



Research Article

## Production of UV-Absorbing Zinc Oxide Nanoparticles by Green Synthesis Using Green Tea Extract

Zahra Zarei<sup>1</sup> and Kazem Tahmasebi<sup>2\*</sup> 

1- Department of Materials and Metallurgical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Ceramics Department, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

\* Corresponding author, Email: [tahmasebi@merc.ac.ir](mailto:tahmasebi@merc.ac.ir)

(Received: 18 January 2026; Revised: 3 May 2026; Accepted: 11 May 2026; Available online: 24 May 2026)

### ABSTRACT

**Introduction and Objectives:** Zinc oxide nanoparticles were synthesized as ultraviolet absorbers using green tea extract as a reducing and stabilizing agent.

**Materials and Methods:** Green tea extract, which was obtained by brewing 10 g of green tea in 100 ml of distilled water at a temperature of 60 to 80 °C, was added dropwise to a zinc acetate solution, and then a diluted oxalic acid solution was added dropwise to it. The mixture was stirred at 75 °C for 2 hours to precipitate at pH 7. The resulting powder was dried in an oven for 12 hours and heat-treated in an electrical furnace at 450 °C.

**Results:** X-ray diffraction and scanning electron microscope analyses showed that the synthesized nanoparticles have a porous structure with an average crystallite size of about 24 nm. Fourier Transform Infrared spectroscopy confirmed the presence of O–H, C–H, C=O and C–O surface active groups. Calcination of the resulting powder at 450°C resulted in an increase in the intensity of the Zn–O bond, improved crystallinity and enhanced ultraviolet absorption. Ultraviolet–visible spectroscopy of this sample revealed an absorption peak at 370 nm, and Energy Dispersive spectroscopy analysis confirmed the high purity of the final product.

**Conclusion:** This study declares that green tea extract can be used as a natural and biocompatible agent in the synthesis of zinc oxide nanoparticles with desirable morphological and optical properties. The produced nanoparticles absorb ultraviolet radiation efficiently.

**Keywords:** Nanoparticles, Zinc oxide, Green synthesis, Green tea extract, Natural sunscreen.

**How to Cite:** Zarei Z, Tahmasebi K. Production of UV-absorbing zinc oxide nanoparticles by green synthesis using green tea extract. J Adv Mater Eng. 2026;45(3):127–143. <https://doi.org/10.47176/jame.45.3.1182>

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



## تولید نانوذرات اکسید روی جاذب اشعه ماورای بنفش به روش سنتز سبز به کمک عصاره چای سبز

زهرا زارعی<sup>۱</sup> و کاظم طهماسبی<sup>۲\*</sup>

۱- بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [tahmasebi@merc.ac.ir](mailto:tahmasebi@merc.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۱، انتشار: ۱۴۰۵/۳/۳)

### چکیده

مقدمه و اهداف: در این پژوهش، نانوذرات اکسید روی جاذب اشعه ماورای بنفش با استفاده از عصاره چای سبز به عنوان عامل کاهنده و پایدارکننده سنتز شدند.

مواد و روش‌ها: عصاره چای سبز که با دم کردن ۱۰ گرم چای سبز داخل ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  تا  $80^{\circ}\text{C}$  به دست آمده بود، به صورت قطره‌ای به محلول استات روی اضافه گردید و سپس محلول رقیق شده آگزالیک اسید به صورت قطره‌ای به آن اضافه شده و روی همزن در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  به مدت دو ساعت قرار گرفت تا رسوب گذاری در pH هفت انجام شود. پودر حاصل داخل خشک کن به مدت ۱۲ ساعت خشک شد و داخل کوره در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  عملیات حرارتی شد.

یافته‌ها: آنالیزهای پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که نانوذرات سنتز شده دارای ساختار متخلخل با اندازه متوسط بلورک حدود ۲۴ نانومتر هستند. طیف‌سنجی مادون قرمز حضور گروه‌های فعال سطحی C-H، O-H، C=O و C-O را تأیید کرد. کلسینه کردن پودر حاصل در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، منجر به افزایش شدت باند Zn-O و بهبود میزان بلورینگی و ارتقاء جذب اشعه فرابنفش گردید. طیف‌سنجی محدوده طیف مرئی و ماورای بنفش این نمونه، پیک جذبی در طول موج  $370$  نانومتر را آشکار ساخت و آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس خلوص بالای محصول نهایی را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که عصاره چای سبز، می‌تواند به عنوان یک عامل طبیعی و زیست‌سازگار در سنتز نانوذرات اکسید روی با ویژگی‌های مطلوب مورفولوژی و قابلیت جذب اشعه ماورای بنفش استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات، اکسید روی، سنتز سبز، عصاره چای سبز، ضدآفتاب طبیعی.



## ۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، نانومواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. نسبت بالای سطح به حجم، واکنش پذیری ویژه و امکان کنترل مورفولوژی باعث می‌شود این مواد رفتار متفاوتی نسبت به نمونه‌های مشابه در مقیاس میکرو یا ماکرو از خود نشان دهند. نانوذرات شامل فلزات، اکسیدهای فلزی و کامپوزیت‌ها هستند و به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارند، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های پزشکی، دارویی، کشاورزی و همچنین صنایع آرایشی و بهداشتی پیدا کرده‌اند (۱-۴).

از میان اکسیدهای فلزی، نانوذرات اکسید روی (ZnO)، به دلیل خواص نوری و فیزیکی ویژه، به عنوان یکی از پرکاربردترین نانوذرات در محصولات آرایشی و بهداشتی شناخته می‌شوند. این نانوذرات توانایی جذب طیف وسیعی از اشعه‌های فرابنفش<sup>۱</sup> را دارند و در عین حال برای سلول‌های انسانی نسبتاً ایمن هستند. ویژگی‌های عملکردی اکسید روی به شدت به اندازه، توزیع و مورفولوژی ذرات وابسته است؛ ذرات کوچک و یکنواخت شفافیت بالاتری ایجاد می‌کنند و اثر محافظتی بهینه‌ای در ضدآفتاب‌ها ارائه می‌دهند. روش‌های سنتی تولید نانوذرات اکسید روی اغلب نیازمند دما و فشار بالا و استفاده از مواد شیمیایی سمی هستند که علاوه بر افزایش هزینه تولید، نگرانی‌هایی در زمینه اثرات زیست‌محیطی و سمیت بالقوه ایجاد می‌کنند. به همین دلیل، استفاده از روش‌های سبز و پایدار برای سنتز نانوذرات توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است؛ زیرا این روش‌ها علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، امکان کنترل اندازه، مورفولوژی و پایداری نانوذرات کلوئیدی را نیز فراهم می‌کنند (۵ و ۶). در این راستا، عصاره‌های گیاهی، به عنوان عوامل کاهنده و تثبیت‌کننده طبیعی نقش مهمی در سنتز نانوذرات ایفا می‌کنند. ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدان‌های موجود در گیاهان، می‌توانند رشد و شکل ذرات را کنترل کرده و خواص زیست‌فعالی<sup>۲</sup> آن‌ها را افزایش دهند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که سنتز سبز نه تنها از منظر زیست‌محیطی مفید باشد، بلکه منجر

به نانوذرات یکنواخت با عملکرد بهتر در جذب UV شود (۷-۱۰). یکی از رایج‌ترین گیاهان مورد استفاده در روش سنتز سبز، چای سبز<sup>۳</sup> است که سرشار از ترکیبات فنولی مانند اپیگالوکاتچین گالات<sup>۴</sup> است. این ترکیبات آنتی‌اکسیدان‌های قوی هستند و می‌توانند به عنوان عوامل کاهش دهنده  $Zn^{2+}$  عمل کنند، همچنین با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با یون‌های فلزی، از تجمع ذرات جلوگیری کرده و نانوذرات یکنواخت تولید می‌کنند (۲). در سنتز سبز نانوذرات اکسید روی با استفاده از عصاره چای سبز، ترکیبات فعال موجود در برگ چای نقش‌های دوگانه دارند: هم به عنوان عامل کاهنده و هم به عنوان عامل تثبیت‌کننده کلوئیدی عمل می‌کنند. مهم‌ترین ترکیب فعال EGCG است که دارای گروه‌های هیدروکسیل چندگانه و ساختار فنولی می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که EGCG الکترون و پروتون آزاد کند و به این ترتیب یون‌های  $Zn^{2+}$  در محلول به اکسید روی کاهش یابد (۱۱). فرآیند کاهش با EGCG معمولاً شامل مراحل زیر است: ابتدا EGCG به فرم رادیکالی نیمه‌هیدروژنه تبدیل می‌شود. سپس این گونه واسطه به دهیدرو EGCG تبدیل شده و یک سامانه پایدار اکسایش-کاهش ایجاد می‌کند که برای انجام واکنش احیایی کافی است. علاوه بر این، گروه‌های قطبی موجود در EGCG با یون‌های  $Zn^{2+}$  کمپلکس تشکیل داده و از تجمع ذرات جلوگیری می‌کنند. این کمپلکس‌سازی سبب می‌شود که نانوذرات اکسید روی با اندازه کوچک و توزیع یکنواخت شکل بگیرند. سایر ترکیبات موجود در چای سبز نیز نقش مکمل دارند؛ کاروتن، توکوفرول و سایر فلاونوئیدها علاوه بر اثر آنتی‌اکسیدانی، می‌توانند به تثبیت کلوئید کمک کنند و خواص ضدپیری و ضدسرطانی به نانوذرات بدهند. ترکیب این مواد با اکسید روی، علاوه بر بهبود عملکرد محافظتی در برابر فرابنفش، کاربردهای دارویی و محافظتی نیز فراهم می‌آورد (۱۲ و ۱۳). علاوه بر ترکیبات گیاهی، شرایط واکنش نیز در سنتز سبز اهمیت زیادی دارد. پارامترهایی مانند pH، دما، زمان واکنش و غلظت پیش‌ماده می‌توانند مورفولوژی و اندازه نانوذرات اکسید روی را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهند. به طور مثال، افزایش pH

برخلاف اکسید روی میکروسکوپی که می‌تواند ظاهر سفید و کدر روی پوست ایجاد کند، نانوذرات سبز اکسید روی تقریباً شفاف بوده و ظاهر زیبایی محصول آرایشی را حفظ می‌کند (۲۳ و ۲۴). علاوه بر خواص ضد UV، اکسید روی سنتز شده با چای سبز دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی است. ترکیبات فنولی باقی مانده در سطح نانوذرات می‌توانند رادیکال‌های آزاد را خنثی کرده و اثرات تخریبی UV بر پوست را کاهش دهند. این ویژگی مکمل باعث می‌شود که نانوذرات اکسید روی سنتز سبز، نه تنها به عنوان محافظ UV بلکه به عنوان عامل مراقبت از پوست نیز عمل کنند (۲۵-۲۷).

روش‌های متنوعی برای سنتز نانوذرات اکسید روی به کار گرفته شده است که رایج‌ترین آن‌ها روش هم‌رسوبی، خریدایش با آسیاکاری و روش سنتز سبز هستند. روش آسیاکاری در صورتی که به صورت آسیاب گلوله‌ای انجام شود، منجر به مورفولوژی کروی ذرات می‌شود و روش هم‌رسوبی بسته به دما و pH سنتز، منجر به نانوذرات با مورفولوژی میله‌ای یا صفحه‌ای شکل می‌شود (۱۶). در مقایسه با این روش‌ها، فرایند سنتز سبز دارای مزیت سازگاری زیست‌محیطی و کاهش سمیت است. روش‌های سنتزی شیمیایی معمولاً نیازمند دما و فشار بالا و استفاده از مواد شیمیایی سمی هستند که می‌تواند اثرات منفی روی محیط زیست و ایمنی انسانی داشته باشد. در مقابل، سنتز سبز با عصاره گیاهی، بدون نیاز به افزودنی‌های سمی و شرایط سخت، نانوذرات پایدار و بی‌خطر تولید می‌کند (۲۷ و ۲۸).

عوامل محیطی و پارامترهای واکنش، نقش بسیار مهمی در تعیین مورفولوژی، اندازه و پایداری کلئیدی نانوذرات اکسید روی ایفا می‌کنند. از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان به pH، دما، زمان واکنش، غلظت عصاره گیاهی و غلظت یون‌های  $Zn^{2+}$  اشاره کرد. افزایش pH معمولاً سرعت کاهش یون‌های فلزی را افزایش می‌دهد و باعث تشکیل ذرات کوچک‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود، در حالی که pH پایین منجر به ذرات بزرگ‌تر و پراکنده می‌گردد. دمای واکنش نیز بر سرعت کاهش و انرژی فعال‌سازی فرآیند تأثیر می‌گذارد؛ دمای پایین ممکن است کاهش ناقص  $Zn^{2+}$

معمولاً سرعت کاهش یون‌ها را افزایش داده و منجر به تشکیل ذرات کوچک‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود، در حالی که دمای بالاتر می‌تواند منجر به رشد سریع ذرات و تجمع آن‌ها شود (۱۶-۱۴). زمان واکنش نیز یکی از عوامل مهم است؛ واکنش کوتاه ممکن است منجر به تشکیل ذرات ناقص یا پراکنده شود، در حالی که زمان طولانی می‌تواند باعث افزایش اندازه ذرات و تغییر مورفولوژی به شکل‌های مختلف (نانوذرات کروی، میله‌ای و یا ستاره‌ای) شود. همچنین غلظت عصاره چای سبز و  $Zn^{2+}$  نیز تعیین‌کننده اندازه و پایداری کلئیدی نانوذرات است؛ غلظت بالاتر عصاره باعث تثبیت بهتر و کاهش تجمع ذرات می‌شود، در حالی که غلظت بالای یون‌های  $Zn^{2+}$  بدون کافی بودن عامل کاهنده، می‌تواند منجر به تشکیل ذرات بزرگ و غیریکنواخت شود (۱۷ و ۱۸). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با کنترل دقیق این پارامترها، می‌توان نانوذرات اکسید روی با اندازه ۲۰ تا ۵۰ نانومتر، مورفولوژی یکنواخت و پراکندگی مناسب در محلول کلئیدی تولید کرد که عملکرد محافظتی عالی در برابر اشعه UV دارد. این ویژگی‌ها اکسید روی سنتز شده با چای سبز را به یک گزینه بسیار مناسب برای استفاده در کرم‌ها و لوسیون‌های ضدآفتاب تبدیل می‌کند، زیرا شفافیت محصول حفظ شده و اثر محافظتی بهینه فراهم می‌شود (۱۹ و ۲۰).

یکی از ویژگی‌های برجسته نانوذرات اکسید روی، خواص نوری و توانایی جذب طیف گسترده اشعه UV است. اکسید روی دارای شکاف انرژی<sup>۵</sup> حدود ۳/۳۷ eV است که باعث می‌شود بتواند اشعه‌های UVA (طول موج ۳۲۰-۴۰۰ نانومتر) و UVB (طول موج ۲۸۰-۳۲۰ نانومتر) را جذب کند. این توانایی جذب UV باعث می‌شود که اکسید روی، به عنوان یک فیلتر فیزیکی طبیعی در ضدآفتاب‌ها عمل کند و از آسیب سلولی و پیری پوست ناشی از تابش فرابنفش جلوگیری نماید (۲۱ و ۲۲). نانوذرات اکسید روی سنتز شده با روش‌های سبز، به‌ویژه با عصاره چای سبز، علاوه بر جذب UV، دارای شفافیت بهتر در کرم‌ها و لوسیون‌ها هستند. این شفافیت ناشی از اندازه کوچک ذرات و توزیع یکنواخت آن‌ها در محلول کلئیدی است. به عبارت دیگر،

بدون تخریب ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدان‌ها انتخاب گردید (۳۴). پس از اتمام زمان استخراج، محلول به دمای محیط رسید و سپس با استفاده از کاغذ صافی واتمن (شماره ۴۱) فیلتر و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دور rpm ۳۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. این مرحله یکبار دیگر تکرار شد تا عصاره نهایی کاملاً شفاف و عاری از ذرات معلق باشد. در هر بار تکرار آزمایش‌ها، از عصاره گیاهی تازه استفاده گردید.

## ۲-۲- سنتز سبز نانوذرات اکسید روی

در این فرآیند، ابتدا ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره چای سبز، به صورت قطره‌ای و آهسته در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به محلول ۰/۳ مولار استات روی (شرکت مرک) که با افزودن مقدار ۶/۴ گرم از نمک استات روی به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و هم‌زدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط تهیه گردیده بود، افزوده شد. محلول حاصل به مدت ۱۵ دقیقه تحت هم‌زدن مغناطیسی افزوده گردید تا از بروز شوک حرارتی و اختلال در برهم‌کنش‌های یونی جلوگیری شود. در ادامه، ۲/۸۳ گرم اگزالیک اسید (شرکت مرک خلوص ۹۹/۸ درصد، کد CAS 144-62-7) در ۷۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل و محلول حاصل (محلول ۰/۳۲ مولار) به آرامی و به شکل قطره‌قطره به مخلوط قبلی اضافه شد. در طول این مرحله، pH محلول در حدود هفت ثابت باقی ماند. پس از افزودن اگزالیک اسید، تغییر رنگ محلول از قهوه‌ای کم‌رنگ به سفید شیری مشاهده شد که نشانه‌ای از آغاز فرآیند رسوب‌گذاری بود. مخلوط به مدت دو ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد تحت هم‌زدن مداوم با همزن مغناطیسی نگه داشته شد. سپس همزن خاموش گردید و محلول به مدت یک ساعت دیگر در همان دما و بدون هم‌زدن روی هیتر باقی ماند تا رسوب‌گذاری کامل شود. پس از خنک‌شدن، رسوب تشکیل شده با استفاده از کاغذ صافی واتمن (شماره ۴۱) جداسازی شد و برای حذف ناخالصی‌ها، سه بار با آب مقطر شسته گردید. در نهایت، رسوب شسته شده به مدت ۱۲ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و عملیات کلسینه‌کردن برای پایدارسازی ساختار نهایی، در دمای

و تشکیل ذرات نامنظم ایجاد کند، درحالی‌که دمای بالا می‌تواند منجر به رشد سریع ذرات و تجمع آن‌ها شود. زمان واکنش نیز تعیین‌کننده اندازه و مورفولوژی ذرات است؛ زمان کوتاه ممکن است باعث تشکیل ذرات ناقص شود و زمان طولانی می‌تواند اندازه ذرات را افزایش داده و شکل‌های مختلف ایجاد نماید. علاوه بر این، تعادل بین غلظت عصاره چای سبز و پیش‌ماده  $Zn^{2+}$  برای تولید ذرات یکنواخت و پایدار حیاتی است. غلظت بالای عصاره به تثبیت بهتر و جلوگیری از تجمع ذرات کمک می‌کند، درحالی‌که غلظت زیاد  $Zn^{2+}$  بدون کافی بودن عامل کاهنده باعث تشکیل ذرات بزرگ و غیریکنواخت می‌شود (۳۲-۲۹).

پژوهش حاضر، با هدف تولید نانوذرات اکسید روی با استفاده از عصاره برگ چای سبز و بررسی مورفولوژی، پایداری کلوئیدی و اثرات محافظت در برابر اشعه فرابنفش آن‌ها در مواد آرایشی و بهداشتی طراحی شده است. این مطالعه تلاش می‌کند با استفاده از روش‌های سبز و پایدار، نانوذرات یکنواخت و عملکرد بهینه محافظتی تولید کند. نانوذرات تولیدشده با این روش، به دلیل استفاده از ترکیبات گیاهی دارای خاصیت زیست‌فعال خواهند بود و فرایند کلسینه‌کردن انجام‌شده روی آن‌ها، خواص جذب پرتو را در این نانوذرات بهبود داده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تهیه عصاره چای سبز

در ابتدا، برگ‌های خشک چای سبز هندی با آب شهری و سپس با آب مقطر شسته شدند تا گردوغبار و ناخالصی‌های سطحی حذف گردند. برگ‌های شسته شده به مدت دو ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. سپس با آسیاب به پودر همگن تبدیل گردید. پودر یکنواخت باعث افزایش سطح تماس و استخراج بهتر ترکیبات فنولی می‌شود. برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال، ۱۰ گرم از پودر چای سبز در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد. مخلوط حاصل به مدت دو ساعت در دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت هم‌زدن مداوم توسط همزن مغناطیسی نگه داشته شد. این محدوده دمایی با هدف افزایش بازده استخراج

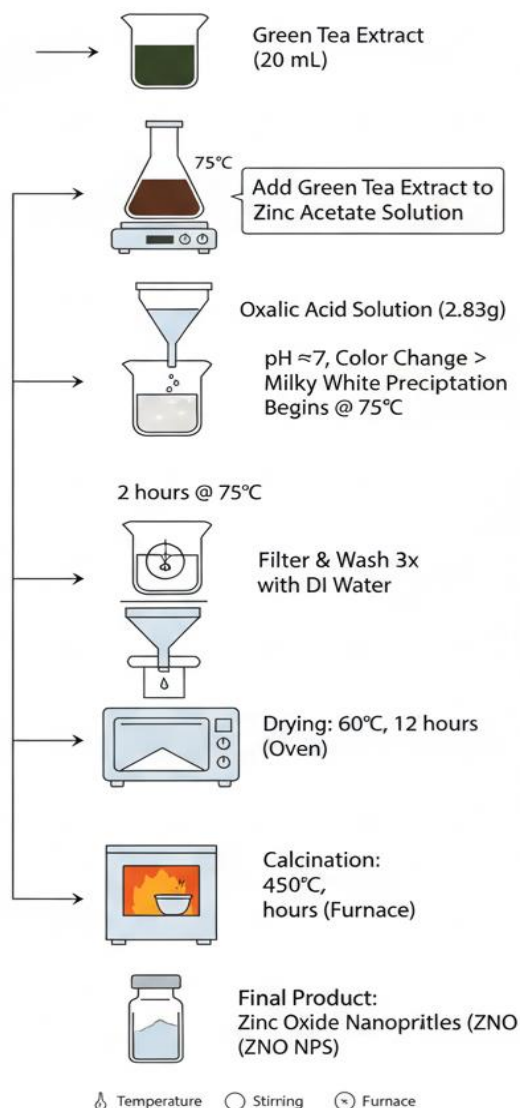
الکترونی روبشی<sup>۹</sup> و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۱۰</sup> مورد مطالعه قرار گرفتند.

برای بررسی گروه‌های عاملی موجود در پوشش زیستی نانوذرات اکسید روی سنتز شده با عصاره چای سبز، از FTIR استفاده شد. دستگاه مورد استفاده مدل Tensor 27 ساخت شرکت Bruker آلمان بود. نمونه‌ها به روش قرص KBr آماده‌سازی شدند؛ به طوری که مقدار مشخصی از نانوذرات خشک شده با پودر برمید پتاسیم (KBr) مخلوط و تحت فشار بالا به صورت قرص نازک و شفاف تهیه گردید. طیف جذب در محدوده  $4000\text{ cm}^{-1}$  تا  $400\text{ cm}^{-1}$  ثبت شد.

جهت تعیین ساختار بلوری نانوذرات اکسید روی، از دستگاه XRD مدل X'Pert Pro MPD استفاده شد. داده‌های مربوطه توسط دستگاه، تحت جریان ۳۰ میلی‌آمپر (mA) و ولتاژ ۴۰ کیلوولت (kV)، با استفاده از اشعه CuK $\alpha$  به طول موج ۱/۵۴ آنگستروم (Å) جمع‌آوری گردید. اسکن در محدوده زاویه روبشی ۳۰ تا ۸۰ درجه ( $2\theta^\circ$ ) با اندازه گام ۰/۰۲ درجه ( $2\theta^\circ$ ) و گام زمانی یک ثانیه برای هر گام انجام شد. به دلیل حجم کم نمونه پودری نانوذرات، از یک نگه‌دارنده با پس‌زمینه صفر<sup>۱۱</sup> استفاده گردید.

آنالیز ترکیب عنصری نانوذرات اکسید روی با استفاده از SEM و EDS انجام گرفت. در تمام آزمون‌ها از ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت، زاویه برداشت ۳۵ درجه و زمان اندازه‌گیری ۳۰ ثانیه استفاده گردید. آشکارساز مورد استفاده از نوع بلور سیلیکون (Si) با حساسیت بالا در شناسایی عناصر سطحی بود.

جهت بررسی طیف جذبی نمونه‌های سنتز شده از دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی-فرا بنفش (مدل Analytik Jena ۲۱۰ specord ساخت کشور آلمان) استفاده شد. به منظور آماده‌سازی نمونه، مقدار چهار میکرولیتر از محلول نهایی در یک کووت ریخته و در جایگاه مخصوص دستگاه قرار گرفت. سپس، میزان جذب نور تابیده شده به نمونه، در محدوده طول موج ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر، پس از پردازش کامپیوتری اندازه‌گیری شد. مورفولوژی و اندازه نانوذرات، با استفاده از میکروسکوپ



شکل ۱- نمایش مراحل فرآیند سنتز نانوذرات اکسید روی با استفاده از عصاره چای سبز.

۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت در کوره انجام گرفت. طرحواره مراحل ساخت نانوذرات در شکل (۱) آمده است.

### ۲-۳- مشخصه‌یابی نانوذرات

نمونه‌ها با کدهای ZnO-1 (پیش از کلسینه کردن) و ZnO-2 (پس از کلسینه کردن) تعریف شدند. هر دو نمونه با آزمون‌های طیف‌سنجی محدوده نور مرئی و ماورای بنفش<sup>۶</sup>، پراش پرتو ایکس<sup>۷</sup>، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز<sup>۸</sup>، میکروسکوپ

رشد بی‌رویه و کلوخه‌ای شدن آن‌ها شده است (۳۵). همچنین، جابجایی جزئی پیک‌ها به سمت زوایای کمتر ( $\theta$  پایین‌تر)، نشان‌دهنده وجود کرنش ساختاری در شبکه بلوری است که ناشی از حبس مولکول‌های درشت آلی در ساختار می‌باشد (۳۶). در نتیجه، الگوی XRD نمونه خام، تشکیل یک نانوکامپوزیت پیچیده از اکسید روی و مواد آلی بلوری را نشان می‌دهد. حضور غالب ناخالصی‌های آلی و کرنش ساختاری بالا، لزوم انجام عملیات کلسینه‌کردن جهت حذف مواد پوشاننده و دستیابی به ساختار نهایی خالص را نشان می‌دهد (۳۷).

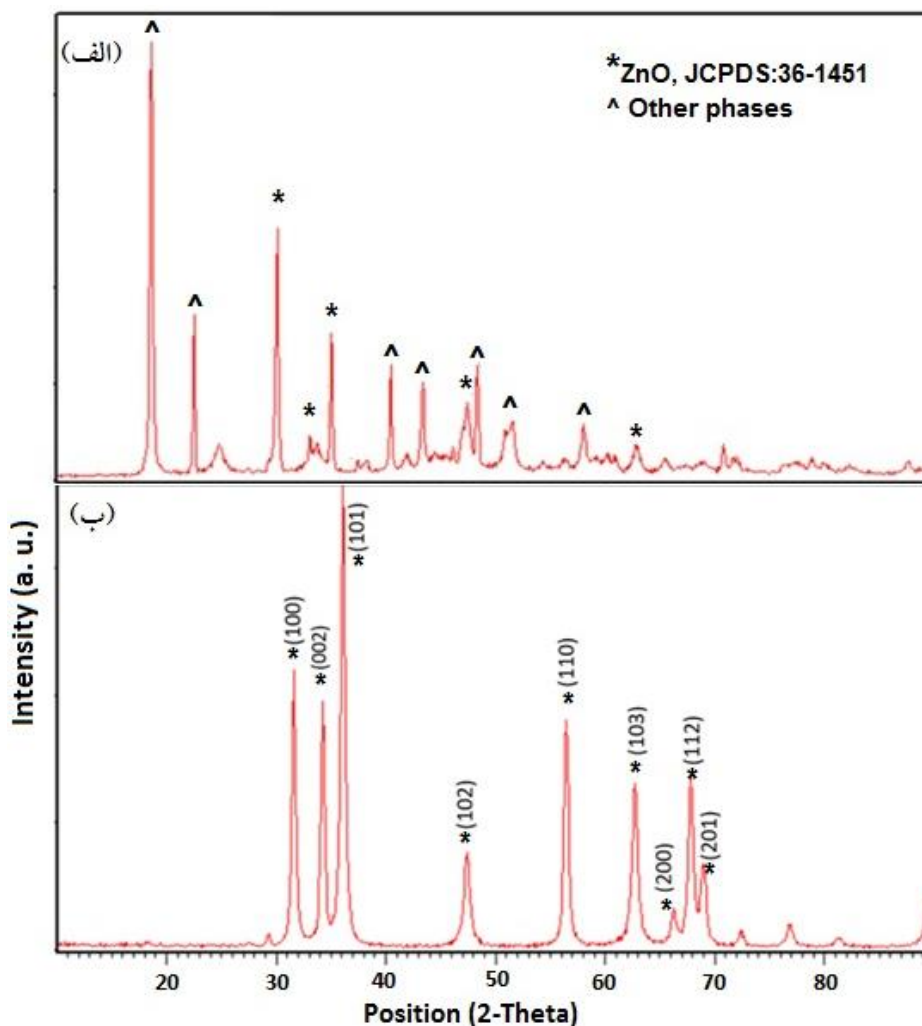
الگوی پراش پرتو ایکس نمونه پس از کلسینه‌کردن، شکل (۲-۲) ب)، نشان‌دهنده یک تغییر فازی موفقیت‌آمیز است. حذف قاطع پیک‌های آلی مشاهده‌شده در نمونه پیش‌ساز، به‌طور قطعی خلوص فازی بسیار بالا را تأیید می‌کند (۳۷ و ۳۸). الگوی پراش تنها شامل ۱۰ پیک مشخصه فاز تک‌جزئی اکسید روی است که با ساختار شش‌ضلعی و رتزیست منطبق هستند (۳۴). پیک‌های تیز و با شدت بالا در نمودار، نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه درجه تبلور در اثر فرآیند حرارتی است (۳۵). قوی‌ترین پیک در  $2\theta = 36.104^\circ$  متناظر با صفحه (۱۰۱) است که جهت‌گیری غالب بلورک‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس محاسبه با رابطه شرر، متوسط اندازه بلورها نهایی ۲۴ نانومتر گزارش شده است. تحلیل‌های ساختاری نشان داد که پارامترهای شبکه  $a$  ( $3.268 \text{ \AA}$ ) و  $c$  ( $5.236 \text{ \AA}$ ) تنها با انحراف اندکی (کمتر از ۰/۰۶٪ در هر دو محور) نسبت به مقادیر استاندارد JCPDS به شماره ۱۴۵۱-۳۶، به ترتیب  $3.249 \text{ \AA}$  و  $5.206 \text{ \AA}$  مشاهده شدند. این انطباق بالا، خلوص ساختاری و شکل‌گیری اکسید روی با کمترین میزان نقص شبکه‌ای را تأیید می‌کند. هم‌راستایی دقیق پیک‌ها، همچنین نشان‌دهنده حذف کامل کشش ساختاری<sup>۱۴</sup> است که در نمونه خام وجود داشت (۳۹). این اندازه کوچک بلورک‌ها برای کاربرد در محصولات آرایشی و بهداشتی نظیر ضدآفتاب‌ها ایده‌آل است (۴۰). اندازه نانومتری به محصول اجازه می‌دهد تا ضمن حفظ قابلیت محافظت UV بالا، شفافیت نوری محصول را حفظ کرده و روی پوست، رد سفید به‌جا نگذارد (۳۷ و ۳۸).

الکترونی روبشی مدل Tescan-Vega3 (ساخت جمهوری چک) مورد بررسی قرار گرفت. پیش از تصویربرداری، سطح نمونه‌ها به منظور جلوگیری از شارژ الکتریکی، با یک لایه نازک از طلا (Au) پوشش داده شد. تصاویر با استفاده از آشکارساز الکترون ثانویه<sup>۱۲</sup>، در ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت (kV) و در بزرگنمایی‌های مختلف ثبت شدند. در نهایت، با استفاده از تصاویر کالیبره شده، محاسبات آماری مربوط به توزیع اندازه ذرات استخراج و تحلیل گردید.

### ۳- نتایج و بحث

الگوی XRD مربوط به نانوذرات سنتز شده با استفاده از عصاره چای سبز پیش از عملیات حرارتی، شکل (۲-الف)، نشان‌دهنده پیک‌های اکسید روی به همراه پیک‌های دیگری است که نشان‌دهنده وجود ناخالصی‌ها و ترکیبات دیگری به جز اکسید روی در ساختار است. این ساختار پیچیده که شامل ۳۱ پیک مجزا است، وجود مواد واسط و آلی فراوان در نمونه خام را تأیید می‌کند. در بررسی دقیق الگوی پراش، بارزترین ویژگی مشاهده‌شده، حضور پیک‌های بسیار شدید و تیزی در ناحیه زوایای پایین (کمتر از  $30^\circ$ ) است. این پیک‌ها مربوط به فاز اکسید روی نبوده، بلکه نشان‌دهنده تبلور ترکیبات آلی متصل به فلز هستند که از پیوند یون‌های روی با مواد فعال زیستی چای سبز حاصل شده‌اند. شدت بالای این پیک‌ها اثبات می‌کند که در سنتز سبز، این ترکیبات ساختارهای بلورین منظمی را تشکیل داده‌اند (۳۳).

هم‌زمان با حضور این فازهای آلی، در محدوده زوایای میانی (بین  $30^\circ$  تا  $40^\circ$  درجه)، پیک‌های اصلی مربوط به فاز اکسید روی با ساختار و رتزیست نیز دیده می‌شوند که تشکیل هسته‌های اولیه اکسید روی را تأیید می‌کنند. با این حال، شدت نسبتاً کمتر این پیک‌ها در مقایسه با پیک‌های آلی، نشان‌دهنده آن است که در این مرحله، نانوذرات اکسید روی در ماتریس آلی محاصره شده‌اند (۳۴). از سوی دیگر، محاسبات اندازه بلورها، توزیع وسیع و ناهمگونی را نشان می‌دهد. این ناهمگونی ناشی از اثر پوشاندگی<sup>۱۳</sup> عصاره چای سبز است که با احاطه کردن هسته‌های اولیه، مانع از



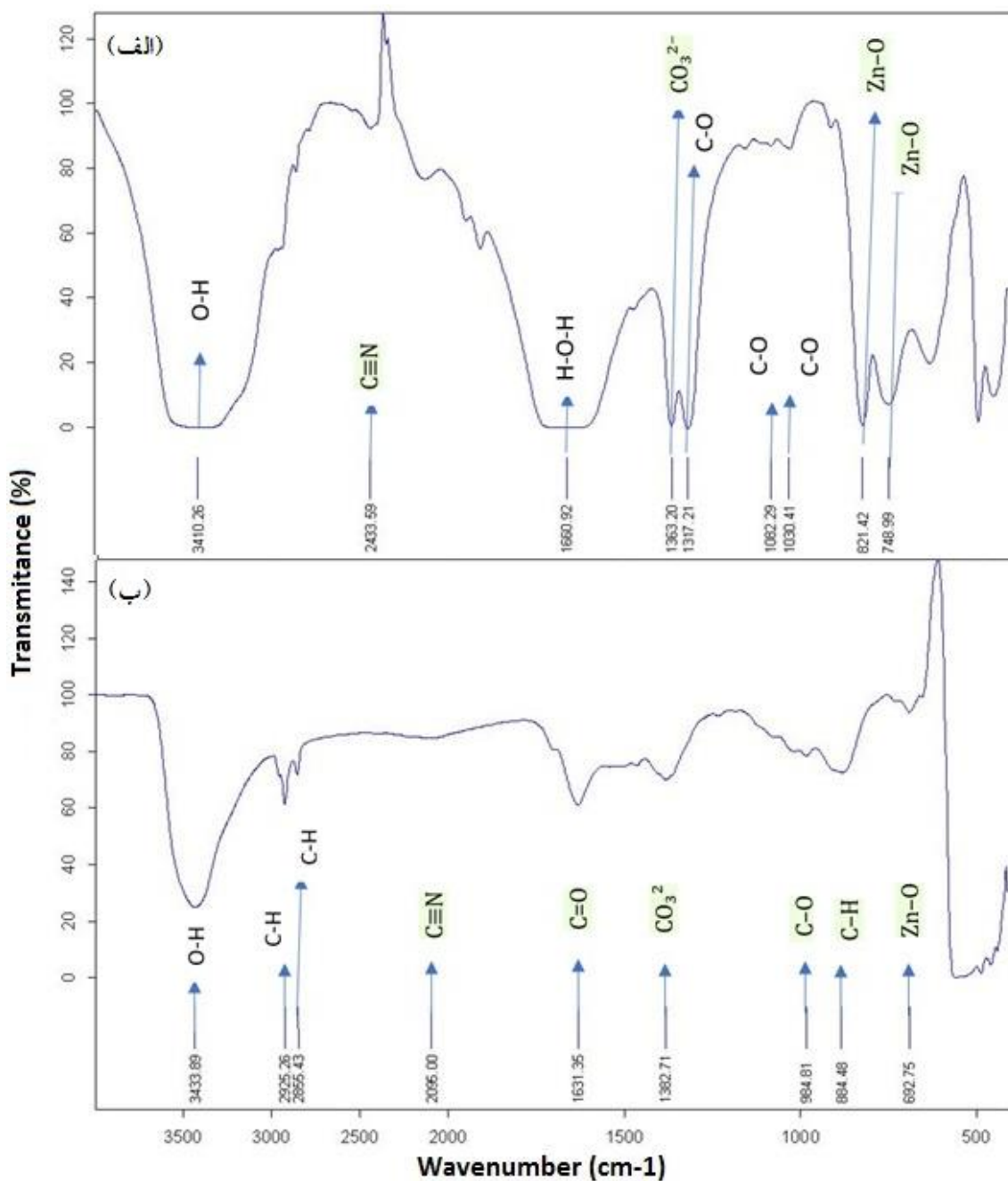
شکل ۲- الگوی XRD نانوذرات اکسید روی سنتز شده با عصاره چای سبز:

(الف) پس از سنتز، (ب) پس از کلسینه کردن در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ .

در شکل (۳-الف)، طیف FTIR نمونه سنتز شده با استفاده از عصاره چای سبز در بازه  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  ثبت گردید. باند پهن و قوی در محدوده  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) نسبت داده شد که نشان‌دهنده حضور آب جذب شده و ترکیبات فنولی است؛ این ویژگی نقش کلیدی در پایدارسازی نانوذرات دارد (۴۳-۴۱). باندهای ضعیف در ناحیه  $2950-2850\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای C-H در زنجیره‌های آلی و ترکیبات موجود در عصاره گیاهی مشاهده گردید و در بسیاری از سنتزهای سبز نانوذرات دیده شده است (۴۶-۴۴). باند در حوالی  $1700\text{ cm}^{-1}$  مربوط به کشش گروه

کربونیل (C=O) است که بیانگر حضور گروه‌های فنولی و اسیدهای آلی است که در پوشش‌دهی و سنتز نانوذرات نقش اساسی دارد (۴۶). همچنین، باندهای  $1200-1000\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات C-O-C و C-O بوده که دلالت بر حضور پلی فنول‌ها و گلوکز، به‌عنوان عامل پایدارکننده و عامل کاهنده دارند. در ناحیه  $600-400\text{ cm}^{-1}$  نیز باند ضعیفی ظاهر شد که به ارتعاش کششی پیوند Zn-O نسبت داده شده و بیانگر تشکیل فاز اکسید روی در نمونه است (۴۹-۴۶).

پس از عملیات حرارتی، تغییرات قابل توجهی در طیف FTIR مشاهده گردید، همان‌طور که در شکل (۳-ب) دیده می‌شود،

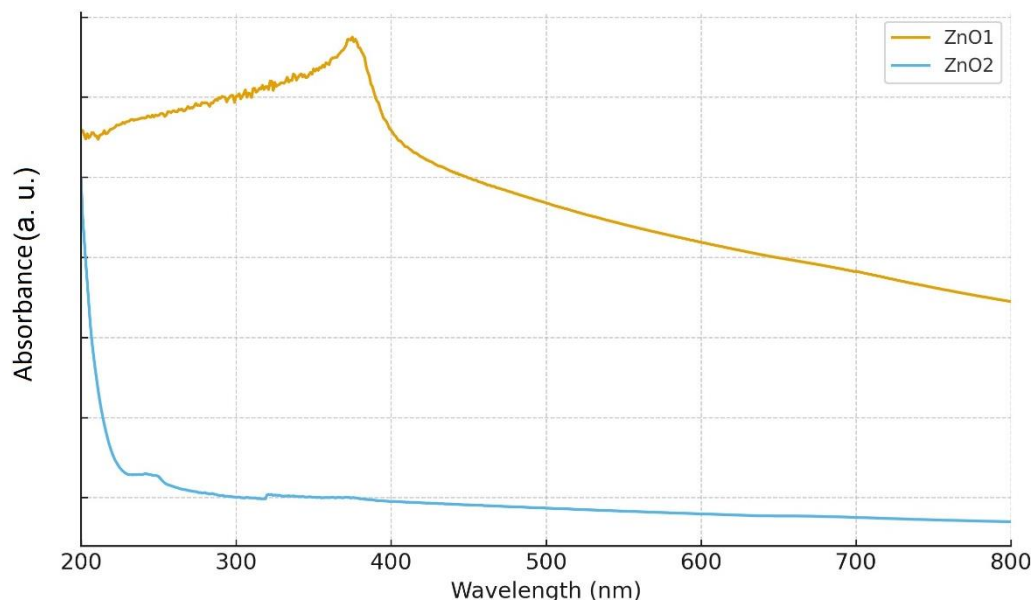


شکل ۳- طیف FTIR نانوذرات اکسید روی سنتز شده: (الف) قبل از کلسینه کردن، (ب) پس از کلسینه کردن در دمای ۴۵۰ °C.

کامل تر مواد آلی و باقی ماندن ساختار معدنی اکسید روی می باشد (۱۰).

طیف جذب نوری مرئی-فرابنفش (شکل ۴)، نشان داد که نمونه اکسید روی پس از کلسینه کردن، دارای یک پیک جذبی قوی و مشخص در حوالی ۳۷۰ نانومتر است (۵۰ و ۵۱).

شدت باندهای آلی شامل O-H، C-H، C=O و C-O، به طور محسوسی کاهش یافت یا حذف شد که نشان دهنده تجزیه و حذف ترکیبات آلی عصاره گیاهی است. در مقابل، باند مشخص مربوط به Zn-O در محدوده ۴۰۰-۶۰۰ cm<sup>-1</sup> با شدت و وضوح بیشتری ظاهر گردید. صاف تر شدن خط پایه طیف نیز مؤید حذف



شکل ۴- طیف جذب مرئی- فرابنفش نانوذرات اکسید روی سنتز شده با عصاره چای سبز.

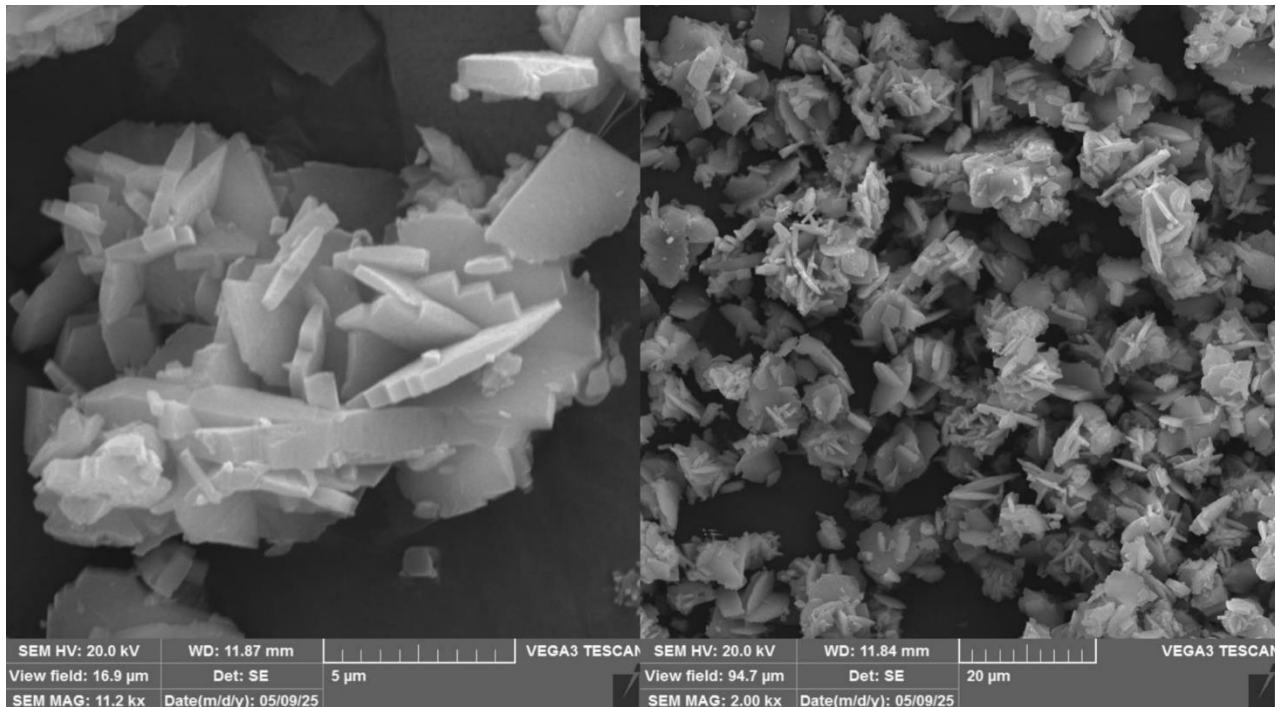
از طول موج‌های نور مرئی کوچک‌تر است، پراکندگی نور به حداقل می‌رسد (۵۳). این ویژگی مشکل سنتی «اثر سفیدکنندگی»<sup>۱۶</sup> در کرم‌های ضدآفتاب فیزیکی را حل کرده و تضمین می‌کند که فرمولاسیون نهایی، ضمن حفظ قدرت بالای فیلتراسیون UV، از نظر زیبایی‌شناختی جذاب باقی بماند (۵۴).

تصاویر SEM نمونه سنتز شده پیش از عملیات حرارتی که در شکل (۵) قابل مشاهده هستند، ساختاری را آشکار می‌سازند که عمدتاً از تیغه‌های متراکم و صفحات لایه‌ای تشکیل شده است. این مورفولوژی غیرکروی و نامتقارن، خصیصه بارز فازهای پیش‌ماده در سنتزهای مبتنی بر مسیره‌های شیمی‌تری<sup>۱۷</sup> است. تحلیل ابعادی انجام شده روی این تصاویر، نشان می‌دهد که ضخامت میانگین این ساختارهای صفحه‌ای، در محدوده ۱۵۰ نانومتر قرار دارد. مورفولوژی نانوذرات تولید شده در مقایسه با نمونه‌های میله‌ای شکل تولید شده به روش هیدروترمال در تحقیق اجسمونت و همکاران (۱۶)، متفاوت است.

الگوی رشد لایه‌ای مشاهده شده، ارتباط مستقیمی با حضور متابولیت‌های فعال زیستی در عصاره آبی چای سبز دارد. پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدهای موجود در عصاره، به‌عنوان عوامل پوشاننده و پایدارکننده، به‌طور انتخابی بر وجوه پرنرژری

پیک که ناشی از انتقال مستقیم الکترون‌های لبه نواری اکسید روی است، مؤید توانایی ماده در فراهم کردن محافظت مؤثر و گسترده در ناحیه UVA و UVB می‌باشد (۵۲). در مقایسه، جذب بسیار پایین نمونه پیش‌ساز ZnO-1 در همان طول موج‌ها، نقش حیاتی عملیات حرارتی را در افزایش خلوص ساختاری و قابلیت جذب نور توسط نانوذرات اثبات می‌کند (۵۳). شکاف انرژی اپتیکی ( $E_g$ ) نانوذرات با استفاده از لبه جذب در ۳۷۰ nm، ۳/۳۵۱ eV محاسبه گردید که این مقدار نسبت به شکاف انرژی اکسید روی توده‌ای ( $\approx 3.37$  eV) اندکی کمتر است که در موارد مشابه دیگری نیز با کاهش اندازه ذرات تغییرات مشابهی ثبت شده است (۶۸).

علاوه بر کارایی حفاظتی، جنبه آرایشی محصول تابعی مستقیم از مورفولوژی ذرات است. داده‌های XRD متوسط اندازه بلورهای نهایی ۲۳/۹۶ nm را گزارش کردند. این ابعاد کوچک، دو مزیت عملکردی کلیدی را تضمین می‌کند: نخست، قدرت بالای جذب در ناحیه UV (و عبور نور زیر ۰.۵٪ در این ناحیه) که به‌طور مستقیم به افزایش قابل توجه ضریب محافظت در برابر خورشید<sup>۱۵</sup> محصول نهایی منجر می‌شود (۵۳ و ۵۴)؛ دوم، شفافیت نوری محصول نهایی؛ از آنجاکه ابعاد ۲۳/۹۶ nm به‌مراتب



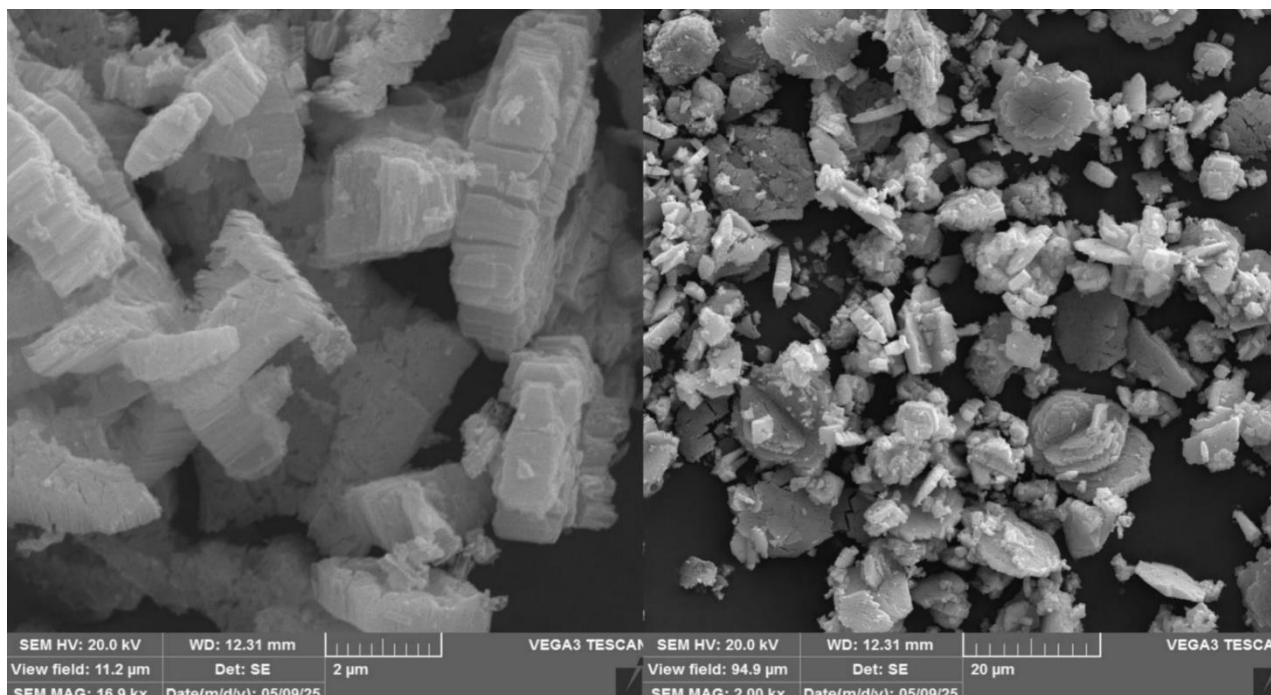
شکل ۵- تصاویر SEM نانوذرات اکسید روی سنتز شده با چای سبز قبل از عملیات حرارتی.

ویژگی بصری، شاهد مستقیم برای تجزیه و خروج ناگهانی آب ساختاری و سوختن بقایای آلی و کربنی است که در EDS نیز به صورت عددی توجیه می‌گردد (۶۱-۵۸). در نهایت، ضخامت متوسط ساختارهای لایه‌ای از ۱۵۰ نانومتر در نمونه خام، به حدود ۲۰۰ نانومتر در نمونه ZnO-2 افزایش یافته است. این افزایش ابعاد، پدیده رشد بلورکها را اثبات می‌کند که در اثر سازوکار تکامل اوستوالد رایپینگ<sup>۱۸</sup> در دمای بالا رخ داده است (۶۲ و ۶۳).

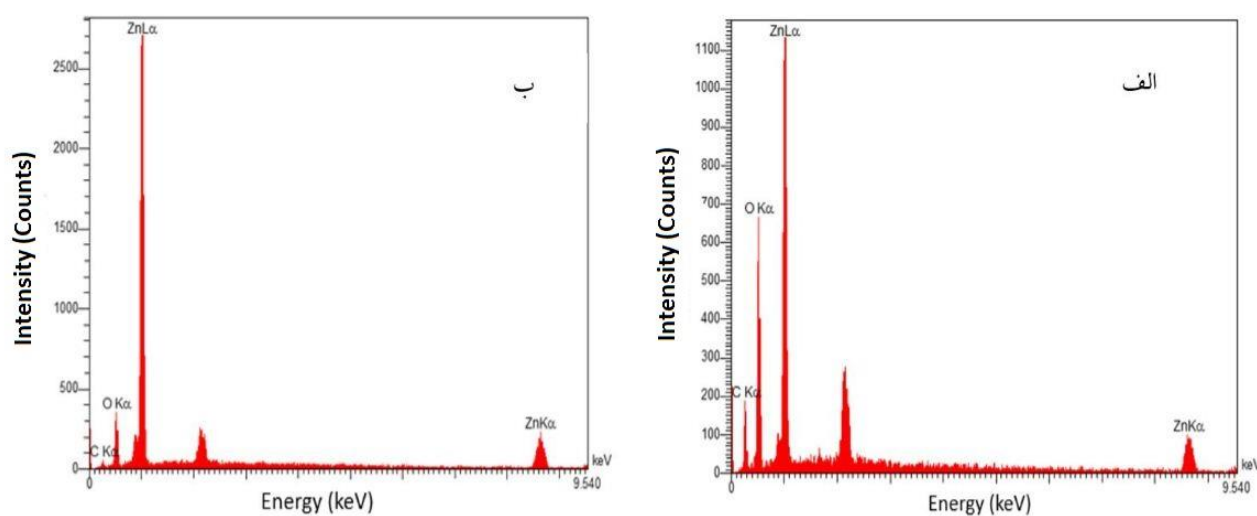
تحلیل EDS، به منظور تأیید موفقیت آمیز بودن سنتز و ارزیابی تأثیر عملیات حرارتی بر خلوص ترکیب روی نمونه‌های پیش از کلسینه کردن و پس از کلسینه کردن انجام پذیرفت. طیف‌های EDS (شکل ۷)، حضور عناصر اصلی روی (Zn) و اکسیژن (O) را به واسطه پیک‌های شاخص آن‌ها (O: ۰/۵۲ keV، خط K-α؛ Zn: ۱/۰ keV، خط L-α و ۰/۶ keV، خط K-α)، تأیید می‌کنند. اگرچه یک پیک قوی از کربن (C) نیز در طیف مشاهده می‌شود، این سیگنال قوی (با درصد اتمی خام ۴۱/۴٪ در ZnO-1 و ۳۸/۲٪ در ZnO-2)، به عنوان یک خطای دستگاهی استاندارد تلقی شده و ناشی از استفاده از نوارچسب رسانای کربنی برای تثبیت پودر

هسته‌های بلوری در حال تشکیل جذب سطحی می‌شوند و در نتیجه، فرآیند تبلور را کنترل و پایدار می‌سازند (۲۵ و ۵۵). این اتصال انتخابی، به طور مؤثر رشد بلور را در یک جهت مهار کرده و آن را به سمت رشد ناهمسانگرد سوق می‌دهد که نتیجه نهایی آن، ایجاد همین ساختارهای دوبعدی (صفحات) است. افزون‌براین، فشردگی و چسبندگی قابل مشاهده در این نمونه، ریشه در باقی ماندن بافت و ناخالصی‌های کربنی عصاره گیاهی دارد که ساختار پودر خام را احاطه کرده‌اند (۵۶ و ۵۷). این مشاهدات میکروسکوپی، لزوم انجام عملیات کلسینه کردن را برای حذف کامل این آلودگی‌های آلی و دستیابی به فاز خالص اکسید روی توجیه می‌نماید.

تصاویر SEM نمونه اکسید روی که تحت عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ °C قرار گرفته است (شکل ۶)، تغییرات ساختاری قابل توجهی را نسبت به نمونه خام نشان می‌دهند. نخست این‌که مورفولوژی ذرات به بلورهای منشوری و صفحه‌ای با لبه‌های کاملاً مشخص و منظم تبدیل شده است. ثانیاً بافت سطحی ذرات اکنون ترک خورده و دارای ساختاری متخلخل و پفکی است. این



شکل ۶- تصاویر SEM نانوذرات اکسید روی سنتز شده با چای سبز بعد از عملیات حرارتی.



شکل ۷- طیف‌های آنالیز EDS نمونه‌های نانوذرات اکسید روی: الف) پیش از کلسینه کردن ب) پس از کلسینه کردن.

نرمال‌سازی از ۸/۷۵٪ در نمونه خام به ۲۱/۴۶٪ در نمونه کلسینه شده افزایش قابل توجهی یافته است. این افزایش بیش از ۱۴۵٪ در غلظت نسبی روی، مؤید تجزیه کامل بقایای آلی و تبدیل مؤثر پیش‌سازها به اکسید روی است. نسبت Zn:O در نمونه پس از کلسینه کردن تقریباً ۱:۳/۶۶ به دست آمد (جدول ۱). این نسبت

غیررسانا یا آلودگی محیطی است (۵۹ و ۶۴). برای حذف این تداخل و تعیین دقیق ترکیب عنصری نانوذرات، داده‌ها براساس عناصر روی و اکسیژن نرمال‌سازی شدند (۶۵). نتایج کمی نرمال‌شده، قدرت فرآیند کلسینه کردن در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را تأیید می‌کنند: درصد اتمی روی (Zn) پس از

جدول ۱- نتایج کمی آنالیز EDS نانوذرات اکسید روی

آنالیز نانوذرات روی پس از ستنز		آنالیز نانوذرات روی پس از کلسینه کردن		عنصر
درصد وزنی (Wt %)	درصد اتمی (At %)	درصد وزنی (Wt %)	درصد اتمی (At %)	
۳۰/۹۶±۳/۱۸	۴۲/۰۰	۲۱/۹±۱/۰	۳۸/۸	C
۵۳/۰۳±۳/۲۹	۵۴/۰۱	۳۷/۱±۱/۵	۴۶/۶	O
۱۶/۰۱±۱/۰۴	۳/۹۹	۴۱/۰±۰/۹	۱۴/۵	Zn

از نسبت استوکیومتری ایده آل (۱:۱) بالاتر است، اما این امر در نانوذرات اکسید روی سنتز شده در دمای پایین یک ویژگی ساختاری متداول و قابل انتظار است. این نسبت بالای اکسیژن می تواند ناشی از وجود عیوب ساختاری مانند جای خالی روی و همچنین حضور اجتناب ناپذیر گروه های سطحی هیدروکسیل (OH) و اکسیژن شیمیایی جذب شده بر سطح بسیار فعال نانوذرات باشد (۶۶ و ۶۷). همچنین عنصر مربوط به پیک در انرژی ۲/۱۵ کیلو الکترون ولت، طلا است که ناشی از پوشش متعارف کندوپاش<sup>۱۹</sup> طلا جهت نمونه های عایق می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوذرات اکسید روی به روش سنتز سبز و با استفاده از عصاره چای سبز تولید شدند. آنالیز XRD تأیید کرد که نانوذرات سنتز شده دارای ساختار بلوری هگزاگونال ورتزیت است که پس از کلسینه کردن در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد، تیزی و شدت پیکها افزایش یافت که نشان دهنده بهبود بلورینگی و رشد اندازه بلورکها است. طیفسنجی FTIR تشکیل موفقیت آمیز پیوند روی-اکسیژن (Zn-O) را با یک پیک قوی در محدوده  $470-490 \text{ cm}^{-1}$  تأیید کرد. پیک های مربوط به ترکیبات آلی عصاره چای سبز (مانند گروه های H-O و C=O) در طیف نمونه قبل از کلسینه کردن مشاهده شدند و پس از عملیات حرارتی به طور کامل حذف گردیدند. تصاویر SEM نشان دادند که نانوذرات دارای مورفولوژی تیغه های متراکم و صفحات لایه ای هستند. این مورفولوژی با ساختار بلوری هگزاگونال تأیید شده توسط XRD همخوانی دارد. تجمع و

خوشه ای شدن نیز در تصاویر مشاهده شد که پدیده ای رایج در نانومواد است و به دلیل انرژی سطحی بالای ذرات رخ می دهد. آنالیز EDS نشان داد که پس از فرآیند کلسینه کردن، درصد کربن کاهش یافته و درصد روی افزایش پیدا کرده است؛ این تغییرات بیانگر حذف بخشی از ترکیبات آلی عصاره چای سبز و تشکیل فاز ZnO با خلوص بالاتر می باشد. وجود مقادیر جزئی کربن نیز به بقایای مواد آلی از عصاره چای سبز مربوط می شود که با آنالیز FTIR همخوانی دارد. طیفسنجی UV-Vis نشان داد که نانوذرات اکسید روی پس از عملیات حرارتی دارای یک پیک جذب قوی در ناحیه فرابنفش در طول موج ۳۷۰ نانومتر هستند. این ویژگی، توانایی بالای آنها را در جذب پرتوهای مضر UV برای کاربرد در ضدآفتابها تأیید می کند.

#### تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

#### تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

#### سهم نویسندگان

زهرا زارعی: جمع آوری داده ها، تحلیل و تفسیر داده ها، نوشتن مقاله، مدیریت منابع. کاظم طهماسبی: طراحی و ایده پردازی، اعتبارسنجی منابع، نوشتن مقاله، راهنمایی پروژه.

## واژه‌نامه

1. ultraviolet (UV)
2. bioactive
3. *Camellia sinensis*
4. epigallocatechin gallate (EGCG)
5. band gap
6. ultraviolet–visible (UV-Vis)
7. X-ray diffraction (XRD)
8. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
9. scanning electron microscopy (SEM)
10. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
11. zero-background
12. secondary electron (SE)
13. capping effect
14. structural strain
15. sun protection factor (SPF)
16. whitening effect
17. wet-chemistry
18. Ostwald ripening
19. sputtering

## مراجع

1. Elbrolesy A, Abdou Y, Elhussiny FA, Morsy R. Novel green synthesis of UV-sunscreen ZnO nanoparticles using *Solanum lycopersicum* fruit extract and evaluation of their antibacterial and anticancer activity. *J Inorg Organomet Polym Mater*. 2023;33: 3750–3759. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02744-3>
2. Jain A, Bhise K. Green synthesis methods for metallic zinc oxide nanoparticles: a sustainable angle. In: *Synthesizing and Characterizing Plant-Mediated Biocompatible Metal Nanoparticles*. Hershey (PA): IGI Global; 2025. p. 63-90. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6240-2.ch003>
3. Mahmoudi Cholichch F, Ahmadimoghdam H, Sharifi H. The effect of zinc oxide nanoparticles on the microstructure and dielectric properties of barium titanate ceramics. *J Adv Mater Eng*. 2024;43(2):55-67 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.43.2.1068>
4. Singh H, Kumar R, Sharma P, Gupta N, Patel V, Khan M, et al. Revisiting the green synthesis of nanoparticles: uncovering influences of plant extracts as reducing agents for enhanced synthesis efficiency and its biomedical applications. *Int J Nanomedicine*. 2023;4727–4750. <https://doi.org/10.2147/IJN.S412345>
5. Araki SM, Baby AR. New perspectives on titanium dioxide and zinc oxide as inorganic UV filters: advances, safety, challenges, and environmental considerations. *Cosmetics* 2025;12(2):77. <https://doi.org/10.3390/cosmetics12020077>
6. Tiwari AK, Sharma R, Patel S, Gupta V, Khan M, Singh P, et al. Spectroscopic investigations of green synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs): antioxidant and antibacterial activity. *Discov Appl Sci*. 2024;6(8):399. <https://doi.org/10.1007/s44247-024-00399-5>
7. Akintelu SA, Folorunso AS. A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles using plant extracts and its biomedical applications. *BioNanoScience* 2020;10(4):848–863. <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00719-4>
8. Xu J, Li Y, Wang H, Chen Z, Liu Q, Zhang M, et al. A review of the green synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and their prospects for application in antibacterial textiles. *J Eng Fibers Fabr*. 2021;16:15589250211046242. <https://doi.org/10.1177/15589250211046242>
9. Nazari Moghaddam S, Labbf S, Karbsi M, Mohammadzadeh M. Green synthesis and optimization of titanium dioxide nanoparticles using aloe vera extract for biomedical applications. *J Adv Mater Eng (In Persian)*. 2024;43(4):23-36. <https://doi.org/10.47176/jame.43.4.1069>
10. Karam ST, Abdulrahman AF. Green synthesis and characterization of ZnO nanoparticles by using thyme plant leaf extract. *Photonics* 2022;9(8):594. <https://doi.org/10.3390/photonics9080594>
11. Chandran SP, Chaudhary M, Pasricha R, Ahmad A, Sastry M. Synthesis of gold nanotriangles and silver nanoparticles using *Aloevera* plant extract. *Biotechnol Prog*. 2006;22(2):577–583. <https://doi.org/10.1021/bp0501423>
12. Suresh D, Nethravathi PC, Udayabhanu G, Nagabhushana H, Sharma SC, Rajanaika H, et al. EGCG assisted green synthesis of ZnO nanopowders: photodegradative, antimicrobial and antioxidant activities. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*. 2015;136:1467–1474. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.038>
13. Prasad AR, Ammal PR, Joseph A. Effective photocatalytic removal of different dye stuffs using green synthesized zinc oxide nanogranules. *Mater Res Bull*. 2018;102:116–121. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.02.022>
14. Shaba EY, Jacob JO, Tijani JO, Suleiman MA. A critical review of synthesis parameters affecting the properties of zinc oxide nanoparticle and its application in wastewater treatment. *Appl Water Sci*. 2021;11(2):70. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01370-z>
15. Rezaei A, Katoueizadeh E, Zebarjad S. Investigation of the parameters affecting the morphology of zinc oxide (ZnO) nanoparticles synthesized by

- precipitation method. *Mater Today Chem.* 2022;26:101239.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101239>
16. Ejsmont A, Goscianska J. Hydrothermal synthesis of ZnO superstructures with controlled morphology via temperature and pH optimization. *Materials* 2023;16(4):1641. <https://doi.org/10.3390/ma16041641>
17. Kolodziejczak-Radzimska A, Jesionowski T. Zinc oxide—from synthesis to application: a review. *Materials* 2014;7(4):2833–2881.  
<https://doi.org/10.3390/ma7042833>
18. Ahmad N, Sharma S. Green synthesis of silver nanoparticles using extracts of *Ananas comosus*. *Green Sustainable Chem.* 2012;2(4):141–147.  
<https://doi.org/10.4236/gsc.2012.24020>
19. Vieira IRS, Silva FA, Gomes LM, Pereira RC, Andrade JP, Costa MF, et al. Eco-friendly synthesis of ZnO nanomaterial from green tea extract: photocatalytic, antibacterial and antioxidant potential. *Biomass Convers Bioref.* 2024;14(19):24317–24331.  
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-04456-7>
20. Mathizhagan TE, Kumar R, Devi P, Arumugam S, Kannan V, Ramesh T, et al. Bio-mediated zinc oxide nanoparticles through tea residue: ecosynthesis, characterizations, and biological efficiencies. *Sustainability* 2022;14(23):15572.  
<https://doi.org/10.3390/su142315572>
21. Ghorbani MG, Hosseini A, Rahmani F, Jafari S, Karimi H, Mohammadi R, et al. Investigating the effect of zinc oxide nanoparticles on the absorption of ultraviolet radiation for enhancing the efficacy of sunscreen products. *Prog Color Colorants Coat.* 2025;19(1):47–65.  
<https://doi.org/10.30509/pccc.2025.167471.1365>
22. Bulcha B, Leta Tesfaye J, Anatol D, Shanmugam R, Dwarampudi LP, Nagaprasad N, et al. Synthesis of zinc oxide nanoparticles by hydrothermal methods and spectroscopic investigation of ultraviolet radiation protective properties. *J Nanomater.* 2021;2021(1):8617290. <https://doi.org/10.1155/2021/8617290>
23. Cavalcanti IMG A, Silva RP, Almeida JF, Santos LM, Oliveira TA, Costa PH, et al. Optical and structural properties of sunscreens evaluated by physical techniques with emphasis on zinc oxide: A critical review. *Appl Radiat Isot.* 2025;8:112217.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.112217>
24. Wang L, Zhang Y, Chen H, Liu J, Zhao X, Huang Q, et al. A transparent kaolinite-loaded zinc oxide nanocomposite sunscreen with UV shielding rate over 99% based on bidirectional dispersion. *Nanotechnology* 2022;34(7):075601.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac9e05>
25. Irshad S, Nawaz R, Rehman K, Aslam M, Ahmad B, Naheed A, et al. Green tea leaves mediated ZnO nanoparticles and its antimicrobial activity. *Cogent Chem.* 2018;4(1):1469207.  
<https://doi.org/10.1080/23312009.2018.1469207>
26. Thakur S, Rialach S, Swain S, Swain M, Mishra DM, Sahoo G, et al. Synthesis of ZnO nanoparticles using green tea powder extract. *Orissa J Phys.* 2023;30(2):41–48.
27. Mohammadi A, Hosseini M, Karimi S, Rahmani F, Jafari N, Ghasemi R, et al. Green synthesis and toxicological evaluation of zinc oxide nanoparticles utilizing *Punica granatum* fruit peel extract: An eco-friendly approach. *Sci Rep.* 2025;15(1):20853.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-05544-6>
28. Swain M, Mishra D, Sahoo G. A review on green synthesis of ZnO nanoparticles. *Discov Appl Sci.* 2025;7(9):997. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06957-8>
29. Gu M, Li Y, Zhang H, Chen X, Wang J, Liu Q, et al. The selective heavy metal ions adsorption of zinc oxide nanoparticles from dental wastewater. *Chem Phys.* 2020;534:110750.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2020.110750>
30. Chan YY, Pang YL, Lim S, Chong WC. Facile green synthesis of ZnO nanoparticles using natural-based materials: properties, mechanism, surface modification and application. *J Environ Chem Eng.* 2021;9(4):105417.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105417>
31. Klink MJ, Smith R, Johnson T, Patel A, Wang L, Müller H, et al. Synthesis, characterization and antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles against selected waterborne bacterial and yeast pathogens. *Molecules* 2022;27(11):3532.  
<https://doi.org/10.3390/molecules27113532>
32. Srivastava V, Gusain D, Sharma YC. Synthesis, characterization and application of zinc oxide nanoparticles (n-ZnO). *Ceram Int.* 2013, 39(8): 9803–9808. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.110>
33. Soto-Robles C, López-Mena R, Hernández-Pérez J, Martínez-García M, Ramírez-Castañeda J, Torres-Gómez A, et al. Biosynthesis, characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles using extracts of *Justicia spicigera* for the degradation of methylene blue. *J Mol Struct.* 2021;1225:129101.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129101>
34. Baskaran N, Subash A. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) from *Camellia sinensis* leaf extract and its potential of antibacterial activity and acetyl cholinesterase inhibitory activities. *J Pharm Res Int.* 2021;33(51A):134–147.  
<https://doi.org/10.9734/jpri/2021/v33i51A33477>
35. Naseer M, Ali S, Khan T, Ahmad R, Hussain A, Akhtar N, et al. Green route to synthesize zinc oxide nanoparticles using leaf extracts of *Cassia fistula* and *Melia azadarach* and their antibacterial potential. *Sci Rep.* 2020;10(1):9055.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65949-3>
36. Barzinjy AA, Azeez HH. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using

- Eucalyptus globulus Labill. leaf extract and zinc nitrate hexahydrate salt. *SN Appl Sci* 2020;2(5):991. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2813-1>
37. Soto-Robles C, López-Mena R, Hernández-Pérez J, Martínez-García M, Ramírez-Castañeda J, Torres-Gómez A, et al. Biosynthesis, characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles using extracts of *Justicia spicigera* for the degradation of methylene blue. *J Mol Struct.* 2021;1225:129101. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129101>
  38. Saeed AA. Structural and optical properties for ZnO nanoparticles for antibacterial application. *Tikrit J Pure Sci.* 2025;30(1):1. <https://doi.org/10.25130/tjps.v30i1.1779>
  39. El-Seedi HR, Khalifa SAM, Sahli AA, Al-Mousawi SM, Al-Mousawi RI, Al-Mousawi MA, et al. Updated review of metal nanoparticles fabricated by green chemistry using natural extracts: Biosynthesis, mechanisms, and applications. *Bioengineering* 2024; 11(11):1095. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11111095>
  40. Krauß S, Hempel J, Schwarz M. First ATR-FTIR characterization of black, green and white teas (*Camellia sinensis*) from European tea gardens: A PCA analysis to differentiate leaves from the in-cup infusion. *Foods* 2025;13(1):109. <https://doi.org/10.3390/foods13010109>
  41. Alyamani AA, Al-Malki AM, Al-Shehri S, Al-Mousawi SM, Al-Mousawi RI, Al-Mousawi MA, et al. Green fabrication of zinc oxide nanoparticles using phlomis leaf extract: characterization and in vitro evaluation of cytotoxicity and antibacterial properties. *Molecules* 2021;26(20):6140. <https://doi.org/10.3390/molecules26206140>
  42. El-Seedi HR, Omara MS, Omar AH, Elakshar MM, Shoukha YM, Duman H, et al. Updated review of metal nanoparticles fabricated by green chemistry using natural extracts: Biosynthesis, mechanisms, and applications. *Molecules.* 2025;30(3):684. <https://doi.org/10.3390/molecules30030684>
  43. Rajiv P, Rajeshwari S, Venckatesh R. Green synthesis, characterization and bioactivity of biogenic zinc oxide nanoparticles. *Environ Res.* 2021;194:111897. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111897>
  44. Senthilkumar SR, Sivakumar T. Green tea (*Camellia sinensis*) mediated synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles and studies on their antimicrobial activities. *Int J Pharm Pharm Sci.* 2014;6(6):459–463.
  45. Faisal S, Jan H, Shah SA, Khan A, Akbar MT, Rizwan M, et al. Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of *Myristica fragrans*: their characterizations and biological and environmental applications. *ACS Omega* 2021; 6(14):9709–9722. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00310>
  46. Farag M, El-Dafrawy SM, Hassan SM. ZnO and C/ZnO catalysts synthesized via plant mediated extracts for photodegradation of crystal violet and methyl orange dyes. *J Inorg Organomet Polym Mater.* 2024;34(3):930–943. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02811-9>
  47. Acharya R, Singh A, Patel P, Sharma K, Gupta N, Verma S, et al. Bioinspired synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles and assessment of their cytotoxicity and antimicrobial efficacy. *Discov Appl Sci.* 2024;6(3):85. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05719-2>
  48. Raza A, Khan M, Ali S, Ahmed R, Hussain T, Akhtar N, et al. *Polyalthia longifolia*-mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: characterization, photocatalytic and antifungal activities. *RSC Adv.* 2024;14(25):16789–16799. <https://doi.org/10.1039/D4RA01035C>
  49. Jayachandran A, Aswathy T, Nair AS. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract *Biochem Biophys Rep.* 2021;26:100995. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.100995>
  50. Fakhari S, Jamzad M, Kabiri Fard H. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: a comparison. *Green Chem Lett Rev.* 2019;12(1):19–24. <https://doi.org/10.1080/17518253.2018.1547925>
  51. Alshammari A, Alenezi A, Alotaibi B, Alshammari F, Alshammari R, Alshammari H, et al. AMP-coated TiO<sub>2</sub> doped ZnO nanomaterials enhanced antimicrobial activity and efficacy in otitis media treatment by elevating hydroxyl radical levels. *Int J Nanomedicine* 2024;19:12345–12360. <https://doi.org/10.2147/IJN.S449888>
  52. Irede EL, Adewale O, Johnson T, Musa A, Bello R, Okafor C, et al. Cutting-edge developments in zinc oxide nanoparticles: synthesis and applications for enhanced antimicrobial and UV protection in healthcare solutions. *RSC Adv.* 2024;14(29):20992–21034. <https://doi.org/10.1039/D4RA02452D>
  53. Azeez HH, Gozeh BA, Azeez HH, Slewa LH. The effect of green synthesis ZnO NPs on sun protection factor of sunblock lotion. *Rafidain J Sci.* 2024;33(4E):137–147.
  54. Jimtaisong A, Saewan N, Panyachariwat N. Sustainable fabrication of zinc oxide nanoparticles using Assam green tea extract with promising oral antimicrobial potential. *Appl Biosci.* 2025;4(3):44. <https://doi.org/10.3390/applbiosci4030044>
  55. Alshammari A, Alotaibi B, Alenezi A, Alshammari F, Alshammari R, Alshammari H, et al. Characterization and photocatalytic performance of newly synthesized ZnO nanoparticles for environmental organic pollutants removal from water system. *Separations* 2023;10(4):258. <https://doi.org/10.3390/separations10040258>
  56. Mohammada AM, Ahmed Al-Jaf HS, Ahmed HSh, Mohammed MM, Khodair ZT. Structural and morphological studies of ZnO nanostructures. *J Res*

- Nanotechnol. 2022;18(3):443–450.  
<https://doi.org/10.15251/JOR.2022.183.443>
57. Alibe IM, Matori KA, Saion E, Ali AM, Zaid MHM. The influence of calcination temperature on structural and optical properties of ZnO nanoparticles via simple polymer synthesis route. *Sci Sinter*. 2017;49(3):263–275. <https://doi.org/10.2298/SOS1703263A>
58. Kumar S, Tandon RP, Mahapatro AK. Effect of calcination on morphology of zinc oxide nanoparticles. *Integr Ferroelectr*. 2025;241(7–9):570–581. <https://doi.org/10.1080/10584587.2025.2483638>
59. Mahapatro AK, Tandon RP, Kumar S. Effect of calcination on morphology of zinc oxide nanoparticles. *Integr Ferroelectr*. 2025;241(7–9):570–581. <https://doi.org/10.1080/10584587.2025.2483638>
60. González-González A, Polop C, Vasco E. Slope selection-driven Ostwald ripening in ZnO thin film growth. *Phys Rev B* 2012;86(4):045434. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.045434>
61. Madras G, McCoy BJ. Temperature effects during Ostwald ripening. *J Chem Phys*. 2003, 119(3): 1683–1693. <https://doi.org/10.1063/1.1578617>
62. Fletcher RA, Ritchie NW, Anderson IM, Small JA. Microscopy and microanalysis of individual collected particles. In: Kulkarni P, Baron PA, Willeke K, editors. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 3rd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2011. p. 179.  
<https://doi.org/10.1002/9781118001684.ch10>
63. Youssef FS, Ismail SH, Fouad OA, Mohamed GG. Green synthesis and biomedical applications of zinc oxide nanoparticles: review. *Egypt J Vet Sci*. 2024;55(1):287–311.  
<https://doi.org/10.21608/ejvs.2023.225862.1576>
64. Potts PJ. *A handbook of silicate rock analysis*, Berlin. Springer Science & Business Media; 2012.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3270-5>
65. Newbury DE, Joy DC, Goldstein JI, Ritchie NW, Scott JH, Michael JR. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. New York: Springer; 2017.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9_5)
66. Mittal H, Maity A, Ray SS. In-situ synthesis of ZnO nanoparticles using gum arabic based hydrogels as a self-template for effective malachite green dye adsorption. *J Polym Environ*. 2020;28(6):1637–1653.  
<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01713-y>
67. Singh P, Kumar V, Kumar R, Kumar M, Singh J, Meena R, et al. Structural and optical investigations of oxygen defects in zinc oxide nanoparticles. *J Appl Phys*. 2015;117(13):135701.  
<https://doi.org/10.1063/1.4917664>
68. Shinde KP, Pawar RC, Sinha BB, Kim HS, Oh SS, et al. Study of effect of planetary ball milling on ZnO nanopowder synthesized by co-precipitation. *J Alloy Compds*. 2014;617: 404–407.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.030>