



Publisher: Soil and Water Research Institute of Iran

Journal of Land Management

<https://lmj.areeo.ac.ir>

Production and characterization of morphological and moisture properties of nanosilica from rice husk: A step toward clean technologies in land management

Parhizkar, M. *  and Izadpanah Nashroudkoli, M.

Assistant Prof.; Rice Research Institute of Iran; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Rasht; Iran. Misagh.parhizkar@gmail.com

Faculty of Agriculture, University of Guilan, Iran. Izadpanahs@yahoo.com

Article Info

Article Type: Research Article

Received: November 01, 2025

Accepted: June 28, 2026

Keywords: Nanoparticle size, Soil amendment, Active surface, Land management, Synthesis efficiency

Corresponding author's email address:

Misagh.parhizkar@gmail.com

Extended Abstract

Objectives

This study was conducted to address the growing need for sustainable utilization of agricultural waste and the development of environmentally friendly nanomaterials for land management applications. The primary objectives included: 1) extraction and synthesis of silica nanoparticles from the abundantly available rice husk, as an agricultural by-product, using a controlled acid-leaching and calcination process, 2) characterization of the morphological, structural, and moisture properties of the nanosilica thus produced using advanced analytical techniques including Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and field emission scanning electron microscopy (FESEM), 3) evaluation of the quality, structural stability, and physicochemical characteristics of rice husk-derived nanosilica and assesemt of its potential for application as a sustainable material in soil improvement, land management, and environmental technologies.

Material and Methods

The study was carried out using rice husk as the primary raw material collected from the Rice Research Institute of Iran. Prior to processing, the rice husk samples were washed thoroughly with distilled water and dried at ambient temperature. The dried samples were then subjected to acid leaching using a 10% HCl solution under continuous heating for two hours to remove metallic impurities. After repeated washing and drying at 100°C for 24 hours, the treated samples were calcined at 700°C for two hours to obtain silica-rich ash. Subsequently, the silica powder thus obtained was treated with 0.5 N potassium nitrate solution under continuous stirring for one hour to induce partial crystallization. The resulting material was filtered, dried at 105°C for four hours, and finally calcined at 800°C for eight hours to produce porous semi-crystalline silica nanoparticles.

The structural properties of the synthesized nanosilica were characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to identify functional groups and confirm the silica bonding structures. Morphological characteristics and particle size distribution were determined using field emission scanning electron microscopy (FESEM) at a magnification of 200 kx. Particle dimensions and shape factors were determined using the ImageJ software. Specific surface area was estimated based on geometric relationships between particle diameter and density. Moisture content was determined using the oven-drying method. Production yield was calculated as the ratio of final nanosilica mass to that of initial rice husk ash. Statistical measures, including mean, standard deviation, coefficient of variation, skewness, and frequency distribution, were calculated using XLSTAT software to evaluate data consistency and reproducibility.

Results

The FTIR analysis confirmed the successful synthesis of silica nanoparticles through identification of characteristic absorption bands corresponding to Si–O–Si and Si–OH functional groups. A strong absorption peak observed at 1017 cm^{-1} represented the

asymmetric stretching vibration of Si–O–Si bonds while that near 808 cm^{-1} corresponded to the symmetric stretching vibration of the siloxane framework. Moreover, a broad absorption band around 3400 cm^{-1} indicated the presence of surface hydroxyl groups and the water molecules adsorbed, confirming the hydrophilic nature and high surface activity of the synthesized nanosilica.

FESEM images revealed that the silica nanoparticles exhibited a nearly spherical morphology with a highly uniform particle distribution and minimal aggregation. Particle sizes ranged from 8 to 24 nm, with an average particle diameter of 15.56 nm. The observed morphology confirmed the successful conversion of rice husk into highly pure nanosilica with a homogeneous porous structure. Statistical analysis demonstrated a low standard deviation (2.96 nm) and a coefficient of variation of 0.194, indicating high reproducibility and uniformity of the synthesis process.

The estimated specific surface area of the synthesized nanosilica was approximately $178.5\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$, reflecting the presence of a highly porous nanostructure with abundant active surface sites. The calculated particle shape factor was 0.95, indicating a highly spherical morphology and excellent geometric uniformity. Moisture analysis showed an average moisture content of 1.84%, with a standard deviation of 0.09 and a coefficient of variation of 4.9%, confirming the stability and consistency of the nanoparticles produced. Furthermore, the production process yielded approximately 70 g of nanosilica from 200 g of dried rice husk, corresponding to a production efficiency of approximately 35%.

Conclusion

This study demonstrated the successful production of high-quality silica nanoparticles from rice husk through a controlled acid-leaching and thermal treatment process. The synthesized nanosilica exhibited desirable physicochemical characteristics, including an amorphous to semi-crystalline structure, spherical morphology, narrow particle size distribution, high specific surface area, and low moisture content. The presence of active Si–OH functional groups and the high surface area indicate significant potential for adsorption, ion exchange, and environmental applications.

The findings revealed that the combined acid treatment and controlled calcination at 800°C represent an efficient and sustainable approach for producing high-purity nanosilica from agricultural waste materials. The nanoparticles thus obtained exhibited excellent structural stability, high surface activity, and favorable morphological characteristics that make them a suitable candidate for soil amendment, environmental remediation, nutrient management, and sustainable land management applications.

In addition to providing an environmentally friendly strategy for agricultural waste recycling, this study contributes to the advancement of green nanotechnology and circular economy principles. Nevertheless, further investigations are recommended to evaluate the long-term behavior, environmental interactions, and biological impacts of rice husk-derived nanosilica in soil-plant systems under field conditions. Overall, the present research demonstrates that rice husk-derived nanosilica enjoys a substantial potential as a multifunctional nanomaterial for sustainable agriculture, environmental protection, and clean technology development.

Cite this Article: Parhizkar, M. and Izadpanah Nashroudkoli, M., 2026. Production and characterization of morphological and moisture properties of nanosilica from rice husk: A step toward clean technologies in land management. *Journal of Land Management*, 14(1), pp.43-54.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.371228.398>



تولید و شناسایی ویژگی‌های مورفولوژی و رطوبتی نانوسیلیس حاصل از پوسته برنج: گامی به سوی فناوری‌های پاک در مدیریت اراضی

میثاق پرهیزکار*  و معصومه ایزدپناه نشرودکلی

استادیار سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران. Misagh.parhizkar@gmail.com

دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک - فیزیک خاک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، ایران. Izadpanahs@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	پوسته برنج به عنوان یکی از پسماندهای فراوان کشاورزی در کشورهای تولیدکننده برنج، حاوی مقادیر قابل توجهی سیلیس است که در صورت فرآوری مناسب می‌تواند به منبعی ارزشمند برای تولید نانوذرات سیلیس تبدیل شود. ضرورت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که استفاده از منابع زیستی ارزان و در دسترس، علاوه بر کاهش آلودگی محیط‌زیستی ناشی از دفع پسماندهای کشاورزی، می‌تواند در توسعه فناوری‌های سبز و مدیریت پایدار اراضی نقش مهمی ایفا کند. هدف مطالعه حاضر، استخراج و شناسایی نانوذرات سیلیس از پوسته برنج و بررسی ویژگی‌های آن‌ها و محتوای رطوبت این ذرات بود. تحلیل آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) وجود باندهای مشخصه Si-OH و Si-O-Si را نشان داد که بیانگر ساختار ساختار کم‌بلوری و سطح فعال بالای نانوذرات بود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) ریخت‌شناسی یکنواخت و کروی ذرات در محدوده ۸ تا ۲۴ نانومتر با میانگین اندازه ذرات ۱۵/۵۶ نانومتر را تأیید کردند. سطح ویژه نانوذرات برابر با ۱۷۸/۵ مترمربع بر گرم، رطوبت ۱/۸۴ درصد و بازده تولید حدود ۳۵ درصد محاسبه شد. نتایج نشان داد روش مورد استفاده با کنترل شرایط اسیدشویی و کلسیناسیون قادر است نانوذراتی با خلوص بالا، سطح‌ویژه زیاد و پایداری ساختاری مطلوب تولید کند.
دریافت: ۱۴۰۴/۸/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۷	
واژه‌های کلیدی: اندازه ذرات نانو، اصلاح خاک، سطح فعال، مدیریت اراضی، بازده سنتز	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Misagh.parhizkar@gmail.com	

استناد: پرهیزکار، میثاق و ایزدپناه نشرودکلی، معصومه، ۱۴۰۵. تولید و شناسایی ویژگی‌های مورفولوژی و رطوبتی نانوسیلیس حاصل از پوسته برنج: گامی به سوی فناوری‌های پاک در مدیریت اراضی. نشریه مدیریت اراضی، ۱۴(۱)، صص. ۴۳-۵۴.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.371228.398>

مقدمه

پوسته برنج، یک محصول جانبی اصلی برنج، تقریباً ۲۰ درصد از کل تولید برنج را تشکیل می‌دهد (Dien et al., 2022) و اغلب کمتر از حد مورد استفاده قرار می‌گیرد که منجر به نگرانی‌های قابل توجهی در مورد مدیریت پسماند می‌شود. محتوای بالای سیلیس (معمولاً ۱۵ تا ۲۲ درصد وزنی)، آن‌ها را به یک پیش‌ساز ایده‌آل برای سنتز پایدار ذرات سیلیس در بعد نانو از طریق فرآیندهای پیرولیز کنترل‌شده و استخراج شیمیایی تبدیل می‌کند. نانو ذرات سیلیس استخراج‌شده از پوسته برنج دارای خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی از جمله سطح‌ویژه بالا، ساختار آمورف و گروه‌های سیلانول سطحی است که تعاملات قوی با کلوئیدهای خاک و ریشه‌های گیاه را تقویت می‌کند. این خواص، نانو ذرات سیلیس را قادر می‌سازد تا به عنوان یک اصلاح‌کننده چند منظوره خاک عمل کند که قادر به افزایش مقاومت مکانیکی خاک (Thapa and Ghani, 2025) و تسهیل‌کننده جذب مواد مغذی گیاه (Siddiqi et al., 2025) است. علاوه بر این، بازیافت پسماندهای کشاورزی به نانو مواد کاربردی، با اصول اقتصاد زیستی همسو است، آلودگی محیط‌زیست را کاهش می‌دهد و از استفاده پایدار از منابع پشتیبانی می‌کند.

نانو ذرات از طریق مکانیسم‌های مولکولی (Francis et al., 2024) و مسیرهای متعدد، از جمله جذب سطحی، تبادل یونی و اصلاح محیط ریزوسفر، با سامانه‌های خاک-گیاه تعامل دارند. ابعاد نانومقیاس سیلیس به آن اجازه می‌دهد تا به منافذ خاک نفوذ کرده و پیوندهای بین ذرات تثبیت‌کننده‌ای تشکیل دهد که می‌تواند ظرفیت جدا شدن خاک را کاهش داده و انسجام خاک را افزایش دهد (Gu et al., 2022). به موازات آن، نانو ذرات سیلیس ممکن است با تعدیل مسیرهای هورمونی، طولیل شدن سیستم ریشه را تحریک کنند (Miao et al., 2025). بهبود ویژگی‌های ریشه، به نوبه خود، کارایی بیشتر جذب عناصر غذایی و آب را افزایش می‌دهد و به افزایش عملکرد محصول کمک می‌کند. با این حال، این فرآیندها تا حد

زیادی وابسته به شرایط تولید و خصوصیات نانو ذرات سیلیس تولیدشده هستند؛ بنابراین، درک دقیق از خصوصیات نانو ذرات سیلیس تولید شده برای پذیرش گسترده‌تر آن در کشاورزی بسیار مهم است.

علاوه بر این، سنتز نانو سیلیکا از پوسته برنج، یک رویکرد پایدار زیست‌محیطی است که می‌تواند به کاهش چالش‌های اقلیمی و مدیریت پسماند کمک کند (Joshi et al., 2023). با تبدیل پسماندهای کشاورزی به نانو مواد، این فرآیند نه تنها انتشار کربن ناشی از سوزاندن در فضای باز را کاهش می‌دهد، بلکه منبعی تجدیدپذیر از سیلیس زیستی برای سلامت خاک فراهم می‌کند (Schaller et al., 2025). پیشرفت‌های اخیر در توصیف نانو ذرات سیلیس با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ، میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی و شاخص‌های مورفولوژیکی سطح، امکان تنظیم خواص مواد را برای کاربردهای خاکی فراهم کرده است. این پیشرفت‌ها از این فرضیه پشتیبانی می‌کنند که این نانو ذرات، هنگامی که به درستی سنتز و استفاده شود، می‌تواند هم‌زمان پایداری ساختمان خاک و جذب مواد مغذی گیاه را افزایش دهد (Zhang et al., 2024).

با وجود مطالعات متعدد درباره استخراج نانو ذرات سیلیس از منابع مختلف، هنوز درک عمیقی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس‌های زیستی به‌ویژه آن‌هایی که از پسماندهای کشاورزی تولید می‌شوند، وجود ندارد. به کارگیری پوسته برنج به عنوان منبعی غنی از سیلیس، می‌تواند ضمن کاهش ضایعات زیست‌محیطی، منجر به تولید ماده‌ای با کارایی بالا در جذب عناصر غذایی، بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش دسترسی گیاه به عناصر ضروری در مقیاس نانو گردد (Yuan et al., 2024). بررسی دقیق ساختار، اندازه و سطح‌ویژه نانو سیلیس، امکان تفسیر بهتر روابط بین ریخت‌شناسی ذرات و عملکرد آن در محیط‌های خاکی را فراهم می‌کند. این دانش می‌تواند به توسعه‌ی مواد نانویی پایدار برای مدیریت خاک و زمین منجر شود.

مواد و روش

مواد اولیه و مراحل تولید نانو ذرات سیلیس

در ابتدا پوسته برنج مورد استفاده از موسسه تحقیقات برنج کشور تهیه، جمع‌آوری و قبل از مصرف با آب مقطر شسته و در دمای محیط خشک شد (Sharma et al., 2019). پوسته‌ها در محلول ۱۰ درصد وزنی HCl به مدت دو ساعت روی هیتز و زیر هود آزمایشگاهی جوشانده شدند. سپس این پوسته‌ها با آب مقطر شستشو شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. در ادامه، پوسته‌های شلتوک برنج خشک‌شده به مدت دو ساعت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی-گراد در کوره سوزانده شده و ذرات سیلیس به صورت پودر سفیدرنگ حاصل شد (Wang et al., 2012). در ادامه نانو سیلیس تولیدشده با محلول نیترات پتاسیم ۰/۵ نرمال برای کریستاله شدن به مدت یک ساعت هم زده شد. نمونه با استفاده از کاغذ صافی فیلترشد و پودر باقی مانده به مدت چهار ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد. در انتها نمونه خشک شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۸ ساعت در کوره قرار داده شد تا نانو سیلیس متخلخل نیمه کریستاله ساخته شود (شکل ۱).

در این راستا، شناسایی ویژگی‌های کلیدی نانو سیلیس از جمله اندازه، کرویت و سطح ویژه، برای ارزیابی کیفیت و کارایی آن ضروری است (Hossain et al., 2018). ویژگی‌های فیزیکی مانند ضریب شکل می‌توانند درک دقیقی از پایداری و رفتار پراکنشی نانو ذرات فراهم آورند. علاوه بر این، بررسی ساختار شیمیایی از طریق طیف‌سنجی به شناسایی گروه‌های فعال سطحی و ارزیابی آمورف بودن سیلیکا کمک می‌کند (Ellerbrock et al., 2022). ترکیب داده‌های مورفولوژیکی و طیفی، چارچوبی جامع برای تحلیل رفتار نانو سیلیس در محیط‌های کاربردی فراهم می‌سازد.

این پژوهش با هدف استخراج، سنتز و شناسایی نانو سیلیس حاصل از پوسته برنج و بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی، ساختاری و رطوبتی آن انجام شد. در این راستا، تلاش شد تا با به‌کارگیری فرآیندهای کنترل‌شده اسیدشویی و کلسیناسیون، نانو ذراتی با خلوص بالا، سطح ویژه زیاد و پایداری مطلوب تولید شود. همچنین بررسی ارتباط میان ساختار فیزیکی و ویژگی‌های سطحی نانو سیلیس به منظور ارزیابی قابلیت آن در بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک و افزایش کارایی زیست‌محیطی از دیگر اهداف این پژوهش بود.



شکل ۱- مراحل تولید نانو ذرات سیلیس از پوسته برنج

Figure 1 – Steps for producing silica nanoparticles from rice husks

روش‌های شناسایی و آنالیز

پس از تولید پودر نانو سیلیس، از طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) برای بررسی و شناسایی گروه‌های عاملی، ساختار شیمیایی و تأیید پیوند Si-O-Si نانو سیلیکای استخراج‌شده و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) برای تعیین ریخت‌شناسی سطح و اندازه نانو ذرات سنتز شده استفاده شد. تصاویر در بزرگنمایی (200 kx) تهیه و اندازه‌ی ذرات با استفاده از نرم‌افزار ImageJ محاسبه شد. علاوه بر این، میزان رطوبت نانو سیلیس با استفاده از روش آون تعیین شد (Le et al., 2013).

محاسبه بازده نانو سیلیس تولیدشده

بازده پودر نانو سیلیس استخراج‌شده از پوسته برنج با وزن کردن پودر نانو سیلیس به‌دست‌آمده بر وزن خاکستر پوسته برنج مورد استفاده، مطابق معادله (۱) (Dzulhijjah et al., 2025) محاسبه شد:

$$\text{Yield}(\%) = \frac{W_n(\text{gr})}{W_r(\text{gr})} \times 100 \quad (1)$$

W_n : وزن نانو سیلیس تولیدشده؛ W_r : وزن خاکستر پوسته برنج مورد استفاده است.

تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، داده‌های حاصل از آزمون‌های طیف‌سنجی (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) و سطح ویژه که به‌عنوان یک پارامتر هندسی، از میانگین قطر ذرات به‌دست‌آمده توسط FESEM و چگالی ذرات تخمین زده شد (Salem and Chilingarian, 1999)، مورد تجزیه و تحلیل آماری دقیق قرار گرفتند. روش محاسبه سطح ویژه بر مبنای روابط هندسی بین اندازه ذرات و مساحت سطحی آن‌ها بوده و برای برآورد سطح ویژه نانو ذرات کروی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل سطح ویژه، این پارامتر به‌عنوان شاخصی از میزان سطح در دسترس ذرات برای برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی تفسیر شد؛ به‌گونه‌ای که

افزایش سطح ویژه بیانگر افزایش نسبت سطح به حجم و قابلیت بالقوه بیشتر برای جذب و واکنش‌های سطحی است. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT انجام شد و شاخص‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و چولگی برای سنجش یکنواختی و تکرارپذیری نتایج محاسبه گردید. توزیع اندازه ذرات بر اساس داده‌های استخراج‌شده از تصاویر FESEM با استفاده از نرم‌افزار ImageJ مورد ارزیابی قرار گرفت تا شکل و یکنواختی نمونه‌ها مشخص شود. علاوه بر این، فاکتور شکل ذرات بر اساس اندازه‌گیری پارامترهای هندسی استخراج‌شده از تصاویر FESEM در نرم‌افزار ImageJ محاسبه شد. این شاخص برای ارزیابی میزان کرویت و یکنواختی مورفولوژیکی ذرات به کار رفت، به‌طوری‌که مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده ذرات با شکل تقریباً کروی و توزیع هندسی یکنواخت هستند (Parhizkar, 2025). داده‌های به‌دست‌آمده در قالب نمودارهای توزیع فراوانی و منحنی‌های نرمال ارائه گردیدند تا دقت فرآیند استخراج و کنترل کیفیت نانو سیلیس تولیدی ارزیابی شود.

نتایج

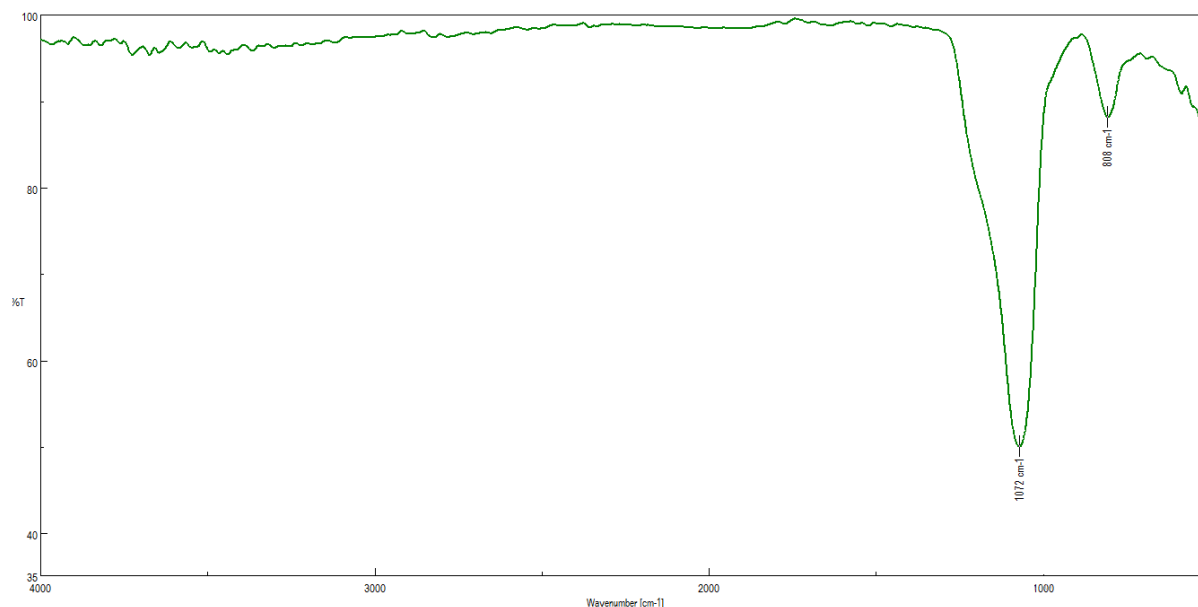
آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ برای نانو ذرات سیلیس

استخراج‌شده از پوسته برنج

آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ برای نانو ذرات سیلیس به‌دست‌آمده از پوسته برنج، ویژگی‌های ارتعاشی مشخصه مرتبط با ساختارهای سیلوکسان و سیلانول را نشان داد که تبدیل موفقیت‌آمیز سیلیس به شکل نانومقیاس آن را تأیید می‌کند (شکل ۲). یک باند جذب غالب و تیز مشاهده‌شده در 1017 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی نامتقارن پیوندهای Si-O-Si است که اثر انگشت متمایزی از شبکه سیلیس با ساختار کم‌بلوری است (Ellerbrock et al., 2022; Parhizkar, 2025). دومین باند تیز که در نزدیکی 808 cm^{-1} ظاهر می‌شود، به حالت کششی متقارن Si-O-Si نسبت داده می‌شود (Zhuravlev, 2000) که نشان‌دهنده چارچوب سیلوکسان به‌خوبی توسعه یافته معمول سیلیس غیربلوری است. باند ضعیف و پهن

واکنش پذیری، رفتار پخش شدگی و برهمکنش بالقوه آن با کلوئیدهای خاک ایفا می‌کند. ویژگی جذب جزئی شناسایی شده در نزدیکی 1630 cm^{-1} با ارتعاش خمشی آب مولکولی مطابقت دارد و وجود گروه‌های هیدروکسیل سطحی باقیمانده را بیشتر تأیید می‌کند (شکل ۲).

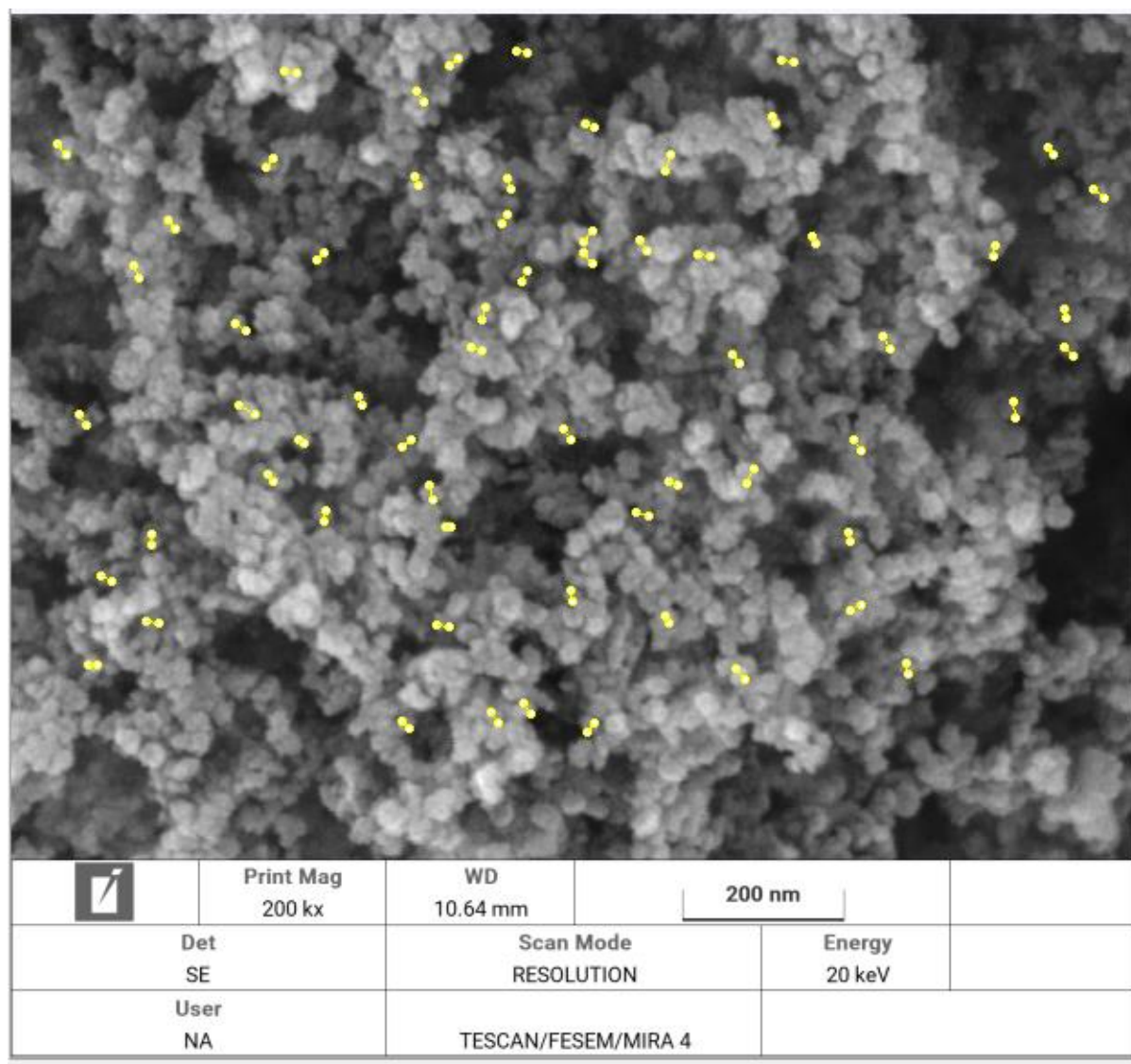
در ناحیه عدد موج بالاتر (حدود 3400 cm^{-1}) را می‌توان به ارتعاشات کششی O-H مولکول‌های آب جذب شده و گروه‌های سیلانول سطحی (Si-OH) نسبت داد (Zhuravlev, 2000). وقوع این باند، ماهیت آبدوست سطح نانو سیلیکا را نشان می‌دهد که نقش مهمی در



شکل ۲- آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرو سرخ برای تشخیص نانوذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج
Figure 2- Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy analysis for identifying silica nanoparticles extracted from rice husk

مطابقت دارد. این ریخت‌شناسی ریز نشان‌دهنده تبدیل موفقیت‌آمیز پیش‌ساز به نانو ذرات سیلیس با خلوص بالا و بافت یکنواخت است. وجود وجوه ساختار کم‌بلوری تیز در تصاویر FESEM، ماهیت آمورف ماده سنتز شده را بیشتر تأیید می‌کند. علاوه بر این، یکنواختی ریزساختاری و هندسه کروی صاف، نشان‌دهنده مساحت سطح‌ویژه بزرگ و فعالیت سطحی افزایش یافته است که برای جذب، کاتالیز و کاربردهای مرتبط با خاک و گیاه مفید هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روش آماده‌سازی و استخراج ذرات سیلیس در بعد نانو با کیفیت بالا، توزیع اندازه نسبتاً یکنواخت و همگنی مورفولوژیکی مطلوب تولید کرده است که آن را برای کاربردهای زیست‌محیطی مناسب می‌سازد.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی برای نانو ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی نشان داد که ذرات نانو سیلیس استخراج شده از پوسته برنج تقریباً کروی و به‌طور یکنواخت توزیع شده‌اند و اندازه ذرات تقریباً از ۸ تا ۲۴ نانومتر متغیر است (شکل ۳). تصویر میکروسکوپی، ریخت‌شناسی سطح صاف با حداقل تجمع را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده کنترل مؤثر در طول فرآیند استخراج است. بزرگنمایی بالا ($200\times$) تأیید کرد که ذرات به‌خوبی از هم جدا شده‌اند و یک ساختار متخلخل و همگنی در مقیاس نانو تشکیل داده‌اند. میانگین اندازه ذرات محاسبه شده از اندازه‌گیری‌های متعدد حدود $15/56$ نانومتر بود که با محدوده نانومقیاس مشاهده شده به تشریح بصری



شکل ۳- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی برای تعیین اندازه ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج
Figure 3- Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) analysis of silica particles extracted from rice husk for determining particle size

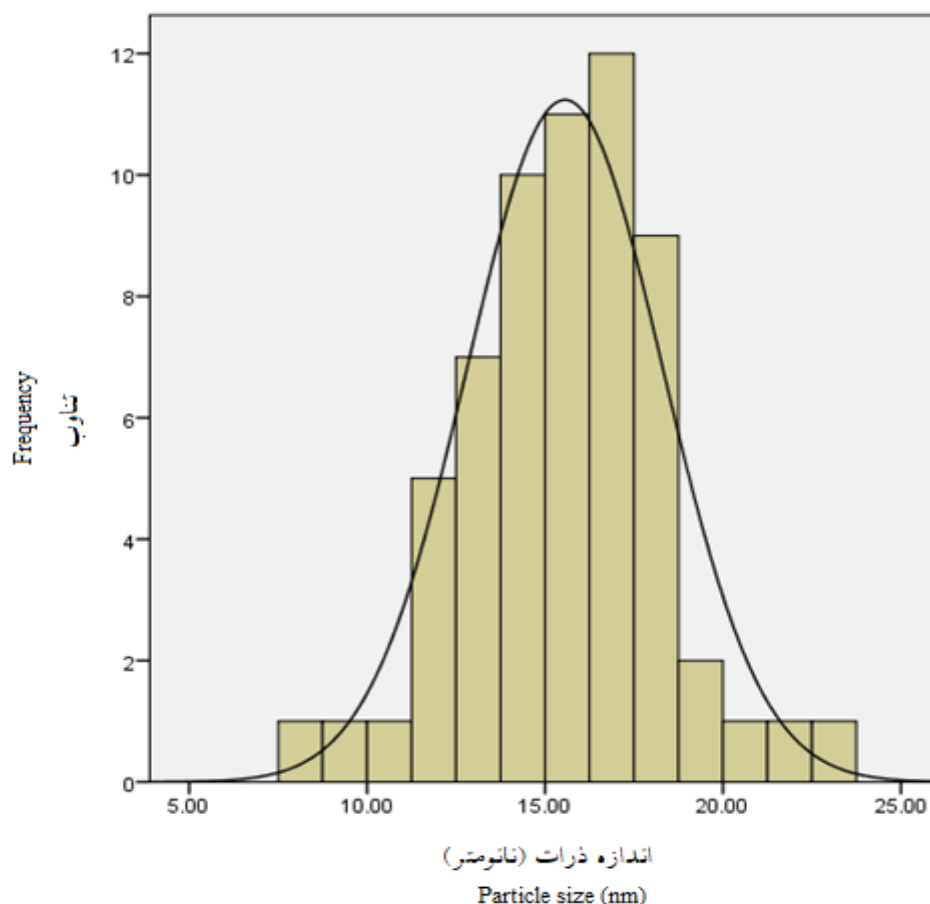
اندازه و سطح ویژه نانو ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج

نتایج حاصل از تحلیل آماری اندازه‌ی ذرات نانو سیلیس در شکل ۴، نشان داد که انحراف معیار پایین (۲/۹۶ نانومتر) و ضریب تغییرات ۰/۱۹۴، گویای یکنواختی توزیع و تکرارپذیری بالای فرآیند استخراج است. توزیع فراوانی داده‌ها شکل نرمالی با نقطه اوج نزدیک به ۱۵ نانومتر را نشان می‌دهد که نشانگر غالب بودن ذرات هم‌اندازه است. چنین یکنواختی در اندازه موجب پایداری بیشتر در سوسپانسیون و پخش‌شدگی بهتر در محیط‌های خاکی می‌شود.

تحلیل سطح ویژه نانوسیلیکاهای استخراج شده از پوسته برنج نشان داد که مقدار سطح ویژه‌ی ویژه حدود ۱۷۸/۵ مترمربع بر گرم است. سطح ویژه‌ی زیاد به افزایش تعداد محل‌های جذب سطحی کمک می‌کند که این موضوع برای کاربردهای محیطی مانند بهبود پایداری ساختاری خاک، حذف فلزات سنگین یا بهبود جذب مواد مغذی اهمیت دارد. این نتایج تأیید می‌کند که روش پیرولیز کنترل شده و اسیدیته‌ی انتخاب شده در فرآیند تولید، منجر به ایجاد ساختاری با توزیع یکنواخت شده است. سطح ویژه ی زیاد همچنین می‌تواند به بهبود پایداری کلوئیدی در محیط‌های آبی کمک کند (Dong and Lo, 2013).

فرآیند استخراج و رشد متقارن ذرات در مقیاس نانو است. کروییت زیاد موجب افزایش پایداری پراکنش و کاهش تمایل به تجمع ذرات شده است. این نتایج نشان می‌دهد که روش سنتز اتخاذ شده توانسته ساختارهای کروی منظم و هم‌اندازه ایجاد کند که برای پایداری فیزیکی ماده اهمیت دارد.

افزایش تماس بین سطح ذرات و مولکول‌های محیطی موجب افزایش کارایی تبادل یونی و واکنش‌پذیری سطحی نانو سیلیکا می‌شود. تحلیل فاکتور شکل نانو ذرات سیلیس نیز نشان داد که مقدار محاسبه شده $0/95$ است که بیانگر کروییت بالا و یکنواختی مورفولوژیکی قابل توجه در ذرات است. مقدار نزدیک به واحد نشان‌دهنده‌ی کنترل دقیق در



شکل ۴- نمودار هیستوگرام نتایج حاصل از تعیین اندازه ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج
Figure 4- Histogram showing the particle size distribution of silica particles extracted from rice husk

پخش‌شدگی کم داده‌ها پیرامون میانگین است. برای ارزیابی نوسان نسبی داده‌ها از شاخص ضریب تغییرات (CV) استفاده شد که برابر با حدود $4/9$ درصد به دست آمد. این مقدار نشان می‌دهد که تغییرات رطوبت در بین نمونه‌ها بسیار پایین بوده و داده‌ها از یکنواختی مناسبی برخوردار هستند.

محتوای آب نانو ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج نتایج مقادیر محتوای رطوبت نانو ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج تحقیق در جدول ۱، نشان داده شده است. بررسی شاخص‌های آماری مرتبط با رطوبت نشان داد که مقدار میانگین رطوبت برابر با $1/84$ بوده است. انحراف معیار برابر با $0/09$ محاسبه شد که نشان‌دهنده

جدول ۱- آماره‌های مقادیر درصد رطوبت ذرات نانو سیلیس استخراج شده از پوسته برنج

Table 1- Statistical parameters of the moisture content percentage of nanosilica particles extracted from rice husk

Variable متغیر	Mean میانگین	Standard Deviation انحراف معیار	Coefficient of Variation ضریب تغییر
Moisture content (%) درصد رطوبت (%)	1.84	0.09	4.9

درصد تولید نانو ذرات سیلیس

از مجموع ۲۰۰ گرم پوسته برنج خام خشک، مقدار ۷۰ گرم نانو سیلیس خالص به دست آمد که نشان‌دهنده بازده تولیدی حدود ۳۵ درصد است. پودر نانو سیلیس حاصل دارای رنگ سفید یکنواخت و ساختار متخلخل بود. کاهش قابل توجه جرم نمونه در مراحل اسیدشویی، خشک کردن و احتراق به خروج مواد آلی، کربن و ناخالصی‌های معدنی نسبت داده می‌شود.

بحث

تحلیل داده‌های اندازه ذرات نشان داد که نانو سیلیس تولیدی دارای توزیع یکنواخت در محدوده نانومتری است که بیانگر کنترل مناسب فرآیند سنتز است. ذرات کوچک‌تر از ۲۰ نانومتر، به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، قابلیت جذب بالا و فعالیت سطحی بیشتری دارند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده وجود سطح فعال در نانوسیلیس تولیدی هستند که می‌تواند در کاربردهای وابسته به برهم‌کنش سطحی اهمیت داشته باشد. همگنی اندازه ذرات علاوه بر نشان دادن کنترل مناسب فرآیند سنتز، می‌تواند با کاهش دامنه پراکندگی اندازه‌ها به بهبود پایداری نسبی سوسپانسیون کمک کند (Mrowiec, 2025). وجود منحنی نرمال با تمرکز در مقیاس نانو تأیید می‌کند که فرآیند استخراج و خالص‌سازی به درستی کنترل شده است. علاوه بر این، اندازه‌ی مناسب ذرات و توزیع باریک آن‌ها باعث افزایش قابلیت نفوذ در خلل و فرج خاک و ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای مستحکم می‌شود. در نتیجه، با توجه به یکنواختی اندازه و سطح ویژه بالا، این نانو سیلیس‌ها می‌توانند در کاربردهای مرتبط با مواد معدنی و سامانه‌های ذره‌ای دارای پتانسیل عملکرد مناسب باشند (Cao et al., 2023).

مقدار بالای سطح ویژه به دست آمده بیانگر آن است که نانو سیلیس حاصل از پوسته برنج از ساختاری متخلخل با ابعاد نانومقیاس بهره‌مند است. این ویژگی موجب افزایش چشمگیر تعداد محل‌های فعال سطحی می‌شود که نقش اساسی در فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی ایفا می‌کنند. سطح ویژه بالای به دست آمده بیانگر افزایش تعداد سایت‌های فعال سطحی در نانو سیلیس تولیدی است که می‌تواند نقش مهمی در برهم‌کنش‌های سطحی ایفا کند (Rajput et al., 2020). علاوه بر این، سطح فعال زیاد باعث جذب مؤثرتر یون‌ها و مولکول‌های آلی در محیط می‌شود که برای تثبیت عناصر و بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی اهمیت دارد. ساختار متخلخل نانو سیلیس نیز به نفوذپذیری آب و اکسیژن در سطح ذرات کمک کرده و فعالیت سطحی آن را تقویت می‌کند. با توجه به اندازه‌ی کوچک ذرات (میانگین ۱۵ نانومتر)، افزایش سطح ویژه منجر به بالا رفتن انرژی سطحی و واکنش‌پذیری بیشتر شده است. این ویژگی در کاربردهای مرتبط با فرآیندهای جذب سطحی و سامانه‌های مبتنی بر نانو ذرات مورد توجه قرار می‌گیرد (Wang et al., 2024). از منظر شیمی سطح، حضور گروه‌های سیلانول فعال (Si-OH) بر سطح نانوسیلیک (Hasan al., 2025)، در کنار سطح ویژه زیاد، موجب افزایش ظرفیت جذب و تشکیل پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آلی و معدنی می‌شود. سطح ویژه زیاد این نانو سیلیس‌ها نه تنها شاخصی از کیفیت فرآیند سنتز است بلکه تعیین‌کننده عملکرد نهایی آن در سامانه‌های محیطی و کشاورزی محسوب می‌شود. مقدار بالای فاکتور شکل نیز بیانگر آن است که نانو سیلیک‌های تولیدی عمدتاً دارای ریخت‌شناسی کروی با زبری سطحی حداقل هستند. کروییت بالا می‌تواند به توزیع یکنواخت‌تر انرژی سطحی در ذرات کمک کرده و احتمال تجمع را کاهش دهد. این

متخلخل گردید. بازده نهایی ۳۵ درصد حاصل از این فرآیند، نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای مسیر شیمیایی و حرارتی در استخراج سیلیس از پوسته‌ی برنج است. ساختار متخلخل مشاهده‌شده و بازده مناسب به دلیل کنترل دقیق مراحل پیش‌تصفیه و کلسیناسیون قابل توجیه است. نتایج نشان می‌دهد که شرایط دمایی ۸۰۰ درجه سلسیوس همراه با تیمار شیمیایی مورد استفاده، منجر به تولید نانو سیلیس با ویژگی‌های مطلوب در این مطالعه شده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف استخراج، سنتز و شناسایی نانو ذرات سیلیس از پوسته برنج و بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی آن انجام شد. در این پژوهش، نتایج حاصل از FTIR نشان داد که نانو سیلیس تولیدی دارای باندهای مشخص Si-O-Si و Si-OH بوده و ساختاری ساختار کم‌بلوری با فعالیت سطحی بالا دارد. همچنین تصاویر FESEM حاکی از ریخت شناسی کروی، اندازه متوسط ۱۵ نانومتر و توزیع یکنواخت ذرات بودند که دلالت بر کنترل مناسب پارامترهای استخراج دارد. از منظر فیزیکی، میانگین رطوبت نمونه‌ها برابر با ۱/۸۴ درصد و ضریب تغییرات حدود ۴/۹ درصد به‌دست آمد که نشانگر یکنواختی قابل توجه و کنترل دقیق فرآیند بود. بازده استخراج ۳۵ درصد از پوسته برنج خام نشان داد که ترکیب اسیدشویی و کلسیناسیون کنترل‌شده در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس کارآمدترین مسیر برای تولید نانو سیلیس نیمه‌کریستاله با خلوص بالا است. افزایش سطح ویژه در مقیاس نانو نه تنها سبب افزایش انرژی سطحی و فعالیت شیمیایی می‌شود، بلکه زمینه را برای استفاده در جذب آلاینده‌ها، اصلاح ساختار خاک و تقویت رشد گیاهان فراهم می‌سازد. از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که نانو ذرات سیلیس تولیدی می‌توانند به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ای چندمنظوره در خاک عمل کنند. این ذرات با افزایش چسبندگی بین‌ذره‌ای، موجب بهبود پایداری ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و تقویت تبادل یونی میان ذرات خواهند شد. با وجود نتایج

ویژگی، پراکنش یکنواخت در محیط‌های آبی و خاکی را تسهیل می‌کند و به بهبود برهم‌کنش با ماتریس خاک و مواد آلی کمک می‌نماید (De Temmerman et al., 2012). همچنین شکل کروی در افزایش سطح تماس مؤثر و یکنواختی عملکرد سطحی ذرات نقش کلیدی دارد.

به‌طور کلی، نتایج بیانگر پایداری مطلوب محتوای رطوبت در مجموعه‌ی داده‌های مورد بررسی است. مقادیر رطوبت به‌دست‌آمده می‌تواند تحت تأثیر شرایط فرآیند سنتز و عملیات حرارتی قرار گرفته باشد. این پارامتر همچنین ناشی از شکستن پیوندهای آبی و تراکم حاصل از گروه‌های سیلانول است (Dzulhijjah et al., 2025). این به این دلیل است که غلظت حلال بر میزان بالای سیلیس تولید شده در فرآیند استخراج سیلیس از خاکستر پوسته برنج تأثیر می‌گذارد. هرچه غلظت حلال بیشتر باشد، میزان آب کمتر است که این نیز به دلیل وجود سیلیس بالا است. در این مطالعه از محلول نیترات پتاسیم ۰/۵ نرمال در دمای کلسیناسیون ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و نوع اسید HCl استفاده شد. در دمای کلسیناسیون ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، بازده سیلیس بالایی نیز تولید می‌شود، به‌طوری‌که هرچه مقدار سیلیس بیشتر باشد، سیلیس قادر به اتصال -OH و O بیشتری است که از بخار آب جذب‌شده توسط سیلیس حاصل می‌شود. محصول نهایی پس از تیمار با نیترات پتاسیم و عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به حالت نیمه‌کریستاله درآمد. فرآیند اسیدشویی پوسته برنج با محلول ۱۰ درصد وزنی HCl موجب حذف مؤثر فلزات قلیایی، قلیایی خاکی و ناخالصی‌های فلزی نظیر Ca, K, Fe و Mn از سطح سلولزی پوسته شد. این مرحله نقش کلیدی در افزایش خلوص سیلیس و جلوگیری از تشکیل فازهای سیلیکات در حین احتراق دارد. در جزئیات بیشتر، پس از شست‌وشو و خشک‌کردن، تیمار نمونه با محلول نیترات پتاسیم ۰/۵ نرمال موجب جوانه‌زنی فازهای بلوری و کنترل اندازه ذرات شد. در نهایت، عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس با تبخیر نیترات‌ها و بازآرایی ساختار آمورف، سبب تشکیل نانو سیلیس نیمه‌کریستاله

در مجموع، یافته‌های این پژوهش گواه آن است که نانو ذرات سیلیس استخراج شده از پوسته برنج می‌توانند به عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر در مدیریت پایدار اراضی و بازیافت پسماندهای کشاورزی مطرح شوند. ترکیب عملکرد فیزیکی، شیمیایی و زیست محیطی این ذرات، آن‌ها را به ماده‌ای چندمنظوره برای بهبود کیفیت خاک، افزایش بهره‌وری منابع آبی و کاهش اثرات زیست محیطی تبدیل می‌کند. استمرار پژوهش‌ها در این حوزه می‌تواند مسیر دستیابی به فناوری‌های پاک و مبتنی بر اقتصاد چرخشی را در کشاورزی و محیط زیست هموار سازد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق و مقاله با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان ایران و پارک علم و فناوری گیلان انجام شده است، لذا نویسندگان مراتب قدردانی خود را از بنیاد ملی نخبگان ایران و پارک علم و فناوری گیلان اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مثبت، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، در این مطالعه تمرکز بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانو ذرات بود، درحالی‌که رفتار زیستی و اکولوژیکی آن‌ها در سیستم خاک-گیاه مورد بررسی قرار نگرفت. دوم، پایداری نانو سیلیس در محیط‌های واقعی و احتمال تجزیه یا دگرگونی ساختاری آن در طول زمان نیاز به مطالعه دقیق‌تر دارد. در راستای رفع این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده در چند محور گسترش یابند:

بررسی اثر اندازه ذرات و ریخت شناسی بر عملکرد: تغییر در اندازه نانو ذرات (مثلاً در بازه‌ی ۱۰ تا ۵۰ نانومتر) می‌تواند تأثیر مستقیمی بر واکنش پذیری، پایداری و میزان جذب یون‌ها داشته باشد. پیشنهاد می‌شود اثر اندازه، شکل و درجه تخلخل نانو ذرات به صورت سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گیرد.

بهینه سازی پارامترهای فرآیند سنتز: استفاده از روش‌های نوین مانند استخراج به کمک هیدروترمال یا استفاده از حلال‌های سبز می‌تواند بازده تولید را افزایش داده و اثرات زیست محیطی را کاهش دهد. مطالعه اثر دما، pH، زمان واکنش و غلظت اسید بر ویژگی‌های نهایی نانو ذرات مؤثر خواهد بود.

Reference

1. Cao, P., Ma, Q., Zha, M., Zhang, J., and Huo, Z. 2023. Study on the modification of silty soil sites using nanosilica and methylsilicate. *Materials*, 16(16), pp.5646. <https://doi.org/10.3390/ma16165646>.
2. De Temmerman, P.J., Van Doren, E., Verleysen, E. et al. 2012. Quantitative characterization of agglomerates and aggregates of pyrogenic and precipitated amorphous silica nanomaterials by transmission electron microscopy. *J Nanobiotechnol*, 10, pp.24. <https://doi.org/10.1186/1477-3155-10-24>
3. Dien, L.Q., Chung, N.H., Van Anh, N.T., Duong, T.T.T., Truyen, D.N., Nghia, N.H., and Zenitova, L.A. 2022. Rice husk integrated biochemical refinery for the production of nano- and bioproducts. *Process Biochemistry*, 121, pp.647–655. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.08.009>
4. Dong, H., and Lo, I.M.C. 2013. Influence of calcium ions on the colloidal stability of surface-modified nano zero-valent iron in the absence or presence of humic acid. *Water Research*, 47, pp.2489-2496.
5. Dzulhijjah, W.A., Aprilia, S., Arahman, N., and Barambu, N.U. 2025. Synthesis and characterization of nanosilica from rice husk waste Sigupai varieties endemic to Aceh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, pp.101145. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101145>

6. Ellerbrock, R., Stein, M., and Schaller, J., 2022. Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. *Scientific Reports*, 12(1), pp.11708. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15882-4>.
7. Francis, D.V., Abdalla, A.K., Mahakham, W., Sarmah, A.K., and Ahmed, Z.F.R. 2024. Interaction of plants and metal nanoparticles: Exploring its molecular mechanisms for sustainable agriculture and crop improvement. *Environment International*, 190, pp.108859. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859>.
8. Gu, J., Cai, X., Wang, Y., Guo, D., and Zeng, W. 2022. Evaluating the effect of Nano-SiO₂ on different types of soils: A multi-scale study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, pp.16805. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416805>
9. Hasan, R., Mustafawi Muhammadi, F., Solihat, I., Listianti, E., Iskandar Ishaq, M., Rahmatul Putri, Y., and Alfiani, P. 2025. Nano-silica derived from Coal Fly Ash: A Sustainable Iron (III) Ion Adsorbent. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 10(3), pp.331-338. <https://doi.org/10.22090/jwent.2025.03.008>
10. Hossain S.S., Mathur, L., and Roy, P.K. 2018. Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. *Journal of the Asian Ceramic Societies*, 6, pp.299–313. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1539210>
11. Joshi, U., Roy, R., Bhosale, P., Nikam, S., Kamble, T., and Satsangi, P.G. 2023. Sustainable economic production of silica nanoparticles from rice husks for adsorptive removal of anionic and cationic dyes. *Bioresource Technology Reports*, 24, pp.101685. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101685>
12. Le, V.H., Thuc, C.N.H., and Thuc, H.H. 2013. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol–gel method. *Nanoscale Research Letters*, 8, pp.58. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-58>
13. Miao, G., Han, J., and Han, T. 2025. Silicon nanoparticles and apoplastic protein interaction: A hypothesized mechanism for modulating plant growth and immunity. *Plants (Basel)*, 14(11), pp.1630. <https://doi.org/10.3390/plants14111630>
14. Mrowiec, B. 2025. Nanowaste in the aquatic environment – threats and risk countermeasures. *Desalination and Water Treatment*, 322, pp.101112. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101112>
15. Parhizkar, M. 2025. Rice husk-derived nanosilica enhances root development, phosphorus uptake and soil stability in rice paddy fields of northern Iran. *Rhizosphere*, 36, pp.101234. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101234>
16. Rajput, V., Minkina, T., Mazarji, M., Shende, S., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M., Chaplygin, V., Singh, A. and Jatav, H. 2020. Accumulation of nanoparticles in the soil-plant systems and their effects on human health. *Annals of Agricultural Sciences*, 65, pp.137-143. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.08.001>
17. Salem, H.S. and Chilingarian, G.V. 1999. Determination of specific surface area and mean grain size from well-log data and their influence on the physical behavior of offshore reservoirs. *J. Petrol. Sci. Eng.* 22, pp.241–252.
18. Schaller, J., Kleber, M., Puppe, D., Stein, M., Sommer, M., and Rillig, M.C. 2025. The importance of reactive silica for maintaining soil health. *Plant and Soil*. 513, pp.1651–1662. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07299-5>
19. Sharma, S.K., Sharma, A.R., Pamidimarri, S.D.V.N., Gaur, J., Singh, B.P., Sekar, S., Kim, D.Y., and Lee, S.S. 2019. Bacterial compatibility/toxicity of biogenic silica (b-SiO₂) nanoparticles synthesized from biomass rice husk ash. *Nanomaterials*, 9, pp.1440. <https://doi.org/10.3390/nano9101440>
20. Siddiqi, K.S., Husen, A., Zahra, N., and Moheman, A. 2025. Harnessing silicon nanoparticles and various forms of silicon for enhanced plant growth performance under salinity stress: Application and mechanism. *Discover Nano*, 20, pp.89. <https://doi.org/10.1007/s44393-025-00123-5>
21. Thapa, I., and Ghani, S. 2025. Nano-silica and machine learning-based soil stabilization: Advancing sustainable and clean technologies for resilient infrastructure. *Progress in Engineering Science*, 2, pp.100131. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100131>

22. Wang, L., Liu, Q., Li, X.A., Qin, B., Hong, B., and Shi, J. 2024. Effect of nanosilica on the hydrological properties of loess and the microscopic mechanism. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64280-5>
23. Wang, W., Martin, J.C., Fan, X., Han, A., Luo, Z., and Sun, L. 2012. Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4, pp.977–981. 10.1021/am201619u.
24. Yuan, S., Hou, Y., Liu, S., and Ma, Y. 2024. A comparative study on rice husk, as agricultural waste, in the production of silica nanoparticles via different methods. *Materials*, 17(6), pp.1271. <https://doi.org/10.3390/ma17061271>
25. Zhang, H., Zheng, T., Wang, Y., Li, T., and Chi, Q. 2024. Multifaceted impacts of nanoparticles on plant nutrient absorption and soil microbial communities. *Front. Plant Sci.* 15, pp.1497006. 10.3389/fpls.2024.1497006.
26. Zhuravlev, L.T. 2000. The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 173, pp.1–38. 10.1016/S0927-7757(00)00556-2.