

Research Paper

Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Plantago ovata* extract and their application in the removal of chromium from aqueous solutions

Nasim Ziaefar

Department of Chemistry, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

Received: 2025/10/20

Accepted: 2025/12/13

Use your device to scan and read the article online

**Keywords:**ZnO, green synthesis, *Plantago ovata*, chromium removal, adsorption isotherm, adsorption kinetics**Abstract**

Introduction: In this study, zinc oxide (ZnO) nanoparticles were synthesized via a green method using *Plantago ovata* (psyllium) extract and applied for the removal of hexavalent chromium (Cr(VI)) ions from aqueous solutions.

Methods: The synthesis was performed under different ratios of extract to precursor, as well as various reaction temperatures and times. The structure and morphology of the nanoparticles were characterized using XRD, UV-Vis, SEM, and FT-IR techniques. Chromium adsorption experiments were carried out under different pH values and contact times.

Findings: The results indicated that the synthesized ZnO nanoparticles had an average size of about 22 nm with nearly spherical morphology, uniform size distribution, and minimal aggregation. The highest removal efficiency (92%) was achieved at pH = 2. The adsorption data were well fitted to the Langmuir isotherm model with a correlation coefficient (R^2) of 0.987. Kinetic analysis revealed that the adsorption process followed the pseudo-second-order model. These findings suggest that ZnO nanoparticles synthesized using *Plantago ovata* extract can be considered as a promising candidate for the treatment of Cr(VI)-contaminated water.

*Corresponding author: Nasim Ziaefar

Address: Department of Chemistry, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Tell: 09144211297

Email: Nz1659@gmail.com

DOI:

Extended Abstract

Introduction:

The contamination of water resources by heavy metals represents a critical environmental and public health concern. Hexavalent chromium (Cr(VI)) is among the most toxic and carcinogenic pollutants, characterized by high solubility and mobility in aqueous environments. Conventional removal methods, including chemical reduction, ion exchange, and membrane filtration, often suffer from high operational costs and potential secondary pollution. In recent years, green synthesis of metal oxide nanoparticles has emerged as a sustainable approach for water remediation. Zinc oxide (ZnO) nanoparticles, in particular, exhibit favorable physicochemical properties such as high surface area, chemical stability, and biocompatibility. In this study, ZnO nanoparticles were synthesized via an eco-friendly route using *Plantago ovata* extract as a natural reducing and stabilizing agent, and their potential for Cr(VI) removal was systematically evaluated.

Materials and Methods

ZnO nanoparticles were synthesized by mixing an aqueous solution of zinc salt with *Plantago ovata* extract under controlled conditions, including pH, temperature, and reaction time. The resulting nanoparticles were collected by centrifugation, washed with deionized water, and dried at ambient temperature. Characterization techniques included UV–Visible spectroscopy to confirm optical properties, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to identify functional groups, X-ray diffraction (XRD) for crystalline structure analysis, and scanning electron microscopy (SEM) for morphological assessment. Adsorption experiments were conducted in batch mode to examine the effects of solution pH (2–8), initial Cr(VI) concentration, contact time, and adsorbent dosage on removal efficiency. Equilibrium adsorption data were fitted to Langmuir and Freundlich isotherm models to elucidate the adsorption mechanism and determine the maximum adsorption capacity (q_{max}).

Results and Discussion

Characterization confirmed the successful formation of ZnO nanoparticles with predominantly spherical morphology and nanoscale particle size. UV–Vis

spectra displayed characteristic absorption peaks corresponding to ZnO nanoparticles, while FTIR analysis indicated the presence of phytochemical functional groups on the nanoparticle surface, likely contributing to stabilization and enhanced adsorption performance. XRD patterns revealed well-defined peaks consistent with the hexagonal wurtzite structure, and SEM imaging demonstrated uniform particle distribution with minimal agglomeration.

Batch adsorption studies indicated a strong pH dependence, with maximum Cr(VI) removal (92%) observed at pH 2, attributed to electrostatic interactions between positively charged nanoparticle surfaces and anionic Cr(VI) species. Kinetic analysis revealed rapid adsorption within the first 60 minutes, followed by a slower approach to equilibrium. Isotherm fitting showed superior correlation with the Langmuir model ($R^2 = 0.987$) compared to the Freundlich model ($R^2 = 0.962$), suggesting monolayer adsorption on a homogeneous surface. The maximum adsorption capacity (q_{max}) was calculated as 48.5 mg/g. These findings are in agreement with prior studies demonstrating the efficacy of plant-mediated ZnO nanoparticles in heavy metal removal, highlighting the critical role of surface functionalization by phytochemicals.

Conclusion

This study demonstrates that *Plantago ovata*-mediated green synthesis is an effective and environmentally sustainable method for producing ZnO nanoparticles with high adsorption capacity for Cr(VI) ions. The nanoparticles exhibited rapid adsorption kinetics, significant removal efficiency under acidic conditions, and monolayer adsorption behavior. These results underscore the potential of bio-synthesized ZnO nanoparticles as promising adsorbents in water treatment applications and contribute to the advancement of green nanotechnology approaches for environmental remediation. The findings provide a basis for future research focusing on scalable synthesis and the treatment of other toxic contaminants in aqueous systems.

Funding

No funding.

مقاله پژوهشی

سنتز سبز نانوذرات ZnO با استفاده از عصاره گیاه اسفرزه (Plantago ovata) و کاربرد آن در حذف کروم از محلول‌های آبی

نسیم ضیایی‌فر

گروه شیمی، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

چکیده

مقدمه: در این تحقیق، نانوذرات اکسید روی (ZnO) به روش سبز با استفاده از عصاره گیاه اسفرزه (Plantago ovata) سنتز شد و برای حذف یون کروم (VI) از محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت.

روش: سنتز با نسبت‌های مختلف عصاره به پیش‌ماده، دما و زمان واکنش مختلف انجام شد. ساختار و مورفولوژی نانوذرات با روش‌های XRD، UV-Vis، SEM، FT-IR بررسی شد. آزمایشات جذب کروم در شرایط مختلف، pH و زمان تماس انجام گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نانوذرات ZnO سنتز شده دارای اندازه متوسط ۲۲ نانومتر و شکل تقریباً کروی با توزیع اندازه یکنواخت و حداقل تجمع می‌باشند. همچنین در $pH = ۲$ بیشترین میزان حذف ۹۲٪ مشاهده گردید. داده‌های جذب به مدل ایزوترم لانگمویر با ضریب همبستگی ۰٫۹۸۷، مطابقت داشت. تحلیل سینتیک نشان داد فرآیند به خوبی با مدل شبه-دوم (pseudo-second order) تطابق دارد. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره اسفرزه گزینه‌ای بالقوه برای تصفیه آب آلوده به کروم هستند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

ZnO، سبز، اسفرزه، حذف کروم، ایزوترم جذب، سینتیک جذب

* نویسنده مسئول: نسیم ضیایی‌فر

نشانی: گروه شیمی، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

تلفن: ۰۹۱۴۴۲۱۱۲۹۷

پست الکترونیکی: nz1659@gmail.com

مقدمه

آلودگی فلزات سنگین یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی در جهان امروز به شمار می‌رود. این فلزات به دلیل پایداری بالا، سمیت زیاد و عدم تجزیه‌پذیری زیستی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده محسوب می‌شوند (۱). در میان آن‌ها، یون کروم شش‌ظرفیتی [Cr(VI)] به دلیل ویژگی‌های سرطان‌زایی، جهش‌زایی و سمیت شدید برای اندام‌های مختلف بدن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲). منابع اصلی ورود کروم (VI) به محیط زیست شامل صنایع آبکاری فلزات، دباغی چرم، تولید رنگدانه‌ها، نساجی و صنایع شیمیایی می‌باشد (۳). از این رو، توسعه روش‌های مؤثر، اقتصادی و زیست‌سازگار برای حذف این آلاینده از محیط‌های آبی امری ضروری است.

در سال‌های اخیر، فناوری نانو به‌ویژه استفاده از نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (۴). در میان آن‌ها، نانوذرات اکسید روی (ZnO) (NPs) به دلیل خواص نوری و الکترونی منحصر به فرد، پایداری حرارتی، زیست‌سازگاری و هزینه‌ی پایین، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های تصفیه آب، حسگرهای زیستی، دارورسانی و فوتوکاتالیز نشان داده‌اند (۵). با این حال، روش‌های شیمیایی متداول سنتز این نانوذرات معمولاً شامل استفاده از حلال‌ها و عوامل کاهنده‌ی سمی هستند که خطرات زیست‌محیطی به همراه دارند (۶).

در پاسخ به این چالش، «سنتز سبز» یا «زیست‌سنتز» نانوذرات به عنوان رویکردی پایدار و دوستدار محیط زیست مطرح شده است. در این روش، از عصاره‌های گیاهی، باکتری‌ها یا جلبک‌ها به‌عنوان عوامل کاهنده و پایدارکننده طبیعی استفاده می‌شود (۸). عصاره‌های گیاهی به دلیل دارا بودن ترکیباتی چون فلاونوئیدها، پلی‌فنول‌ها، آلکالوئیدها و تریپن‌ها، می‌توانند یون‌های فلزی را به نانوذرات پایدار تبدیل کنند (۹).

گیاه اسفرزه (*Plantago ovata*) یکی از گیاهان دارویی بومی ایران است که سرشار از پلی‌ساکاریدها، موسیلاژ، پلی‌فنول‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی می‌باشد (۱۰). وجود این ترکیبات، عصاره‌ی اسفرزه را به گزینه‌ای مناسب برای سنتز سبز نانوذرات اکسید روی تبدیل کرده است. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از عصاره‌های گیاهی مشابه (مانند آلوئه‌ورا، چای سبز و زردچوبه) در سنتز نانوذرات ZnO، منجر به افزایش پایداری ذرات، کاهش اندازه نانو و بهبود کارایی در حذف آلاینده‌ها شده است (۱۱، ۱۲).

مطالعات پیشین نیز کاربرد نانوذرات ZnO در حذف فلزات سنگین به‌ویژه کروم (VI) را گزارش کرده‌اند. برای مثال، Ahmad و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند نانوذرات ZnO سنتز شده با

عصاره‌ی برگ چای سبز توانایی حذف بیش از ۹۰٪ کروم (VI) را از محلول‌های آبی داشتند (۱۳). همچنین، در پژوهش دیگری توسط Ramesh و همکاران (۲۰۲۲)، استفاده از نانوذرات ZnO زیست‌سنتز شده با عصاره‌ی زردچوبه موجب افزایش جذب کروم از فاضلاب صنعتی شد (۱۴). تاکنون، گزارشی جامع از کاربرد عصاره‌ی گیاه اسفرزه در سنتز سبز نانوذرات ZnO و بررسی کارایی آن در حذف کروم (VI) از محلول‌های آبی در دسترس نیست، که می‌تواند وجه تمایز پژوهش حاضر باشد.

بنابراین، هدف از این پژوهش، سنتز سبز نانوذرات اکسید روی با استفاده از عصاره گیاه اسفرزه، تعیین ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی آن، و بررسی کارایی نانوذرات سنتز شده در حذف یون کروم (VI) از محلول‌های آبی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱- مواد اولیه

در این پژوهش از نیتрат روی شش آبه ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) با درجه خلوص تحلیلی (Merck, Germany) به‌عنوان منبع یون روی استفاده شد. برای تهیه محلول‌های کروم، از پتاسیم دی‌کرومات ($K_2Cr_2O_7$, Merck) استفاده گردید. تمامی محلول‌ها با آب مقطر دوبار تقطیر تهیه شدند. پودر خشک گیاه اسفرزه (*Plantago ovata*) از عطاری‌های معتبر شهر مراغه تهیه و قبل از استفاده با آب مقطر شسته و در آون ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

۲- تهیه عصاره گیاه اسفرزه

برای تهیه عصاره آبی، مقدار ۱۰ گرم از پودر خشک اسفرزه در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد هم زده شد. سپس محلول به‌دست‌آمده با کاغذ صافی واتمن شماره ۱ صاف و در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان استفاده نگهداری شد.

۳- سنتز سبز نانوذرات اکسید روی

برای سنتز نانوذرات ZnO، محلول آبی نیترات روی (۰.۰۱ مولار) به‌صورت تدریجی به عصاره گیاه اسفرزه با نسبت حجمی ۱:۲ (V/V) اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با همزن مغناطیسی ۵۰۰ rpm حرارت داده شد تا تغییر رنگ محلول از زرد کم‌رنگ به سفید مایل به خاکستری مشاهده گردد، که نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات است. سپس محلول به‌دست‌آمده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک و رسوب حاصل در کوره در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت کلسینه شد تا نانوذرات ZnO خالص به‌دست آید (۱۵).

۴- مشخصه‌یابی نانوذرات سنتز شده

برای بررسی خواص فیزیکی و ساختاری نانوذرات سنتز شده، آزمون‌های زیر انجام شد:

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis): برای تأیید تشکیل نانوذرات ZnO و تعیین نوار جذب مشخص در محدوده ۳۵۰-۴۰۰ نانومتر.

پراش پرتو ایکس (XRD): برای تعیین ساختار بلوری و اندازه ذرات با استفاده از رابطه شرر (Scherrer equation).

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM): جهت بررسی شکل و اندازه ذرات.

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR): برای شناسایی گروه‌های عاملی موجود در سطح نانوذرات و ترکیبات زیستی دخیل در فرآیند سنتز.

۵- تهیه محلول‌های آزمایشی کروم (VI)

محلول‌های استاندارد کروم (VI) با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر از محلول اصلی پتاسیم دی‌کرومات تهیه شدند. pH محلول‌ها با استفاده از محلول‌های NaOH و HCl ۰.۱ مولار در محدوده ۲ تا ۱۰ تنظیم گردید.

۶- آزمون حذف کروم (VI) توسط نانوذرات ZnO

برای بررسی کارایی نانوذرات سنتز شده در حذف کروم (VI)، مقدار ۰.۰۵ گرم از نانوذرات ZnO در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول کروم با غلظت مشخص ریخته شد و نمونه‌ها در دمای اتاق در شیکر با سرعت ۱۵۰ rpm و در زمان‌های تماس مختلف (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ دقیقه) قرار داده شدند. پس از هر زمان، محلول‌ها سانتریفیوژ و غلظت باقیمانده Cr(VI) با استفاده از اسپکتروفتومتر

در طول موج ۵۴۰ نانومتر (روش دی‌فنیل کربازید) اندازه‌گیری شد (۱۶).

درصد حذف فلز از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Removal\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

C_0 و C_t به‌ترتیب غلظت اولیه و نهایی کروم (VI) (میلی‌گرم در لیتر) هستند.

۷- بررسی اثر پارامترهای مؤثر

تأثیر پارامترهایی نظیر pH محلول و زمان تماس بر درصد حذف فلز بررسی گردید. همچنین، ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ برای تعیین ظرفیت جذب سطحی نانوذرات مورد استفاده قرار گرفتند.

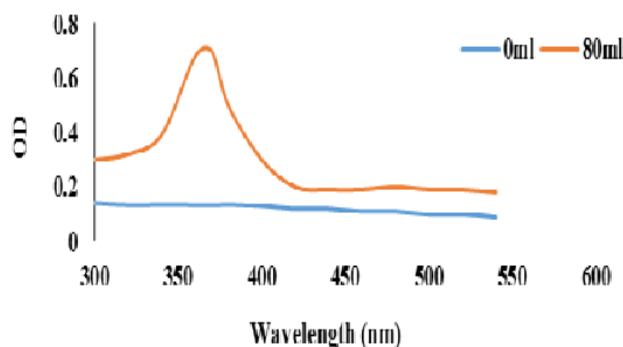
نتایج و بحث

۱- مشاهده‌ی اولیه و تغییر رنگ محلول

در حین سنتز نانوذرات ZnO با عصاره اسفرزه، تغییر رنگ محلول از زرد کم‌رنگ به سفید مایل به خاکستری مشاهده شد که نشانه‌ی کاهش یون‌های Zn^{2+} تشکیل نانوذرات ZnO است. این تغییر رنگ ناشی از برهم‌کنش ترکیبات زیستی مانند پلی‌فنول‌ها و موسیلاژ موجود در عصاره با یون‌های فلزی می‌باشد که به‌عنوان عامل کاهنده و پایدارکننده عمل می‌کنند.

۲- طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)

شکل ۱ طیف جذب نوری نانوذرات ZnO سنتز شده را در محدوده‌ی ۲۰۰-۶۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. قله‌ی مشخص جذب در حدود ۳۶۸ نانومتر مشاهده شد که مربوط به برانگیزش پلاسمون سطحی نانوذرات ZnO است. این مقدار با نتایج گزارش شده برای نانوذرات سنتز سبز ZnO توسط عصاره‌های گیاهی دیگر مانند زردچوبه و چای سبز هم‌خوانی دارد.

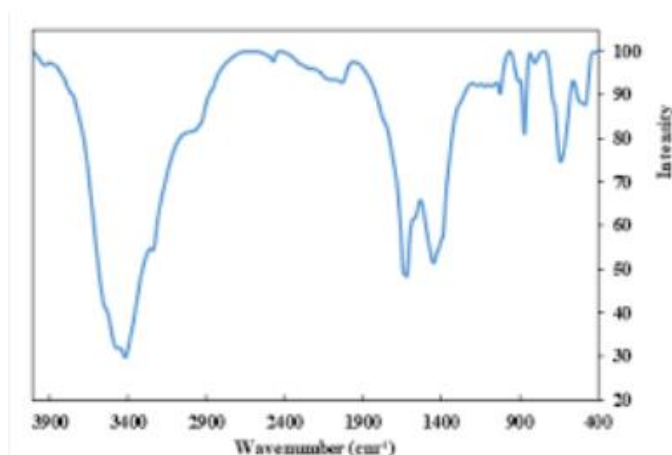


شکل ۱- طیف جذب نوری (UV-Vis) نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره اسفرزه

موسیلاژ اسفرزه است. باندهای در 1630 cm^{-1} مربوط به گروه‌های C=O و C=C در ترکیبات آلی عصاره می‌باشند. پیک مشخص در حدود 480 cm^{-1} بیانگر ارتعاش کششی پیوند Zn-O و تأیید تشکیل نانوذرات ZnO است.

۳- طیف مادون قرمز (FTIR)

شکل ۲ طیف FTIR نانوذرات ZnO را در بازه‌ی ۴۰۰-۴۰۰۰ cm^{-1} نشان می‌دهد. نوار پهن در محدوده‌ی 3400 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های O-H ناشی از ترکیبات پلی‌فنولی و

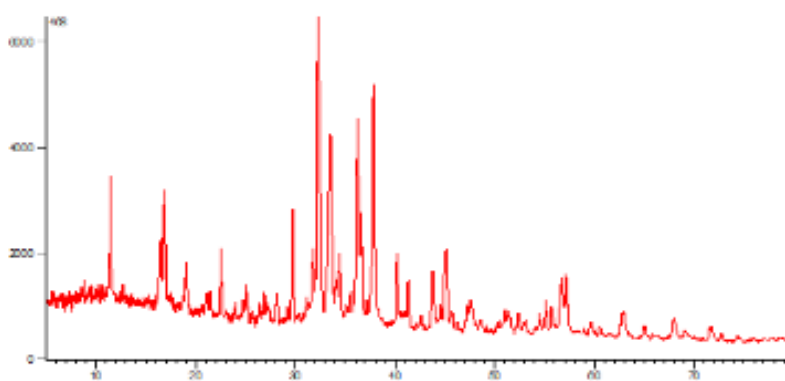


شکل ۲- طیف FTIR نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره گیاه اسفرزه

(۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۱۱۲) مربوط به ساختار ورتزیت (wurtzite) نانوذرات ZnO مطابقت دارد. اندازه بلور با استفاده از معادله‌ی شرر محاسبه و حدود ۲۲ نانومتر برآورد شد.

۴- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)

الگوی XRD شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی پیک‌های تیز و مشخص در زاویه‌های $2\theta = 31.8^\circ, 34.5^\circ, 36.6^\circ, 47.6^\circ$ است که به ترتیب با صفحات بلوری $56.6^\circ, 62.8^\circ$ و 68.1° مرتبط است.

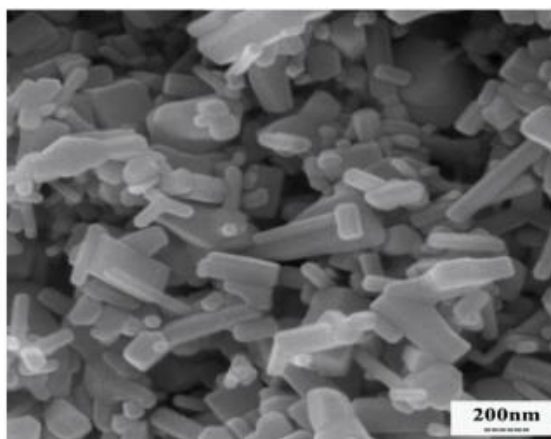


شکل ۳- الگوی XRD نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره اسفرزه

شکل تقریباً کروی با توزیع اندازه یکنواخت و حداقل تجمع هستند. اندازه‌ی ذرات در محدوده‌ی ۲۰ تا ۴۰ نانومتر برآورد شد.

۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

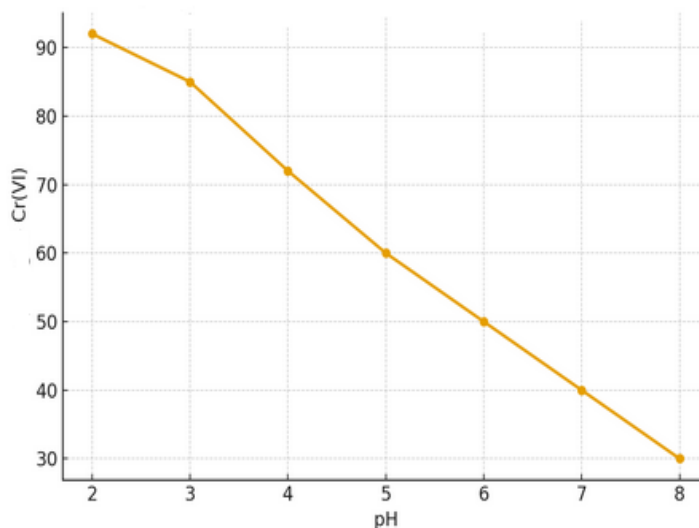
تصاویر SEM شکل ۴ نشان داد که نانوذرات ZnO حاصل دارای



شکل ۴- تصویر SEM نانوذرات ZnO سنتز شده

۶- بررسی اثر pH بر حذف کروم (VI)

تأثیر pH بر کارایی حذف فلز کروم (VI) در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش pH از ۲ تا ۸، درصد حذف به طور قابل توجهی کاهش یافت. در pH برابر با ۲، بیشترین میزان حذف

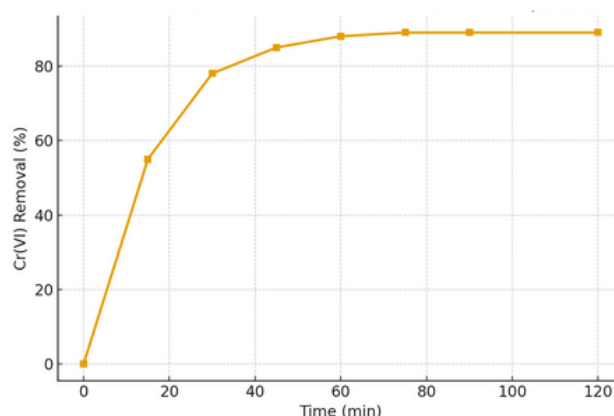


شکل ۵- اثر pH بر درصد حذف کروم (VI) توسط نانوذرات ZnO

۷- بررسی اثر زمان تماس

اثر زمان تماس بر حذف کروم (VI) در شکل ۶ آورده شده است. در ۳۰ دقیقه نخست، افزایش سریع در درصد حذف مشاهده شد که ناشی از دسترسی زیاد سایت‌های جذب سطحی بود. پس از

۹۰ دقیقه، سیستم به حالت تعادل رسید و درصد حذف تقریباً ثابت باقی ماند (۸۹٪). این رفتار با مدل شبه مرتبه دوم (pseudo-second order) مطابقت دارد (۱۸).

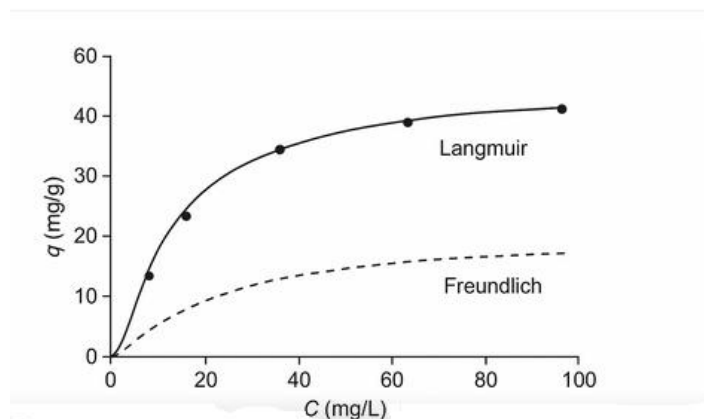


شکل ۶- تغییرات درصد حذف کروم (VI) در زمان‌های مختلف تماس

۸- ایزوترم‌های جذب

داده‌های جذب تعادلی در مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ برازش شدند (شکل ۷). ضرایب تعیین (R^2) برای مدل لانگمویر (۰,۹۸۷) و فروندلیچ (۰,۹۶۲) محاسبه شد که نشان‌دهنده انطباق بهتر مدل لانگمویر است.

ظرفیت جذب ماکزیمم (q_{max}) برابر با ۴۸,۰۵ mg/g تعیین گردید. مطالعات مشابه با نانوذرات زیستی ZnO سنتز شده با عصاره‌های گیاهی دیگر نیز ظرفیت‌های مشابهی گزارش کرده‌اند (۱۹).



شکل ۷- ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ برای حذف Cr(VI) با نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره اسفرزه

نتیجه‌گیری

کارایی مطلوبی دارد. روش سنتز سبز با عصاره اسفرزه ساده، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست است و نانوذرات حاصل می‌توانند به‌عنوان جاذب مؤثر در تصفیه پساب‌های صنعتی آلوده به کروم (VI) و سایر فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

اجرای تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسنده مقاله تامین شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

سنتز سبز نانوذرات ZnO با عصاره گیاه اسفرزه روشی پایدار، مؤثر و عملیاتی برای حذف فلزات سنگین از آب است. نتایج این مطالعه پایه‌ای علمی برای کاربردهای صنعتی و محیط‌زیستی فراهم می‌کند. عصاره اسفرزه به‌عنوان عامل کاهنده و پایدارکننده طبیعی عمل کرده و نانوذرات ZnO با اندازه ۲۲-۲۴ نانومتر، شکل کروی یکنواخت و ساختار وورتزیت با خلوص بالا تولید شد. کاهش کارایی حذف با افزایش pH و افزایش آن با افزایش زمان تماس تا رسیدن به تعادل، با مکانیزم جذب فیزیکی-شیمیایی و اشباع سایت‌های فعال سازگار بود. برآزش داده‌ها با مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ نشان داد که جذب بیشتر از نوع تک‌لایه‌ای است و ظرفیت جذب ماکزیمم (q_{max}) برابر با ۴۸۰۵ mg/g است، که در مقایسه با سایر نانوذرات سنتز سبز مشابه،

References

1. Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*. 2012;101:133–164. doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6
2. Costa M, Klein CB. Toxicity and carcinogenicity of chromium compounds in humans. *Crit Rev Toxicol*. 2006;36(2):155–163. doi:10.1080/10408440500534032
3. Rai PK, Lee SS, Zhang M, Tsang YF, Kim KH. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environ Int*. 2019;125:365–385. doi:10.1016/j.envint.2019.01.067
4. Singh J, Dutta T, Kim KH, Rawat M, Samddar P, Kumar P. Green synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *J Nanobiotechnol*. 2018;16:84. doi:10.1186/s12951-018-0408-4
5. Kołodziejczak-Radzimska A, Jesionowski T. Zinc oxide—from synthesis to application: a review. *Materials*. 2014;7(4):2833–2881. doi:10.3390/ma7042833
6. Bhowmik T, et al. ZnO nanoparticles as photocatalysts: Synthesis, mechanisms, and applications. *RSC Adv*. 2021;11:5105–5129. doi:10.1039/D0RA09215E
7. Irvani S. Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chem*. 2011;13:2638–2650. doi:10.1039/C1GC15386B
8. Ahmed S, Saifullah, Ahmad M, Swami BL, Ikram S. Green synthesis of silver nanoparticles using *Azadirachta indica* aqueous leaf extract. *J Radiat Res Appl Sci*. 2016;9(1):1–7. doi:10.1016/j.jrras.2015.06.006
9. Ramesh M, Anbuvaran M, Viruthagiri G. Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Solanum nigrum* leaf extract and their antibacterial activity. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*. 2015;136:864–870. doi:10.1016/j.saa.2014.09.105
10. Goyal A, Sharma V, Sihag M, Tomar SK, Arora S, Sabikhi L. *Plantago ovata* (Psyllium): A functional food ingredient. *J Food Sci Technol*. 2014;51(12):3494–3506. doi:10.1007/s13197-012-0919-0

11. Ahmad N, Sharma S, Alam MK, Singh VN, Shamsi SF, Mehta BR, Fatma A. Rapid synthesis of silver nanoparticles using dried medicinal plant of *Basil*. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2010;81(1):81–86. doi:10.1016/j.colsurfb.2010.06.029
12. Ramesh M, Nisha R, Meenakshi Sundaram R. Biosynthesis of ZnO nanoparticles using turmeric extract and their removal efficiency for heavy metals. *J Environ Chem Eng*. 2022;10(1):107114. doi:10.1016/j.jece.2021.107114
13. Ahmad A, Wei Y, Zhang X. Removal of hexavalent chromium using green-synthesized ZnO nanoparticles: a comparative study. *Chemosphere*. 2021;268:129294. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.129294
14. Ramesh S, Deepa P, Anitha P. Phytosynthesis of ZnO nanoparticles using *Curcuma longa* and their application in Cr(VI) removal. *Environ Nanotechnol Monit Manag*. 2022;18:100721. doi:10.1016/j.enmm.2022.100721
15. Kołodziejczak-Radzimska A, Jesionowski T. Zinc oxide—from synthesis to application: a review. *Materials*. 2014;7(4):2833–2881. doi:10.3390/ma7042833
16. Ahmad A, Wei Y, Zhang X. Removal of hexavalent chromium using green-synthesized ZnO nanoparticles: a comparative study. *Chemosphere*. 2021;268:129294. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.129294
17. Fang, H., et al. "Efficient removal of Cr(VI) from wastewater by ZnO nanoparticles." *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 18, no. 6, 2011, pp. 1012–1019. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0427-0>
18. Singh, S., et al. "Sustainable removal of Cr(VI) using graphene oxide-zinc oxide nanohybrid: Adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamics." *Science of the Total Environment*, vol. 788, 2021, p. 147826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147826>
19. Wenjie, O., et al. "The Adsorption Potential of Cr from Water by ZnO Nanoparticles." *Bioinorganic Chemistry and Applications*, vol. 2022, Article ID 6209013, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6209013>