرد در نظر گرفته می‌شوند (معادله ۱۴)، بعلاوه رابطه کرنش (σ) و تنش (ε) به صورت رابطه هوک معرفی می‌گردد (معادله ۱۱): که E_{hkl} مدول الاستیک (مدول یانگ) در جهت عمود بر

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{hkl}} \qquad (۱۱)$$

صفحه بلوری (hkl) است. E_{hkl} و انعطاف پذیری الاستیک (Elastic Compliance) S_{ij} برای فاز مکعبی زینک بلند به صورت معادلات ۱۲ و ۱۳ بیان می‌گردد (۵۷):

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

$$E_{hkl} = S_{11} - 2S_0 \frac{(hk)^2 + (hl)^2 + (lk)^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \quad (۱۲)$$

$$S_0 = S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2} \quad (۱۳)$$

که S_0، S_{11}، S_{12} و S_{44} ثابت‌های انعطاف پذیری الاستیک فاز زینک بلند روی-سولفید بوده و مقادیر آنها به‌ترتیب برابر: $۱/۴۸ \times ۱۰^{-۱۱}$، $۱/۸۵ \times ۱۰^{-۱۱}$، $۷/۱۲ \times ۱۰^{-۱۲}$ - و $۲/۱۶ \times ۱۰^{-۱۱}$ m^2N^{-1} است. در این مدل، کرنش شبکه به صورت مقدار تقریبی با جمله دوم معادله ۱۰، جایگزین می‌گردد:

$$\beta_{hkl} cos\theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\frac{\sigma sin\theta}{E_{hkl}} \quad (۱۴)$$

جدول ۱- مشخصات پر شدت‌ترین پیک‌های طیف پراش پرتو ایکس*

2θ (deg)	hkl	d (nm)	d_o (nm)	$\beta_{hkl} \times ۱۰^{-۱۱}$	E_{hkl} (GPa)
۲۹/۰٦٦	۱۱۱	۰/۳۰۷٤	۰/۳۱۰۲	٤/۳۳	۱۱٥/۷٤۷
٤۷/۳٤٦	۲۲۰	۰/۱۹۲۰	۰/۱۹۰٤	٥/۸۱	۹۰/۰۱٥
٥٦/۰٤۹	۳۱۱	۰/۱٦٤۰	۰/۱٦۲٥	۷/۸۱	۷۲/۱۲٥
٦۹/٦۹	٤۰۰	۰/۱۳٤۹	۰/۱۳٤۷	۷/٦۱	٥٤/۰۰۱
۷٦/۲۱	۳۳۱	۰/۱۲٤۸	۰/۱۲۳۸	۹/٥۲	۹٦/۲۳۸

***زاویه (2θ)، فاصله بین صفحات (d)، فاصله بین صفحات نمونه مرجع (d_o)، پهن شدگی در نصف بیشینه پیک پراش (β_{hkl})، مدول الاستیک یانگ (E_{hkl}) در جهت عمود بر صفحه بلوری (hkl)**

جدول ۲- مشخصات نانوذرات روی-سولفید در فاز بلوری مکعبی زینک بلند*

V_p (nm^3)	SSA (m^2/g)	SA (nm^2)	SA/V	D_X (g/cm^3)	R^{ZB} (nm)
٤۳۳۹٦/۸۳۸	۳۲/۱۰۷	٥۹۷۱/٦۲۸	۰/۱۳۷	٤/۲۸٦	۰/۲۳۰

***حجم نانوبلورک‌ها (V_p)، مساحت سطح (SSA)، سطح ویژه (SA)، ضریب سطح به حجم (SA/V)، دانسیته نانو ذرات (D_x) و فاصله نزدیک‌ترین همسایه (R^{ZB})**

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

جدول ۳- داده‌های ساختاری، اندازه نانوبلورک و محاسبه پارامترهای شبکه نانوذرات روی-سولفید در فاز بلوری مکعبی زینک بلند

UDM		USDM			UDEDM				SSP method			
D (nm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	D (nm)	$\varepsilon \times 10^{-4}$	σ (MPa)	D (nm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	σ (MPa)	u (KJ/M^3)	D (nm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	σ (MPa)	U (KJ/M^3)
٦١/٣٩٩	٢/٠٤٥	٣٣/٧٦٢	٩/٥١٠	٨١/٥٢١	٤٣/٦٣٥	١/٤٩٥	١٢٨/٠٣٨	٩٥/٧٣٠	٤٣/٦٠	١/٤٢	١٢٢/٠٣٢	٨٦/٩٦٠

تنش یکنواخت و اندازه بلورک‌ها به ترتیب از شیب و عرض از مبداء نمودار برازش شده خطی $4\sin\theta/E_{hkl}$ بر حسب $\beta_{hkl}\cos\theta$ به‌دست می‌آید (نمودار ۱-ب). میانگین مدول یانگ ($\bar{E}_{hkl}$) برای فاز آناتاز $123.003\ G_{pa}$ برآورد شده است. کرنش یکنواخت از معادله ۱۵ محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{E}_{hkl}} \qquad (۱۵)$$

مدل دانسیته انرژی تغییر شکل یافته یکنواخت (Uniform Deformation Energy Density (UDEDM)) برای تعیین دانسیته انرژی تغییر شکل یافته (u)، اندازه بلورک‌ها، کرنش و تنش شبکه به‌کار برده می‌شود (معادله ۱۷). در بسیاری از موارد، مدل‌های ذکر شده به دلیل در نظر گرفتن ماهیت همسانگرد ویژگی‌های شبکه، ناکامل هستند. با به احتساب در آوردن وابستگی میکرو-کرنش، رابطه همبستگی تنش-کرنش معین می‌گردد. مقدار u از قانون هوک به صورت معادله ۱۶ به‌دست می‌آید.

$$u = E_{hkl}\frac{\varepsilon^2}{2} \qquad (۱۶)$$

بنابراین معادله ۱۴ به‌صورت زیر اصلاح می‌گردد.

$$\beta_{hkl}\cos\theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\sin\theta\left(\frac{2u}{E_{hkl}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۷)$$

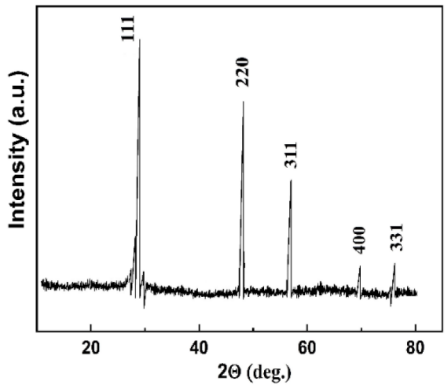
نمودار ۱-ج نمودار $\beta_{hkl}\cos\theta$ بر حسب $4\sin\theta(2u/E_{hkl})^{1/2}$ را نمایش می‌دهد. مقدار u و اندازه بلورک‌ها به ترتیب از شیب و عرض از مبداء نمودار برازش شده خطی به‌دست می‌آید. مقدار (σ) و تنش (ε) به ترتیب از معادلات ۱۵ و ۱۶، $\sigma=\sqrt{2}uE$ و $\varepsilon=\sigma/E$ به‌دست می‌آیند. روش (W-H) پهن شدگی خطی را اساسا همسانگرد تصور کرده و اثرات کرنش را به صورت جابجایی متقارن اتم‌ها از جایگاه‌های ایده آل‌شان در نظر می‌گیرد که این اثرات به نقایص نقطه‌ای، نابجایی‌ها و حفره‌ها در ساختار بلور ختم می‌شود (۵۸). این مدل حوزه‌های پراش را به دلیل سهم میکرو-کرنش به شکل همسانگرد در نظر می‌گیرد. ارزیابی دقیق‌تر از پارامترهای تنش-کرنش، در نظر گرفتن نمودار میانگین تنش-اندازه (Size-Strain Plots (SSP)) است. مطابق روش SSP و معادله ۱۸، به داده‌های پراش که از زوایای بزرگتری به‌دست می‌آیند، ضریب وزنی کمتر داده می‌شود و در عوض به داده‌هایی که از زوایای کوچکتر و یا میانه به‌دست می‌آیند، اهمیت بیشتری داده می‌شود. رابطه SSP به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

$$(\beta_{hkl}d_{hkl}\cos\theta)^2 = \frac{K}{D}(d^2{}_{hkl}\beta_{hkl}\cos\theta) + (\frac{\varepsilon}{2})^2 \qquad (۱۸)$$

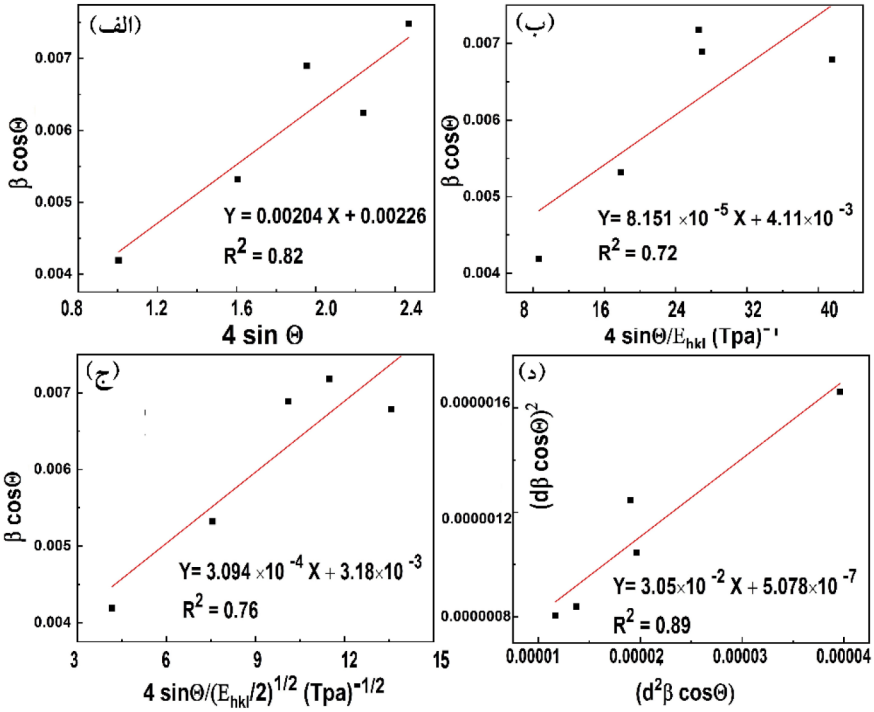
که k ثابت وابسته به شکل بوده و برای ذرات کروی شکل به صورت ۴/۳ در نظر گرفته می‌شود. نمودار ۱-د تغییرات $(\beta_{hkl}\ d_{hkl}\cos\theta)^2$ برحسب ($d^2_{hkl}\ \beta_{hkl}\ \cos\theta$) را برای پرشدت‌ترین پیک‌های فاز زینک بلند نمایش می‌دهد. اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه به ترتیب از شیب و عرض از مبداء رابطه خطی برازش شده داده‌ها به‌دست می‌آید. در بین مدل‌های اشاره شده، مدل SSP به دلیل پراکندگی کمتر داده‌ها که آن هم ناشی از اهمیت بیشتر

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

داده‌های مرتبط با زوایای پراکندگی کوچکتر است، در نظر گرفته می‌شوند (۵۹). در تمام مدل‌های به‌کار رفته، پروفایل تنش و کرنش دارای شیب مثبت هستند. این امر نشان دهنده انبساط در سطح بلور در حال شکل گیری بوده و شبکه بلوری را تحت تنش تورمی نشان می‌دهد. نمونه ۲ نیز دارای شیب مثبت، اندازه نانوبلورک‌های بزرگتر (۴۳/۳۲ nm) بوده ولی تنش، کرنش و دانسیته انرژی تغییر شکل یافته بیشتری را نسبت به نمونه ساخته شده دارد. دانسیته نابجایی (δ) برای مدل‌های UDEDM، USDM، UDM و SSP بر حسب ($line/m^2$) به ترتیب $۱۰^{۱۵} \times ۲/۶۵$، $۱۰^{۱۵} \times ۸/۷۷$، $۱۰^{۱۵} \times ۵/۲۵$ و $۱۰^{۱۵} \times ۵/۲۶$ محاسبه شده است.



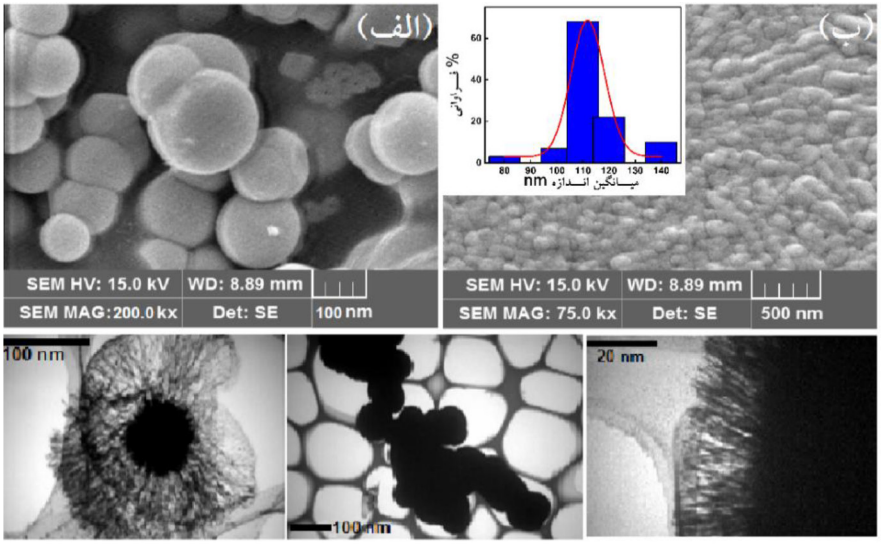
شکل ۱- طیف پراش پرتو ایکس فاز بلوری مکعبی روی-سولفید



نمودار ۱- نمودار مدل‌های مختلف (W-H) و (H-W) برای محاسبه اندازه نانوبلورک، تنش، کرنش و انرژی تغییر شکل یافته الف) UDM، ب) USDM، ج) UDEDM و د) SSP

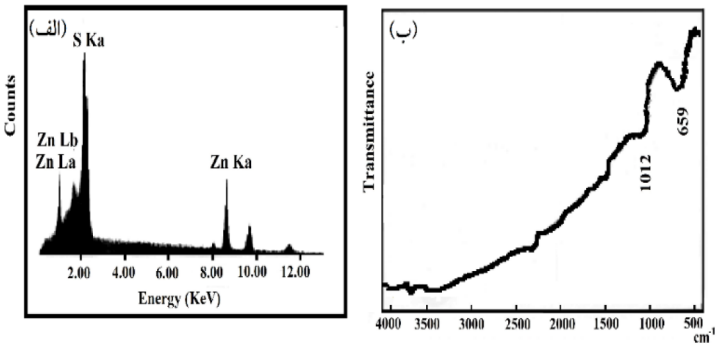
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

شکل ۲-الف و ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات سنتز شده را به شکل کره‌هایی سه بعدی نمایش می‌دهد. از هیستوگرام توزیع اندازه ذرات، قطر میانگین نانوذرات ۱۰۵ nm است. مطابق پایین شکل ۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری اندازه نانوذرات کلافی شکل را حدود ۱۱۰ nm نشان می‌دهد. همچنین این تصاویر ساختار سه بعدی کروی ذرات را تایید کرده و وجود نانو سیم‌هایی با توزیع شعاعی در سطوح و به مرکزیت ذرات کروی توپر را محرز می‌دارد. طول میانگین این نانوسیم‌ها حدود ۸۰ nm محاسبه شده است.



شکل ۲- (الف و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات روی-سولفید با بزرگنمایی متفاوت (همراه با تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانو کلاف‌های روی-سولفید با پوشش نانو سیم‌هایی با توزیع شعاعی یا بزرگنمایی متفاوت)، تصویر الحاقی ب) هیستوگرام توزیع اندازه نانوذرات ZnS

شکل ۳-الف طیف پراکندگی انرژی پرتو ایکس (Energy Dispersive X-ray) نانوذرات روی-سولفید را در حضور اتم‌های Zn و S بدون آلاییدگی، ناخالصی و یا اتم‌های ناخوانده دیگری نمایش می‌دهد. طیف تبدیل فوریه جذب مادون قرمز (FT-IR) نانوساختارکلافی شکل روی- سولفید در شکل ۳-ب آورده شده است. نوارهای ضعیفی که در ۶۵۷ و ۱۰۱۲ cm^{-1} واقع شده‌اند به ارتعاش پیوند Zn-S نسبت داده می‌شود (۶۰). عدم مشاهده پیک‌های دیگر در ناحیه ۴۰۰۰-۴۰۰ cm^{-1} دلیلی بر تشکیل نانوساختاری از ZnS، پیشرفت کامل واکنش و خروج اولییک اسید در اثر شستشوی فراوان با اتانول است.



شکل ۳- الف) طیف EDX از نانوذرات روی-سولفید و ب) طیف FT-IR از نانوذرات روی-سولفید

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

بحث

_ فعالیت فتوکاتالیستی

تولید جفت الکترون-حفره بعد از جذب فوتون‌های پر انرژی و همچنین تاخیر در بازترکیب آنها چالش اصلی ساخت و طراحی نانوفتوکاتالیست‌ها است. رادیکال‌های تولید شده سوپراکسید و هیدروکسیل به ترکیب‌های کمپلکس رنگی حمله کرده و آنها را به گروه‌های ساده و کوچکتر کربنی تجزیه می‌کنند و این امر سبب رنگ‌زدایی آنها می‌شود (شکل ۴). فعالیت فتوکاتالیستی نانوذرات روی-سولفید به وسیله تخریب رنگ متیلن اورانژ نشان داده می‌شود.

مدل سینتیکی (Langmuir- Hinshelwood) به‌طور گسترده در توصیف سینتیک تخریب فتوکاتالیستی بسیاری از ترکیبات آلی به کار می‌رود (۱۵، ۶۱). مطابق این مدل، نرخ واکنش عبارت است از (معادله ۱۹):

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{1+KC} \qquad (۱۹)$$

که r بر حسب mol/L.min، C غلظت تعادلی رنگ یا آلاینده بر حسب mg/L، t زمان بر حسب min، k ثابت نرخ بر حسب 1/min و K ثابت لانگمویر بر حسب L/mol است. این معادله به یک رابطه شبه درجه اول (Pseudo-first order) تقریب زده می‌شود (معادله ۲۰):

$$r = -\frac{dC}{dt} = kC \qquad (۲۰)$$

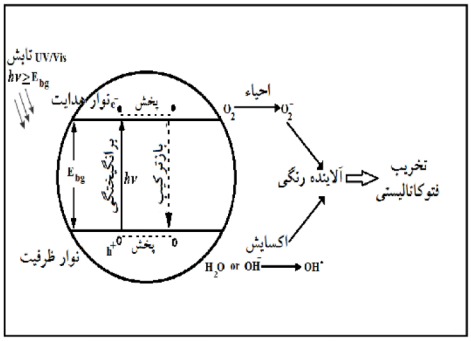
معادله ۲۰ را می‌توان به شکل معادله لگاریتمی ساده نمود (معادله ۲۱):

$$Ln\frac{C_0}{C} = kt \qquad (۲۱)$$

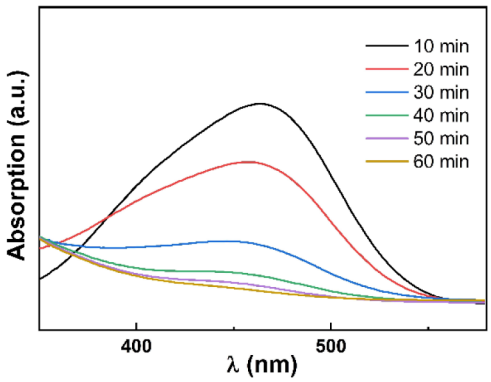
که C غلظت رنگ در زمان t بر حسب mg/L، C_o غلظت اولیه رنگ در زمان t = 0 بر حسب mg/L و k ثابت نرخ جمله شبه درجه اول بر حسب 1/min و t زمان تابش بر حسب min است. نمودار ۲ نمودار وابستگی زمانی جذب رنگ متیلن اورانژ را نمایش می‌دهد. شدت منحنی‌های جذب به تدریج با گذشت زمان به دلیل تخریب فتوکاتالیستی رنگ کاهش می‌یابد (۱۴). نمودار ۳-الف منحنی غلظت نسبی رنگ C/C_o را نمایش می‌دهد که C غلظت رنگ بعد از زمان تابش و C_o غلظت اولیه رنگ است. در تصویر الحاقی نمودار ۳-الف درصد حذف رنگ بر حسب زمان تابش نشان داده شده است. غلظت نسبی متیلن اورانژ در محلول آبی در مقیاس لگاریتمی $Ln(C_o/C)$ بر حسب زمان تابش پرتو فرابنفش به صورت خطی در نمودار ۳-ب نشان داده شده است (مطابق معادله ۲۱). ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۹۷ نرخ تخریب فتوکاتالیستی 1/min(k) ۰/۰۵۲ محاسبه شده و بعد از ۶۰ min، ۹۵ درصد رنگ تخریب شده است. در مقایسه با این نمونه سنتز شده، نمونه ۲ دارای فعالیت فتوکاتالیستی کمتر 1/min ۰/۰۳۱۵ است و بعد از سپری شدن مدت زمان تابش به اندازه ۶۰ min حذف رنگ به میزان ۸۰ درصد از غلظت اولیه گزارش شده است.

به منظور بررسی ویژگی جذب اپتیکی نانوذرات روی-سولفید، ابتدا نانوذرات توسط فراصوت در مدت ۵ min در ۴۵ kHz در آب دیونیزه به شکل یکنواخت پراکنده شدند. شانه پیک جذب برای اندازه گیری لبه جذب اپتیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نمودار ۴-الف طیف جذب UV-Vis نانوذرات را نمایش می‌دهد. مطابق شکل بیشینه جذب مرتبط با انرژی اکسایتون در طول موج λ_{max}= ۳۱۴ nm واقع شده که در مقایسه با نمونه کپه‌ای روی-سولفید که در λ_{max}= ۳۴۰ nm واقع شده، دستخوش انتقال-آبی (Blue-Shifted) به دلیل اثر اندازه کوانتومی شده است. محاسبات انجام شده، لبه جذب اپتیکی را ۳/۹۵ eV نشان می‌دهد.

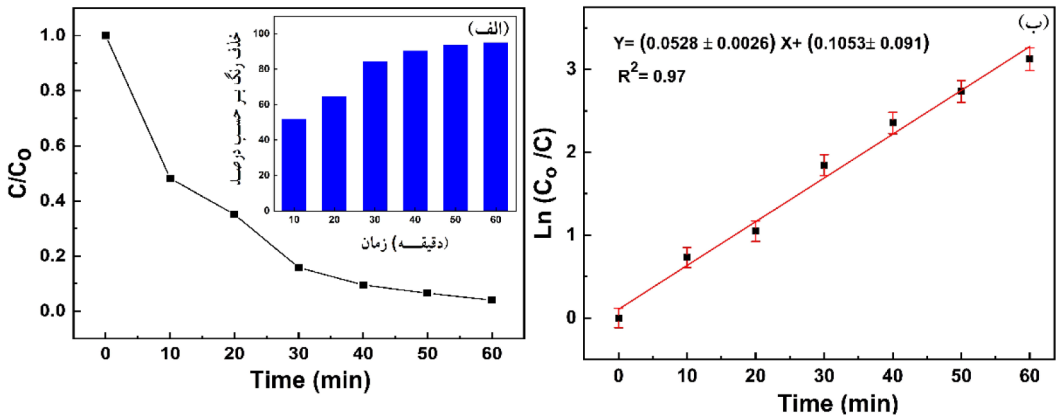
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]



شکل ۴- طرح واره واکنش‌های فتوکاتالیستی نانوذرات روی-اکسید



نمودار ۲- طیف جذبی UV-Vis رنگ متیلن اورانژ با حضور نانوذرات روی-سولفید



نمودار ۳- الف) غلظت نسبی متیلن اورانژ در حسب زمان تابش و تصویر الحاقی نشان دهنده درصد تخریب رنگ بر حسب زمان تابش، ب) غلظت نسبی متیلن اورانژ در مقیاس لگاریتمی بر حسب زمان تابش

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

برای بررسی گاف نوار اپتیکی، نخست ضریب جذب اپتیکی $\alpha(\lambda)$ از ضریب خاموشی (Extinction Coefficient) توسط معادله ۲۲ به‌دست آمد (۶۲).

$$\alpha(\lambda) = 4\pi k(\lambda) \quad (۲۲)$$

که λ طول موج فوتون تابشی است. گاف نواری مستقیم و غیرمستقیم E_g نانوذرات روی-سولفید از طریق برازش داده‌های انعکاسی با بکار بردن رابطه تاوک (Tauc) به‌دست می‌آید (۶۳).

$$\alpha h\nu = A(h\upsilon - E_g)^n \quad (۲۳)$$

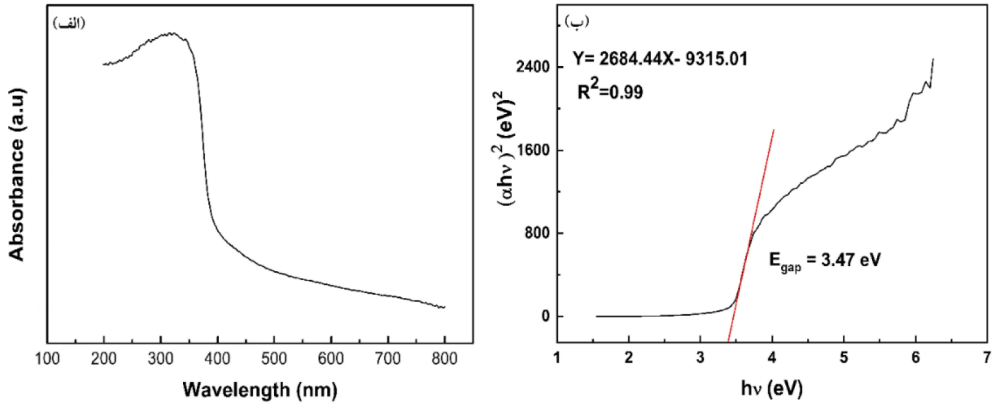
α ضریب جذب اپتیکی، $h\upsilon$ انرژی فوتون تابشی، A ثابت رابطه و E_g گاف نواری اپتیکی بسته به مقدار n (۰/۵ یا ۲) به ترتیب متعلق به گذار مجاز مستقیم و یا غیرمستقیم است (معادله ۲۳). برای نانوذرات روی-سولفید n برابر با ۰/۵ انتخاب شده است. مقدار گاف نواری با برون یابی بخش خطی نمودار جذب $(\alpha h\upsilon)^n$ بر حسب $h\upsilon$ انرژی فوتون تابشی مقدار ۳/۴۷ eV به‌دست آمد که از مقدار کپه‌ای (۳/۶ eV) کوچکتر است (نمودار ۴-ب). این کاهش به منظور افزایش محدوده جذب برای فعالیت فتوکاتالیستی امری مطلوب به شمار می‌رود زیرا با جذب طول موج‌های بیشتر و یا انرژی پایین‌تر عمل تخریب صورت می‌گیرد. نمونه ۲ تقریبا دارای گاف انرژی اپتیکی مشابه (۳/۸۴ eV) بوده است. با توجه به این برابری، افزایش فعالیت فتوکاتالیستی نمونه حاضر بیشتر متاثر از اندازه کوچکتر و افزایش سطح موثر تماس فوتواپتیکی است. ارائه یک مدل و ایزوترم جذب تهیه الگویی از غلظت نانوذرات، غلظت رنگ و pH محیط واکنش و تعیین این متغیرها در تخریب رنگ قابل بررسی است که متاسفانه به دلیل محدودیت‌های زمانی و تکنیکی انجام نپذیرفت.

_ جذب سطحی و اندازه گیری تخلخل

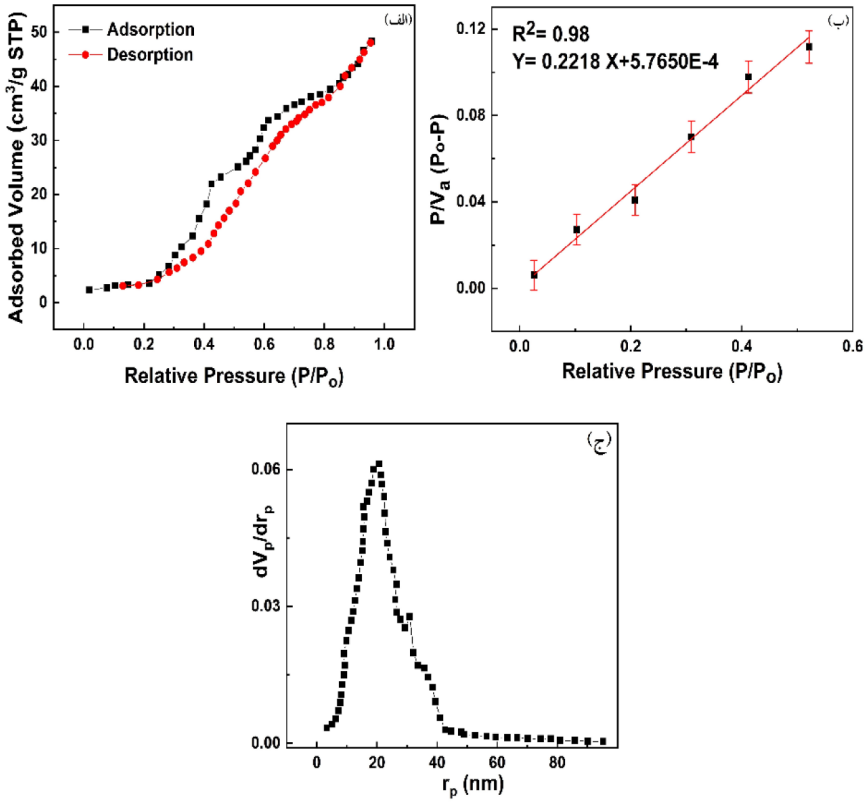
ایزوترم بت(Brunauer-Emmet-Teller(BET)) برای تعیین فیزیک سطح و تخلخل نانوذرات روی-سولفید با اندازه گیری جذب بر حسب فشار نسبی در تعادل استاتیک انجام پذیرفت. برای این منظور ایزوترم جذب-واجذب گاز نیتروژن در دمای ۷۷ کلوین اندازه گیری شد.

مطابق طبقه بندی IUPAC، نمودار ۵-الف ایزوترم جذب نیتروژن نانوذرات را از نوع VI و حلقه پسماند (واجذب) مشابه نوع H2 در محدوده $۰/۲۵ < P/P_o < ۰/۸۶$ است. این ایزوترم، تراکم مویینگی را در ناحیه مزو و میکروتخلخل پیش بینی کرده و در انسداد در حوالی $P/P_o \sim ۰/۲۵$ را ناشی از مزوتخلخل کوچک می‌داند. پارامترهای تخلخلی شامل میانگین توزیع اندازه حفرات (Burret-Joyner-Halenda (BJH))($r_{p.peak}$)، مساحت موثر سطح S_{BET} و حجم تخلخل کل به ترتیب ۲۰/۶۹ nm، ۱۹/۱۲ (m^2/g) و ۰/۰۶۵ (m^3/g) محاسبه شده است. بعلاوه r_m یعنی میانگین قطر تخلخل در توزیع اندازه تخلخل، ۳۴/۰۶۴ nm تخمین زده شده است. مطابق ایزوترم جذب-واجذب، حدود ۸۸ درصد تخلخل، به مزوتخلخل تعلق دارد (نمودار ۵-ب و ۵-ج). نمونه ۲ که در فاز بلوری ورتزایت سنتز شده بود دارای مساحت موثر سطح S_{BET} و حجم تخلخل کل به ترتیب ۲۰/۸۰ (m^2/g) و ۰/۰۷۲ (m^3/g) بوده است. مساحت موثر سطح نانوذرات روی- سولفید با استفاده از تکنیک پراش پرتو ایکس طبق معادله ۴، ۳۲/۱۰ m^2/g محاسبه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد با توجه به نزدیکی ویژگی‌های جذب، افزایش فعالیت فتوکاتالیستی نمونه ۱ بیشتر متاثر از ویژگی‌های نانوساختاری و چیدمان اتم‌ها در فاز بلوری زینک بلند و کاهش باند گاف اپتیکی است. در جدول ۴ نتایج این تحقیق به‌طور خلاصه نشان داده شده است.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]



نمودار ۴- الف) طیف جذب اپتیکی بر حسب طول موج، ب) نمودار $(ahv)^2$ بر حسب انرژی فوتون تابشی (hv) برای نانوذرات روی-سولفید



نمودار ۵- (الف) ایزوترم جذب-واجذب گاز نیتروژن، ب) نمودار BET، ج) نمودار BJH برای نانوذرات روی-سولفید

جدول ۴- خلاصه مشخصات ساختاری و ویژگی‌های فتوکاتالیستی نانوذرات روی-سولفید در فاز بلوری مکعبی زینک بلند

نرخ تخریب فتوکاتالیستی (1/min)	کارایی حذف رنگ متیلن اورانژ پس از ۶۰ min تابش (درصد)	میانگین اندازه نانوذرات (nm)	پهنای گاف اپتیکی (eV)	مساحت موثر سطح S_{BET} (m^2/g)
۰/۰۵۲	۹۵	۱۱۰	۳/۴۷	۱۹/۱۲

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

نتیجه‌گیری

نتایج تجربی نشان دادند که سنتز نانوذرات روی-سولفید با استفاده از روش هیدروترمال و پیش ماده‌های کلرید روی و تیواستامید در حضور اولییک اسید به شکل موفقی به سنتز نانوبلورک‌هایی در فاز بلوری مکعبی زینک بلند ختم شده است. نکته حائز اهمیت در این تحقیق عدم استفاده از دوپه‌های فلزی و سرامیکی که در بیشتر مواقع در بستر نانوذرات سنتزی برای کاهش گاف انرژی اپتیکی وارد می‌شوند، بوده است. با استفاده از تحلیل پراکندگی پرتو ایکس، دانسیته، مساحت سطح ویژه، ثابت‌های شبکه و فاصله نزدیک‌ترین همسایه‌ها در ساختار بلوری زینک بلند نانوذرات روی-سولفید سنتز شده محاسبه شدند با روش‌های مختلف (W-H) و (H-W) به تحلیل اندازه، تنش، کرنش و انرژی تغییر شکل یافته پرداخته شد. از بین روش‌های به‌کار رفته، روش SSP با پراکندگی داده‌های کمتر، اندازه بلورک‌ها را nm ۴۳/۶۰ تخمین زده است. نتایج نشان دهنده تنش تورمی یا انبساط بلوری در زمان رشد بوده است. تکنیک میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری به ترتیب میانگین سایز ذرات کروی شکل را nm ۱۰۵ و ۱۱۰ مشخص نموده و همچنین وجود نانو سیم‌هایی با توزیع شعاعی پیرامون ذرات کروی را نشان دادند. فعالیت فتوکاتالیستی نانوذرات با تخریب یا دکلره کردن محلول رنگی متیلن اورانژ با تابش نور UV بررسی شد و نرخ تخریب فتوکاتالیستی به میزان ۰/۰۵۲ 1/min(k) و میزان تخریب رنگ بعد از min ۶۰، ۹۵ درصد محاسبه گردید. در مقایسه با پژوهش‌های مشابه، این تحقیق بدون حضور دوپه‌های فلزی یا سرامیکی موفق به سنتز نانوذرات ZnS در فاز بلوری زینک بلند با گاف انرژی اپتیکی کمتر و در نتیجه فعالیت فتوکاتالیستی بیشتر شده است. گاف نواری اپتیکی نانوذرات با استفاده از تحلیل تاووک، eV ۳/۴۷ اندازه گیری شد. تخلخل و اندازه حفرات نانوذرات با استفاده از تحلیل BET و BJH بررسی شده و میانگین قطر حفرات، اندازه تخلخل کل، مساحت موثر سطح مشخص شدند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله تشکر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن به دلیل حمایت و در اختیار قرار دادن امکانات پژوهشی، اعلام می‌دارند.

References

1. Riazian M, Yousefpoor M. Photocatalytic activity, nanostructure and optical properties of 3D ZnS urchin-like via hydrothermal method. International Journal of Smart and Nano Materials. 2020;11(1):47-64.
2. Somasiri W, Li X-F, Ruan W-Q, Jian C. Evaluation of the efficacy of upflow anaerobic sludge blanket reactor in removal of colour and reduction of COD in real textile wastewater. Bioresource Technology. 2008;99(9):3692-99.
3. Alshammari AS, Bagabas A, Alarifi N, Altamimi R. Effect of the nature of metal nanoparticles on the photocatalytic degradation of rhodamine B. Topics in Catalysis. 2019;62(7-11):786-94.
4. Salimi M, Behbahani M, Sobhi HR, Gholami M, Jafari AJ, Kalantary RR, et al. A new nano-photocatalyst based on Pt and Bi co-doped TiO 2 for efficient visible-light photo degradation of amoxicillin. New Journal of Chemistry. 2019;43(3):1562-68.
5. Sobhanardakani S, Zandipak R. Removal of methyl orange dye from aqueous solutions using NiFe2O4 nanoparticles: Equilibrium and kinetic studies. Iranian Journal of Health and Environment 2016;9(2):247-58 (in Persian).
6. Masombaigi H, Rezaee A, Nasiri A. Photocatalytic

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

degradation of methylene blue using ZnO nanoparticles. Iranian Journal of Health and Environment. 2009;2(3):188-95 (in Persian).
7. Naddafi K, Nabizadeh Nodehi R. Removal of reactive blue 29 dye from water by single-wall carbon nanotubes. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;3(4):359-68 (in Persian).
8. Pasand L, Ayati B. Study of reactive blue 171 dye degradation in hybrid system of UV/H2O2 & SBAR. Iranian Journal of Health and Environment. 2013;6(3):393-406 (in Persian).
9. Hemmati Borji S, Nasseri S, Nabizadeh Nodehi R, Mahvi AH, Javadi AH. Photocatalytic degradation of phenol in aqueous solutions by Fe(III)-doped TiO2/UV process. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;3(4):369-80 (in Persian).
10. Riazian M. Electrical properties and enhancement of photocatalytic activity of TiO2 nanorods doped with SiO2. South African Journal of Chemistry. 2017;70:189-99.
11. Balgude SD, Sethi YA, Kale BB, Amalnerkar DP, Adhyapak PV. ZnO decorated Sn3O4 nanosheet nano-heterostructure: a stable photocatalyst for water splitting and dye degradation under natural sunlight. RSC Advances. 2019;9(18):10289-96.
12. Abbasi A, Ahmadi Golsefidi M, Mohammad Beigi M, Sadri N, Abroudi M. Facile fabrication of Co3O4 nanostructures as an effective photocatalyst for degradation and removal of organic contaminants. Journal of Nanostructures. 2018;8(1):89-96.
13. Gholipour MR, Dinh C-T, Béland F, Do T-O. Nanocomposite heterojunctions as sunlight-driven photocatalysts for hydrogen production from water splitting. Nanoscale. 2015;7(18):8187-208.
14. Poorarjmand S, Kargar Razi M, Mahjoob AR, Khosravi M. Photocatalytic degradation of Congo Red dye by using nano ZnO and Ni-Co-ZnO nanocomposites. Journal of Nanoanalysis. 2018;5(2):99-105.
15. Samadi S, Khalili E, Allahgholi Ghasri MR. Degradation of methyl red under visible light using N,F-TiO2/SiO2/rGO nanocomposite. Journal of Electronic Materials. 2019;48(12):7836-45.
16. Zein R, Alghoraibi I. Influence of bath temperature and deposition time on topographical and optical properties of nanoparticles ZnS thin films synthesized by a chemical bath deposition method. Journal of Nanomaterials. 2019;2019.
17. Yin L, Zhang D, Wang D, Kong X, Huang J, Wang F, et al. Size dependent photocatalytic activity of ZnS nanostructures prepared by a facile precipitation method. Materials Science and Engineering: B. 2016;208:15-21.
18. Dutková E, Daneu N, Lukáčová Bujňáková Z, Baláž M, Kováč J, Baláž P. Mechanochemical synthesis and characterization of CuInS2/ZnS nanocrystals. Molecules. 2019;24(6):1031.
19. Tambe YB, Kothari S. Oxidative photodegradation of evans blue dye using N-doped zinc oxide. International Journal of Science and Research. 2016;5(8):1847-51.
20. Wu X, Fang S, Zheng Y, Sun J, Lv K. Thiourea-modified TiO2 nanorods with enhanced photocatalytic activity. Molecules. 2016;21(2):181.
21. Chekuri RD, Tirukkovalluri SR. Synthesis of cobalt doped titania nano material assisted by gemini surfactant: Characterization and application in degradation of Acid Red under visible light irradiation. South African Journal of Chemical Engineering. 2017;24:183-95.
22. Tiwari JN, Tiwari RN, Kim KS. Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. Progress in Materials Science. 2012;57(4):724-803.
23. Wang X, Huang H, Liang B, Liu Z, Chen D, Shen G. ZnS nanostructures: synthesis, properties, and applications. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2013;38(1):57-90.
24. Li C, Shen G, Zhang R, Wu D, Zou C, Ling T, et al. Zn nanosheets coated with a ZnS subnanometer layer for effective and durable CO2 reduction. Journal of Materials Chemistry A. 2019;7(4):1418-23.
25. Shehzad K, Xu Y, Gao C, Duan X. Three-dimensional macro-structures of two-dimensional nanomaterials. Chemical Society Reviews. 2016;45(20):5541-88.
26. Altıokka B. Effects of inhibitor on ZnS thin films fabricated by electrodeposition. Journal of Electronic Materials. 2019;48(4):2398-403.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

27. Charinpanitkul T, Chanagul A, Dutta J, Rungsardthong U, Tanthapanichakoon W. Effects of cosurfactant on ZnS nanoparticle synthesis in microemulsion. Science and Technology of Advanced Materials. 2005;6(3-4):266-71.
28. Yu L, Ruan H, Zheng Y, Li D. A facile solvothermal method to produce ZnS quantum dots-decorated graphene nanosheets with superior photoactivity. Nanotechnology. 2013;24(37):375601.
29. Tounsi A, Talantikite-Touati D, Khalfi R, Merzouk H, Haddad H, editors. Optical and structural properties of ZnS: La thin films elaborated by sol-gel method. Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development; 2017; New York, Springer International Publishing.
30. Goktas A, Tumbul A, Aslan F. A new approach to growth of chemically depositable different ZnS nanostructures. Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2019;90(3):487-97.
31. Parthasarathy G, Saroja M, Venkatachalam M, Gowthaman P, Evanjelene V. Synthesis of nanoparticles from Aloe vera extract review paper. International Journal of Intercultural Relations. 2016;2:1570-5.
32. Shanmugam N, Cholan S, Kannadasan N, Sathishkumar K, Viruthagiri G. Effect of polyvinylpyrrolidone as capping agent on Ce3+ doped flowerlike ZnS nanostructure. Solid State Sciences. 2014;28:55-60.
33. Varma A, Mukasyan AS, Rogachev AS, Manukyan KV. Solution combustion synthesis of nanoscale materials. Chemical Reviews. 2016;116(23):14493-586.
34. Hrubaru M, Onwudiwe DC, Hosten E. Synthesis and properties of ZnS nanoparticles by solvothermal and pyrolysis routes using the Zn dithiocarbamate complex as novel single source precursor. Journal of Sulfur Chemistry. 2016;37(1):37-47.
35. Jadraque M, Evtushenko AB, Ávila-Brande D, López-Arias M, Loriot V, Shukhov YG, et al. Co-doped ZnS clusters and nanostructures produced by pulsed laser ablation. The Journal of Physical Chemistry C. 2013;117(10):5416-23.
36. Palve AM. Deposition of zinc sulfide thin films from zinc (ii) thiosemicarbazones as single molecular precursors using aerosol assisted chemical vapor deposition technique. Frontiers in Materials. 2019;6:46.
37. Sabaghi V, Davar F, Fereshteh Z. ZnS nanoparticles prepared via simple reflux and hydrothermal method: Optical and photocatalytic properties. Ceramics International. 2018;44(7):7545-56.
38. Zhang YC, Wang GY, Hu XY, Shi QF, Qiao T, Yang Y. Phase-controlled synthesis of ZnS nanocrystallites by mild solvothermal decomposition of an air-stable single-source molecular precursor. Journal of Crystal Growth. 284(3-4):554-60.
39. Zhang YC, Du ZN, Li KW, Zhang M. Size-controlled hydrothermal synthesis of SnS2 nanoparticles with high performance in visible light-driven photocatalytic degradation of aqueous methyl orange. Separation and Purification Technology. 2011;81(1):101-107.
40. Zhang YC, Tang JY, Hu XY. Controllable synthesis and magnetic properties of pure hematite and maghemite nanocrystals from a molecular precursor. Journal of Alloys and Compounds. 2008;462(1-2):24-28.
41. Abbasi M, Rafique U, Murtaza G, Ashraf MA. Synthesis, characterisation and photocatalytic performance of ZnS coupled Ag2S nanoparticles: A remediation model for environmental pollutants. Arabian Journal of Chemistry. 2018;11(6):827-37.
42. Li Q, Meng H, Zhou P, Zheng Y, Wang J, Yu J, et al. Zn1–xCdxS Solid Solutions with Controlled Bandgap and Enhanced Visible-Light Photocatalytic H2-Production Activity. ACS Catalysis. 2013;3(5):882-89.
43. Yin L, Zhang D, Ma J, Kong X, Huang J, Zhang H, et al. Facile synthesis and characterization of ZnS nano/microcrystallites with enhanced photocatalytic activity. Powder Technology. 2016;301:1085-91.
44. Dai L, Lesyuk R, Karpulevich A, Torche A, Bester G, Klinke C. From wurtzite nanoplatelets to zinc blende nanorods: Simultaneous control of shape and phase in ultrathin ZnS nanocrystals. The Journal of Physical Chemistry Letters. 2019;10(14):3828-35.
45. Zolfaghari A, Riazian M, Ashjari M. Preparation and photodeposition of Fe–S/TiO2@PEG nanoparticles for methylene blue and Evans blue. Research on

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

Chemical Intermediates. 2021;47(5):1809-28.
46. Subbaiah YV, Prathap P, Reddy KR. Structural, electrical and optical properties of ZnS films deposited by close-spaced evaporation. Applied Surface Science. 2006;253(5):2409-15.
47. Velumani S, Mathew X, Sebastian P, Narayandass SK, Mangalaraj D. Structural and optical properties of hot wall deposited CdSe thin films. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2003;76(3):347-58.
48. Aghazadeh M, Aghazadeh F. Green chemistry method with XRD analyzes and absorption of TiO2 nanoparticles modified with use of choline chloride. International Journal of Bio-Inorganic Hybrid Nanomaterials. 2018;7(2):97-108.
49. Theivasanthi T, Alagar M. Titanium dioxide (TiO2) nanoparticles XRD analyses: an insight. 2013:arXiv;1307.1091.
50. Mote V, Purushotham Y, Dole B. Structural, morphological and optical properties of Mn doped ZnS nanocrystals. Cerâmica. 2013:59;395-400.
51. Bandas C, Lazau C, Dabici A, Sfarloaga P, Vaszilcsin N, Tiponut V, et al. Structural and morphological characterization of nanosized TiO2 particles prepared by sol-gel method. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2011;13(2-4):399-404.
52. Zhang J, Xiao X, Nan J. Hydrothermal-hydrolysis synthesis and photocatalytic properties of nano-TiO2 with an adjustable crystalline structure. Journal of Hazardous Materials. 2010;176(1-3):617-22.
53. Ungár T. Microstructural parameters from X-ray diffraction peak broadening. Scripta Materialia. 2004;51(8):777-81.
54. Wu X-L, Ma E. Dislocations in nanocrystalline grains. Applied Physics Letters. 2006;88(23):231911.
55. Mattila T, Zunger A. Predicted bond length variation in wurtzite and zinc-blende InGaN and AlGaN alloys. Journal of Applied Physics. 1999;85(1):160-67.
56. Al-Tabbakh AA, Karatepe N, Al-Zubaidi AB, Benchaabane A, Mahmood NB. Crystallite size and lattice strain of lithiated spinel material for rechargeable battery by X-ray diffraction peak-broadening analysis. International Journal of Energy Research. 2019;43(5):1903-11.
57. Wei D, Jin-Fan S, Ping W, Cheng L, Zhi-Wen L, Xiao-Ming T. Phase transition and elastic properties of zinc sulfide under high pressure from first principles calculations. Zeitschrift für Naturforschung A. 2011;66(10-11):656-60.
58. Fell CR, Qian D, Carroll KJ, Chi M, Jones JL, Meng YS. Correlation between oxygen vacancy, microstrain, and cation distribution in lithium-excess layered oxides during the first electrochemical cycle. Chemistry of Materials. 2013;25(9):1621-29.
59. Rajesh Kumar B, Hymavathi B. X-ray peak profile analysis of solid-state sintered alumina doped zinc oxide ceramics by Williamson–Hall and size-strain plot methods. Journal of Asian Ceramic Societies. 2017;5(2):94-103.
60. Rojas-Hernandez A, Mendoza-Pena K, Troyo-Vega E, Perez-Hernandez C, Munguia-Rodriguez S, Mendıvılreynoso T, et al. ZnS nanoparticles synthesized through chemical aggregation using polyethyleneimine that works as both a stabilizer and a complexing agent. Chalcogenide Letters. 2017;14(1):25-30.
61. Yang G-J, Li C-J, Huang X-C, Li C-X, Wang Y-Y. Influence of silver doping on photocatalytic activity of liquid-flame-sprayed-nanostructured TiO2 coating. Journal of Thermal Spray Technology. 2007;16(5-6):881-85.
62. Motevalizadeh L, Heidary Z, Abrishami ME. Facile template-free hydrothermal synthesis and microstrain measurement of ZnO nanorods. Bulletin of Materials Science. 2014;37(3):397-405.
63. Mote V, Purushotham Y, Dole B. Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. Journal of Theoretical and Applied Physics. 2012;6(1):6.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

Orginal Article

Photo-degradation of Methylene Orange by zinc-sulfide nanoparticles synthesized via hydrothermal method

Mehran Riazian[1,*], Maryam Yousefpoor[2]

1- Department of Engineering, Faculty of Science, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon, Iran
2- Department of Chemistry, Faculty of Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 03 April 2020
Revised: 16 June 2021
Accepted: 20 June 2021
Published: 21 June 2021

Keywords: Zinc sulfide nanoparticles, Hydrothermal, Photodegradation, Optical band gap

***Corresponding Author:**
m.riazian@toniau.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: In the present research, the synthesis and characterization of ZnS nanoparticles in zinc blend crystallite phase via hydrothermal method were reported. Advanced oxidation processes using nanophotocatalysts are one of the most efficient methods for removing the dyes with complex organic compounds from textile and industrial wastewaters. The photocatalytic performance of nanoparticles is drastically affected by their structural and optical properties. One of the most important features affecting the photocatalytic degradation of nanoparticles is their optical bandgap width, which is an important factor in the radiant photons in the visible and UV region and the production of active radicals to destroy the complex carbon pollutants. The optical bandgap width, like other properties of nanoparticles is affected by three important geometric parameters, including particle size, dimension and shape. It is also a function of synthetic chemistry, i.e. the precursors and the fabrication methods. The aim of the present study was to investigate the nanostructure of zinc-sulfide synthesized nanoparticles, optical properties and photocatalytic effect on the degradation of Methylene Orange dye.

Materials and Methods: The experiment of degradation of dye consisted of 70 mg of synthesized nanoparticles in 100 mL of dye solution containing 3.75 ppm of Methylene Orange dye at pH = 5.5. The experimental steps were repeated three times. Nanostructure characterization of three-dimension ZnS nanoparticles was specified by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, energy dispersive x-ray spectroscopy, transmission electron microscopy, Furrier transform infrared, ultraviolet-visible spectroscopy and N_2 adsorption-desorption.

Results: The lattice characteristics such as density, specific surface area, size, strain, stress and deformation energy density are specified using Williamson-Hall (W-H) and Halder-Wagner (H-W) analysis. The photocatalytic degradation rate (k) of Methylene Orange was calculated to be 0.052 1/min, whilst after 60 minutes about 95% of the dye was photodegraded. The N_2 adsorption-desorption calculations determined the mean pore diameter, specific surface area (SBET) and total porosity volume as 20.69 nm, 19.12 m^2/g and 0.065 m^3/g, respectively. The bandgap of fabrication ZnS has been evaluated from the Tauc's equation to be 3.47 eV. Compared with ZnS nanoparticles made by the hydrothermal method in the wurtzite crystallite phase (sample 2), the synthesized sample (sample 1) shows less lattice strain and stress, less crystallite size and also revealed the higher photocatalytic activity.

Conclusion: The pure zinc-sulfide nanoparticles without metal or ceramic dopants in the cubic zinc-blend crystallite phase are synthesized using the hydrothermal method. The precursors used in the synthesis of zinc-sulfide nanoparticles include zinc chloride and thioacetamide in the presence of oleic acid as a collecting agent. High photocatalytic activity of ZnS nanoparticles was confirmed by the degradation or dechlorination of Methylene Orange solution under UV light irradiation. Compared to similar studies, the results show that reducing the optical bandgap from 3.84 eV to 3.47 eV increases the degradation rate from 0.031 to 0.052. In this study, it was shown that synthesized zinc-sulfide nanoparticles by hydrothermal method, was able to decrease optical gap bandwidth and subsequently increased photocatalytic activity.

Please cite this article as: Riazian M, Yousefpoor M. Photo-degradation of Methylene Orange by zinc-sulfide nanoparticles synthesized via hydrothermal method. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(1):1-18.

Copyright © 2021 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]