



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



کاربرد ریزجانداران در سنتز نانوذرات فلزی: چشم‌اندازها در زیست‌فناوری و کشاورزی

ساناز اشرفی سعیدلو*

۱- محقق (Ph.D.)، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران؛ *sanazashrafi92@yahoo.com

چکیده

سنتز زیستی نانوذرات فلزی به‌عنوان رویکردی نوین و سازگار با محیط زیست، طی سال‌های اخیر توجه قابل‌ملاحظه‌ای را در حوزه نانوفناوری به خود جلب کرده است. در این میان، ریزجانداران از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها به‌دلیل توانایی در تولید آنزیم‌ها، متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات احیاکننده طبیعی، به‌عنوان سامانه‌های زیستی کارآمد برای سنتز نانوذرات با اندازه، شکل و پایداری قابل‌کنترل شناخته می‌شوند. این فناوری علاوه بر حذف نیاز به مواد شیمیایی پرخطر و کاهش هزینه‌های تولید، امکان توسعه رویکردهای پایدار و مقیاس‌پذیر را فراهم می‌آورد. نانوذرات فلزی حاصل از مسیرهای زیستی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، صنایع دارویی، محیط‌زیست و به‌ویژه کشاورزی دارند. در سیستم‌های زراعی، این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان کودهای نانو، عوامل کنترل بیماری‌های گیاهی و محرک رشد، نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری ایفا کنند. با وجود این مزایا، چالش‌هایی نظیر بهینه‌سازی شرایط فرآیند، استانداردسازی تولید، کنترل دقیق خصوصیات فیزیکوشیمیایی و ارزیابی ایمنی زیست‌محیطی همچنان مطرح است. این مقاله مروری با هدف بررسی مکانیسم‌های زیستی سنتز نانوذرات فلزی توسط ریزجانداران، به تبیین ظرفیت‌ها، محدودیت‌ها و چشم‌اندازهای آتی این فناوری در زیست‌فناوری و کشاورزی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: سنتز زیستی، نانوذرات فلزی، ریزجانداران، زیست فناوری، کشاورزی پایدار

مقدمه

نانوذرات فلزی به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر نسبت سطح به حجم بالا، فعالیت کاتالیتیکی قابل توجه و رفتارهای فیزیکوشیمیایی ویژه، جایگاه مهمی در حوزه‌های پزشکی، داروسازی، محیط‌زیست و کشاورزی یافته‌اند (Ashrafi- Ashrafi, 2020; Saeidlou et al., 2025b; Kato and Suzuki, 2020). با این حال، روش‌های رایج سنتز نانوذرات که بر پایه فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی استوارند، با چالش‌هایی همچون مصرف بالای انرژی، نیاز به مواد شیمیایی سمی، هزینه‌های زیاد و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوب همراه هستند. این محدودیت‌ها ضرورت توسعه روش‌های پایدار، ایمن و سازگار با محیط‌زیست را برجسته کرده‌اند (اشرفی سعیدلو و همکاران، ۱۴۰۴؛ Nanda and Saravanan, 2009).

در این راستا، سنتز زیستی نانوذرات فلزی با استفاده از ریزجانداران به‌عنوان رویکردی نوین و سبز مطرح شده است. ریزجاندارانی نظیر باکتری‌ها و قارچ‌ها از طریق ترشح آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌های احیاکننده، یون‌های فلزی را به نانوذرات پایدار و زیست‌سازگار تبدیل می‌کنند. این فرآیند نه تنها خطرات زیست‌محیطی روش‌های شیمیایی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان کنترل بهتر اندازه، شکل و خواص سطحی نانوذرات را نیز فراهم می‌سازد (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a).



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



در کشاورزی، نانوذرات حاصل از سنتز زیستی می‌توانند به‌عنوان کودهای نانو، محرک‌های رشد و عوامل کنترل بیماری‌های گیاهی مورد استفاده قرار گیرند و از این طریق نقشی مهمی در افزایش بهره‌وری و تحقق کشاورزی پایدار ایفا کنند. با وجود این مزایا، موضوعاتی همچون مقیاس‌پذیری، استانداردسازی فرآیندها و ارزیابی ایمنی زیست‌محیطی همچنان چالش‌های اساسی در مسیر توسعه صنعتی این فناوری محسوب می‌شوند (Paramo et al., 2020). بنابراین، مرور و تحلیل پژوهش‌های انجام شده در زمینه بیوسنتز نانوذرات فلزی و نقش ریزجانداران در آن، می‌تواند مسیر روشنی برای بهینه‌سازی شرایط سنتز، افزایش بازده و توسعه کاربردهای صنعتی و کشاورزی ترسیم کند.

سنتز زیستی نانوذرات فلزی

در فرآیند بیوسنتز نانوذرات فلزی، ریزجانداران یا متابولیت‌های ترشح شده‌ی آن‌ها نقش اصلی را در احیا و پایداری یون‌های فلزی ایفا می‌کنند (Nanda and Saravanan, 2009). مهم‌ترین مزایای بیوسنتز شامل سادگی فرآیند، حذف مواد شیمیایی مضر، کاهش هزینه‌های تولید، سازگاری با محیط‌زیست، و امکان کنترل دقیق ویژگی‌های نانوذرات است. افزون بر این، بیوسنتز قابلیت مقیاس‌پذیری بالا داشته و پتانسیل توسعه در زیست‌فناوری، پزشکی و کشاورزی پایدار را دار می‌باشد (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a; Youssef et al., 2017). در مجموع، بیوسنتز نانوذرات فلزی با استفاده از ریزجانداران نمونه‌ای برجسته از همگرایی فناوری نانو و زیست‌فناوری است که می‌تواند در آینده نزدیک به‌عنوان روشی ایمن، اقتصادی و پایدار جایگزین فرآیندهای شیمیایی پرخطر گردد.

نقش ریزجانداران در سنتز نانوذرات

ریزجانداران به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل در سنتز سبز نانوذرات فلزی شناخته می‌شوند، زیرا از ویژگی‌هایی مانند رشد سریع، سهولت در کشت، قابلیت سازگاری با طیف وسیعی از شرایط محیطی (از جمله دما، pH و فشار) و توانایی تولید متابولیت‌های فعال زیستی برخوردارند. این خصوصیات موجب شده است که گونه‌های متنوعی از ریزجانداران، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها، به‌عنوان کاتالیزورهای زیستی مؤثر در تولید نانوذرات پایدار، سازگار با محیط‌زیست و اقتصادی مورد توجه قرار گیرند. فلزاتی مانند نقره، طلا و آهن از جمله عناصری هستند که می‌توانند توسط این ریزجانداران از طریق مکانیسم‌های زیستی به نانوذرات احیا شوند (Singh et al., 2020). فرآیند بیوسنتز نانوذرات معمولاً از طریق جذب انتخابی یون‌های فلزی و احیای آن‌ها به شکل عنصری انجام می‌شود. بر اساس شواهد، سه مکانیسم اصلی در این فرآیند نقش دارند: (۱) فعالیت آنزیمی: آنزیم‌های وابسته به NADH، به‌ویژه NADH-ردوکتازها، با انتقال الکترون به یون‌های فلزی، فرآیند احیاء را هدایت کرده و تشکیل نانوذرات را القا می‌کنند؛ (۲) متابولیت‌های ثانویه: ترکیباتی مانند پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و اسیدهای آمینه ضمن احیای یون‌های فلزی، به‌عنوان عوامل پوشش‌دهنده طبیعی عمل کرده و از تجمع نانوذرات جلوگیری می‌کنند؛ (۳) عوامل محیطی: ترکیبات آلی ترشح‌شده به محیط کشت مانند اسیدهای آلی و پلی‌پپتیدها، اندازه و شکل نانوذرات را به‌طور طبیعی تنظیم کرده و بر پایداری آن‌ها اثرگذارند (Mohd Yusof et al., 2019).



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



از میان ریزجانداران، باکتری‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند؛ زیرا رشد سریع، سهولت در کشت و قابلیت اصلاح ژنتیکی، آن‌ها را به یکی از منابع اصلی در سنتز نانوذرات فلزی تبدیل کرده است (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a). گونه‌هایی مانند *Bacillus methylotrophicus* و *Pseudomonas fluorescens* توانایی بالایی در تولید نانوذرات نقره و طلا از خود نشان داده‌اند. مکانیسم غالب در باکتری‌ها معمولاً درون سلولی است، به گونه‌ای که نانوذرات در ساختار سلولی تجمع یافته و استخراج آن‌ها نیازمند فرایندهای تخریب سلولی می‌باشد. این ویژگی می‌تواند در مقیاس صنعتی چالش‌هایی از نظر بازیابی و خالص‌سازی ایجاد کند. با این حال، کنترل دقیق‌تر اندازه و مورفولوژی نانوذرات در این سیستم‌ها از مزایای قابل توجه آن به‌شمار می‌رود (Bahrulolum et al., 2021). در مقابل، قارچ‌ها با توانایی بالاتر در ترشح آنزیم‌ها و متابولیت‌های ثانویه، عمدتاً در سنتز برون سلولی نانوذرات کارایی بیشتری دارند. این امر موجب سهولت در جداسازی محصول، کاهش هزینه‌های فرآوری و افزایش بازده می‌شود. قارچ‌های رشته‌ای مانند *Fusarium oxysporum*، *Aspergillus niger* و *Penicillium sp.* توانایی تولید طیف وسیعی از نانوذرات از جمله نقره، طلا و اکسید آهن را دارند. در سنتز برون سلولی، آنزیم‌هایی نظیر نیترات ردوکتاز همراه با پروتئین‌های ترشحی، یون‌های فلزی را به نانوذرات احیا کرده و همزمان نقش عامل پایدارکننده را ایفا می‌کنند. قارچ‌ها به دلیل تحمل بالاتر نسبت به غلظت‌های زیاد فلزات سنگین و تولید زیست‌پوشش‌های ضخیم‌تر، نانوذراتی با پایداری کلئیدی بالاتر ایجاد می‌کنند (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a; Mohd Yusof et al., 2019).

از دیدگاه تحلیلی، انتخاب نوع ریزجاندار باید متناسب با هدف کاربردی نانوذرات صورت گیرد. باکتری‌ها برای تولید نانوذرات با اندازه دقیق و ویژگی‌های سطحی کنترل‌شده (مانند دارورسانی هدفمند یا حسگرهای زیستی) مناسب‌ترند، در حالی که قارچ‌ها برای تولید انبوه و اقتصادی در فرآیندهای صنعتی یا کشاورزی ارجحیت دارند، چراکه جداسازی نانوذرات از محیط کشت در آن‌ها ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است (جدول ۱). افزون بر این، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب سیستم‌های میکروبی در قالب کنسرسیوم‌های چندریزجاندار می‌تواند مزایای هر دو گروه را هم‌زمان ادغام کرده و کنترل بهتر بر اندازه، شکل و پایداری نانوذرات فراهم آورد (Kalimuthu et al., 2020). به‌طور کلی، درک عمیق از تفاوت‌های فیزیولوژیکی، متابولیکی و آنزیمی میان باکتری‌ها و قارچ‌ها، کلید بهینه‌سازی فرآیند سنتز زیستی نانوذرات و توسعه پروتکل‌های استاندارد و مقیاس‌پذیر در چارچوب زیست‌فناوری سبز محسوب می‌شود (Youssef et al., 2017).

جدول ۱- مقایسه تحلیلی نقش باکتری‌ها و قارچ‌ها در سنتز سبز نانوذرات فلزی

ویژگی‌ها	باکتری‌ها	قارچ‌ها	تحلیل تطبیقی
مکان سنتز نانوذرات	اغلب درون سلولی	عمدتاً برون سلولی	سنتز برون سلولی در قارچ‌ها باعث سهولت استخراج و خالص‌سازی نانوذرات می‌شود.
نقش آنزیم‌ها	آنزیم‌های درون سلولی مانند NADH ردوکتازها مسئول احیای یون‌های فلزی هستند.	آنزیم‌های ترشحی مانند نیترات ردوکتاز در محیط برون سلولی فعال‌اند.	قارچ‌ها به دلیل ترشح آنزیم‌ها در محیط کشت، توانایی بیشتری در کنترل شکل و پایداری نانوذرات دارند.

جدول ۱- مقایسه تحلیلی نقش باکتری‌ها و قارچ‌ها در سنتز سبز نانوذرات فلزی

ویژگی‌ها	باکتری‌ها	قارچ‌ها	تحلیل تطبیقی
سرعت رشد و تولید زیست توده	بسیار سریع، امکان تولید مداوم	کندتر نسبت به باکتری‌ها، اما زیست توده بالاتر	باکتری‌ها برای تولید سریع در مقیاس آزمایشگاهی مناسب‌ترند، قارچ‌ها در مقیاس صنعتی کارآمدتر هستند.
کنترل اندازه و مورفولوژی نانوذرات	دقیق‌تر، قابل تنظیم از طریق اصلاح ژنتیکی یا کنترل شرایط محیطی	کمتر قابل کنترل، اما نانوذرات معمولاً پایدارتر هستند	کنترل پذیری باکتری‌ها بالاتر است، اما پایداری نانوذرات قارچی بیشتر است.
پایداری و پراکندگی نانوذرات	نیازمند عامل پوشش دهنده یا پایدارکننده خارجی	به صورت طبیعی دارای پروتئین‌ها و پلی ساکاریدهای پوشاننده هستند	قارچ‌ها نانوذراتی با پایداری کلوئیدی بیشتر تولید می‌کنند.
تحمل فلزات سنگین	نسبتاً پایین؛ غلظت‌های بالا ممکن است برای سلول سمی باشد	بالا؛ دیواره سلولی ضخیم و وجود ترکیبات کیتینی از سلول محافظت می‌کند	قارچ‌ها در محیط‌های حاوی فلزات سنگین عملکرد بهتری دارند.
مقرون به صرفه بودن و مقیاس پذیری	نیازمند تجهیزات دقیق و فرآیندهای استخراج درون سلولی	فرآیند ساده‌تر و ارزان‌تر به دلیل تولید برون سلولی	قارچ‌ها گزینه‌ای مناسب برای تولید صنعتی با هزینه پایین‌تر هستند.
کاربردهای غالب	نانوذرات دقیق برای داروسازی، حسگرهای زیستی، کاربردهای پزشکی	نانوذرات پایدار برای کاربردهای محیط‌زیستی، آنتی‌باکتریال و کشاورزی	انتخاب نوع ریزجاندار باید متناسب با هدف کاربردی انجام شود.
مثال از گونه‌های مؤثر	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Enterobacter</i> sp.	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium</i> sp.	هر دو گروه در بیوسنتز اکسیدهای فلزی عملکرد مؤثر دارند.

عوامل مؤثر بر ویژگی‌های نانوذرات

ویژگی‌های نانوذرات فلزی، از جمله اندازه، شکل، پایداری و فعالیت سطحی، به شدت تحت تأثیر عوامل زیستی، شیمیایی و فیزیکی قرار دارند (Bahrulolum et al., 2021; Singh et al., 2020). نوع ریزجاندار نقش تعیین‌کننده‌ای بر ویژگی‌های نانوذرات دارد؛ باکتری‌ها معمولاً نانوذرات کوچک و یکنواخت تولید می‌کنند، در حالی که قارچ‌ها با ترشح آنزیم‌ها و پروتئین‌های تثبیت‌کننده، نانوذراتی پایدارتر با امکان سنتز برون سلولی فراهم می‌آورند. انتخاب گونه مناسب باید بر اساس فلز هدف و کاربرد نهایی انجام شود.

شرایط کشت از دیگر عوامل کلیدی هستند. پارامترهایی مانند pH، دما، نوع محیط، غلظت یون‌های فلزی و مدت زمان واکنش بر اندازه، شکل، تجمع و سطح فعال نانوذرات تأثیر مستقیم دارند. تغییر pH بر بار سطحی و پایداری ذرات اثر می‌گذارد؛ افزایش دما سرعت احیاء یون‌ها را بالا می‌برد اما ممکن است باعث تجمع شود و غلظت بالای یون‌ها می‌تواند اندازه ذرات را افزایش دهد. حضور سایر یون‌ها و متابولیت‌ها نیز ممکن است نقش تثبیت‌کننده یا کاهنده داشته باشد. استفاده از عوامل طبیعی تولید شده توسط ریزجانداران، مانند پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها، ثبات نانوذرات را افزایش داده و از تجمع و اکسیداسیون جلوگیری می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی شرایط کشت و مهندسی متابولیسمی

ریزجانداران می‌توانند نانوذراتی با توزیع اندازه دقیق، شکل‌های کروی یا منشوری و پایداری طولانی تولید کرد. این ویژگی‌ها کاربردهای پیشرفته‌ای در دارورسانی هدفمند، تصویربرداری پزشکی و کشاورزی هوشمند فراهم می‌کنند. با وجود پیشرفت‌ها، بسیاری از عوامل مؤثر بر سنتز زیستی هنوز به‌طور کامل شناخته نشده‌اند. تحقیقات سیستماتیک برای بررسی اثر همزمان عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی ضروری است تا فرآیندهایی مقیاس‌پذیر، قابل اعتماد و با کارایی بالا طراحی شود؛ که مسیر تولید صنعتی نانوذرات سبز و توسعه کاربردهای نوآورانه در پزشکی، کشاورزی و محیط‌زیست را هموار می‌سازد (Gardea-Torresdey et al., 2003). نمونه‌هایی از سنتز نانوذراتی با خصوصیات و کاربردهای مختلف با استفاده از ریزجانداران متفاوت در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقایسه برخی نانوذرات سنتز شده توسط ریزجانداران مختلف

ردیف	ریزجاندار	نوع نانوذره فلزی	نحوه سنتز	اندازه تقریبی (nm)	شکل نانوذره	کاربرد گزارش شده	مرجع
۱	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	آهن (Fe ₂ O ₃ NPs)	برون سلولی	۲۴-۲۰	کروی	آنتی‌باکتریال، ضد قارچ، آنتی‌اکسیدان، فتوکاتالیستی	Ashrafi Saeidlou et al., 2025a
۲	<i>Aspergillus niger</i>	نقره (AgNPs)	برون سلولی	۱۰۰-۱۰	-	ضد قارچ	Al-Zubaidi et al., 2019
۳	<i>Bacillus megaterium</i>	سلنیوم (SeNPs)	برون سلولی	۴۵/۹	کروی	ضد قارچ	Hashem et al., 2021
۴	<i>Enterococcus sp. (RMAA)</i>	طلا (AuNPs)	درون سلولی	۱۰-۵	-	-	Nandhini et al., 2021
۵	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	روی (ZnNPs)	برون سلولی	۲۱-۶	کروی	ضد میکروبی	Abdo et al., 2021
۶	<i>P. djamora</i>	تیتانیوم (TiO ₂ NPs)	برون سلولی	۳۱	کروی	آنتی‌باکتریایی، ضد سرطان	Manimaran, et al., 2021
۷	<i>Aspergillus terreus</i>	طلا (Ag-) (CuNPs)	برون سلولی	۳۰-۲۰	کروی	-	Ameen, 2022
۸	<i>P. oxalicum</i>	کادمیوم (CdONPs)	برون سلولی	۸۰-۴۰	کروی	آنتی‌میکروبی	Azam et al., 2020
۹	<i>Streptomyces sp.</i>	روی (ZnONPs)	برون سلولی	۳۵-۱۲	شش ضلعی	ضدباکتری	Rajivgandhi, et al., 2022

کاربردهای نانوذرات فلزی سنتز شده توسط ریزجانداران

نانوذرات فلزی سنتز شده با رویکرد زیستی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند اندازه نانومتری، سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی و زیستی، و قابلیت عملکرد هدفمند، در حوزه‌های مختلف علمی، صنعتی و پزشکی ظرفیت‌های



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



چشمگیری ایجاد کرده‌اند (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a,b; Yousefzadeh-Valendeh et al., 2023; Paramo et al., 2020).

در محیط‌زیست، این نانوذرات قادر به جذب و خنثی‌سازی آلاینده‌ها از آب و خاک و تصفیه سریع فاضلاب با فعالیت کاتالیتی بالایی هستند. در کشاورزی، نانوذرات فلزی به‌عنوان کودهای نانو امکان ره‌ایش کنترل‌شده عناصر مغذی، بهبود جذب توسط گیاه و کاهش مصرف کودهای شیمیایی را فراهم می‌کنند، ضمن اینکه خواص ضد میکروبی آن‌ها می‌تواند جایگزین سموم شیمیایی شود و رشد، فتوسنتز و مقاومت گیاهان در برابر استرس‌های محیطی را افزایش دهد.

سازوکارهای عملکردی نانوذرات در سیستم خاک-گیاه

نانوذرات فلزی سنتز شده توسط ریزجانداران می‌توانند در سامانه‌های خاک-گیاه از سه مسیر اصلی شامل بهبود تغذیه گیاه، کنترل عوامل بیماری‌زا و تحریک رشد عمل نمایند. در نقش نانو کود، نانوذراتی مانند اکسید روی (ZnO)، اکسید آهن (Fe_2O_3) و اکسید مس (CuO) با آزادسازی تدریجی و هدفمند عناصر غذایی، کارایی جذب عناصر کم‌مصرف را افزایش می‌دهند. ابعاد نانومتری این ذرات از طریق منافذ کوتیکول، موجب افزایش سطح تماس با ریشه و نفوذ بهتر به درون بافت‌های گیاهی می‌شود. همچنین ریزجاندارانی مانند *Bacillus* و *Pseudomonas* قادرند نانوکودهایی زیست‌سازگار با قابلیت ره‌ایش کنترل‌شده تولید کنند که کارایی مصرف عناصر غذایی را نسبت به کودهای متداول افزایش می‌دهد (Bahrulolum et al., 2021; Paramo et al., 2020).

در نقش عامل ضدپاتوژن، نانوذرات نقره، مس و روی با ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، تخریب دیواره سلولی و اختلال در عملکرد آنزیمی، موجب مرگ یا مهار رشد قارچ‌ها و باکتری‌های بیماری‌زا در خاک می‌شوند. این ویژگی نانوذرات زیستی باعث کاهش مصرف سموم شیمیایی و در نتیجه کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌گردد (Ashrafi-Saeidlou et al., 2025a; Hashem et al., 2021).

برخی از نانوذرات مانند Fe_2O_3 و SeNPs با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز و نیز تحریک مسیرهای هورمونی شامل افزایش تولید اکسین و جیبرلین، موجب رشد بهتر ریشه، افزایش فتوسنتز و مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌شوند و به‌عنوان محرک رشد گیاه عمل می‌کنند. هم‌افزایی بین نانوذرات زیستی و ریزجانداران مفید ریزوسفری مانند *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas fluorescens*، علاوه بر افزایش جذب عناصر غذایی، سبب ارتقای سلامت و کارایی اکولوژیک خاک می‌گردد (Youssef et al., 2017).

چالش‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی در کاربرد نانوذرات در خاک

اگرچه استفاده از نانوذرات زیستی در کشاورزی مزایای متعددی دارد، اما پایداری، سرنوشت و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها در خاک از چالش‌های کلیدی محسوب می‌شود. یکی از مسائل مهم، پایداری فیزیکی و شیمیایی نانوذرات در خاک است. این ذرات می‌توانند با کلئیدها، مواد آلی و ترکیبات معدنی خاک واکنش داده و دچار تجمع، تغییر اندازه یا تغییر شکل شیمیایی شوند که این امر دسترسی زیستی و کارایی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Paramo et al., 2020). همچنین در صورت استفاده بیش از حد، احتمال انتقال نانوذرات از ریزوسفر به بافت گیاه و ورود به زنجیره غذایی وجود دارد. از جنبه بیولوژیک، تأثیر نانوذرات بر جامعه میکروبی مفید خاک اهمیت ویژه‌ای دارد. ممکن است غلظت‌های بالای برخی نانوذرات فلزی، فعالیت میکروارگانیسم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، حل‌کننده‌های فسفات یا قارچ‌های مایکوریز را کاهش



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



داده و تعادل اکولوژیکی خاک را برهم زند. با این حال، نانوذرات سنتز شده به روش زیستی معمولاً دارای پوشش‌های آلی و ترکیبات احیاکننده طبیعی هستند و از این رو، زیست‌سازگاری بیشتری نسبت به نانوذرات شیمیایی نشان می‌دهند (Mohd Yusof et al., 2019).

در نهایت، ارزیابی دقیق سرنوشت و پایداری بلندمدت نانوذرات در اکوسیستم خاک و اثرات احتمالی آن‌ها بر چرخه عناصر غذایی، فعالیت آنزیمی خاک و سلامت زیستی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. توسعه مدل‌های انتقال و شبیه‌سازی رفتار نانوذرات در خاک و بررسی اثر تجمع آن‌ها در سیستم خاک-گیاه-آب، می‌تواند زمینه‌ساز استفاده ایمن و پایدار از فناوری نانو در کشاورزی باشد (Gardea-Torresdey et al., 2003). درک دقیق رفتار نانوذرات زیستی در خاک و تعامل آن‌ها با میکروبیوم و گیاه، پیش‌شرطی کلیدی برای توسعه کشاورزی نانومقیاس و استفاده ایمن از این فناوری در سیستم‌های زراعی است.

نتیجه‌گیری

سنتز زیستی نانوذرات فلزی با استفاده از ریزجانداران، به‌عنوان رویکردی نوین و سازگار با محیط‌زیست، در دهه‌های اخیر به‌سرعت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این فناوری با بهره‌گیری از مسیرهای متابولیکی طبیعی، جایگزینی ایمن، کم‌هزینه و پایدار برای روش‌های شیمیایی و فیزیکی متداول فراهم می‌سازد و امکان کنترل بر اندازه، مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی نانوذرات را افزایش می‌دهد. با این حال، چالش‌هایی همچون مقیاس‌پذیری فرآیند، یکنواختی در ساختار نانوذرات، و ارزیابی سمیت و پایداری زیست‌محیطی همچنان از موانع اصلی توسعه صنعتی این فناوری به شمار می‌روند. پیشرفت‌های اخیر در زمینه مهندسی ژنتیک ریزجانداران، بهینه‌سازی شرایط سنتز، و طراحی محیط‌های واکنش کنترل‌شده، افق‌های جدیدی را در تولید نانوذرات با عملکردهای چندگانه گشوده است. در بخش کشاورزی، نانوذرات زیستی به‌واسطه قابلیت رهایش کنترل‌شده مواد مغذی، بهبود جذب عناصر، و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، می‌توانند نقشی کلیدی در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی ایفا کنند. همچنین، در حوزه زیست‌پزشکی، از این نانوذرات می‌توان به‌عنوان سامانه‌های دارورسانی هدفمند و عوامل تصویربرداری زیستی بهره‌گرفت. در مجموع، سنتز زیستی نانوذرات فلزی با تلفیق دانش زیست‌فناوری، نانوفناوری و علم مواد، بستری نوین برای طراحی نانو ساختارهای هوشمند و پایدار فراهم کرده است که می‌تواند در آینده‌ای نزدیک به یکی از محورهای اصلی نانوزیست‌فناوری و توسعه پایدار تبدیل شود.

منابع

۱. اشرفی سعیدلو، س.، فتاحی، م.، رسولی صدقیانی، م.ح. (۱۴۰۴). سنتز سبز نانوذرات فلزی با استفاده از عصاره‌های گیاهی: مروری بر مکانیسم‌ها، تنوع گیاهی و کاربردهای زیستی. سومین همایش ملی گیاهان دارویی، کارآفرینی و تجاری‌سازی. ۲۶ شهریور ماه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز. ۱۴۰۰-۱۴۰۸.
2. Abdo, A.M., Fouda, A., Eid, A.M., Fahmy, N.M., Elsayed, A.M., Khalil, A.M.A., Soliman, A. M. (2021). Green synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) by *Pseudomonas aeruginosa* and their activity against pathogenic microbes and common house mosquito, *Culex pipiens*. *Materials*, 14(22), 6983.
3. Al-Zubaidi, S., Al-Ayafi, A., Abdelkader, H. (2019). Biosynthesis, characterization and antifungal activity of silver nanoparticles by *Aspergillus niger* isolate. *Journal of Nanotechnology Research*, 1(1), 023-036.



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



4. Ameen, F., AlYahya, S., Govarthanan, M., ALjahdali, N., Al-Enazi, N., Alsamhary, K., Alharbi, S.A. (2020). Soil bacteria *Cupriavidus* sp. mediates the extracellular synthesis of antibacterial silver nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127233.
5. Ashrafi-Saiedlou, S., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Fattahi, M., Ghosta, Y. (2025a). Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles fabricated using cell-free supernatant of *Pseudomonas fluorescens* for antibacterial, antifungal, antioxidant, and photocatalytic applications. *Scientific Reports*, 15(1), 1018.
6. Ashrafi-Saiedlou, S., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Fattahi, M. (2025b). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Thymus migricus* for multifunctional applications in antioxidant, antimicrobial, photocatalytic, and seed priming processes. *Heliyon*, 11(5).
7. Azam, Z., Ayaz, A., Younas, M., Qureshi, Z., Arshad, B., Zaman, W., Saqib, S. (2020). Microbial synthesized cadmium oxide nanoparticles induce oxidative stress and protein leakage in bacterial cells. *Microbial pathogenesis*, 144, 104188.
8. Bahrulolum, H., Nooraei, S., Javanshir, N., Tarrahimofrad, H., Mirbagheri, V.S., Easton, A.J., Ahmadian, G. (2021). Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), 86.
9. Gardea-Torresdey, J.L., Gomez, E., Peralta-Videa, J.R., Parsons, J.G., Troiani, H., Jose-Yacaman, M. (2003). Alfalfa sprouts: a natural source for the synthesis of silver nanoparticles. *Langmuir*, 19, 1357-1361.
10. Hashem, A.H., Abdelaziz, A.M., Askar, A.A., Fouda, H.M., Khalil, A.M., Abd-Elsalam, K.A., Khaleil, M.M. (2021). *Bacillus megaterium*-mediated synthesis of selenium nanoparticles and their antifungal activity against *Rhizoctonia solani* in faba bean plants. *Journal of Fungi*, 7(3), 195.
11. Kato, Y., Suzuki, M. (2020). Synthesis of metal nanoparticles by microorganisms. *Crystals* 10, 589.
12. Kalimuthu, K., Cha, B.S., Kim, S., Park, K.S. (2020). Eco-friendly synthesis and biomedical applications of gold nanoparticles: A review. *Microchemical Journal*, 152, 104296.
13. Manimaran, K., Murugesan, S., Ragavendran, C., Balasubramani, G., Natarajan, D., Ganesan, A., Seedeivi, P. (2021). Biosynthesis of TiO₂ nanoparticles using edible mushroom (*Pleurotus djamor*) extract: mosquito larvicidal, histopathological, antibacterial and anticancer effect. *Journal of Cluster Science*, 32(5), 1229-1240.
14. Mohd Yusof, H., Mohamad, R., Zaidan, U.H., Abdul Rahman, N.A. (2019). Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of animal science and biotechnology*, 10(1), 57.
15. Molnár, Z., Bóдай, V., Szakacs, G., Erdélyi, B., Fogarassy, Z., Sáfrán, G., Lagzi, I. (2018). Green synthesis of gold nanoparticles by thermophilic filamentous fungi. *Scientific reports*, 8(1), 3943.
16. Nanda, A., Saravanan, M. (2009). Biosynthesis of silver nanoparticles from *Staphylococcus aureus* and its antimicrobial activity against MRSA and MRSE. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 5, 452-456.
17. Nandhini, J.T., Ezhilarasan, D., Rajeshkumar, S. (2021). An ecofriendly synthesized gold nanoparticle induces cytotoxicity via apoptosis in HepG2 cells. *Environmental Toxicology*, 36(1), 24-32.
18. Paramo, L.A., Feregrino-Pérez, A.A., Guevara, R., Mendoza, S., Esquivel, K. (2020). Nanoparticles in agroindustry: Applications, toxicity, challenges, and trends. *Nanomaterials*, 10(9), 1654.
19. Rajivgandhi, G., Gnanamangai, B.M., Prabha, T.H., Poornima, S., Maruthupandy, M., Alharbi, N.S., Li, W. J. (2022). Biosynthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using actinomycetes enhance the anti-bacterial efficacy against *K. Pneumoniae*. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), 101731.



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



20. Singh, A., Gautam, P.K., Verma, A., Singh, V., Shivapriya, P.M., Shivalkar, S., Samanta, S.K. (2020). Green synthesis of metallic nanoparticles as effective alternatives to treat antibiotics resistant bacterial infections: A review. *Biotechnology Reports*, 25, e00427.
21. Yousefzadeh-Valendeh, S., Fattahi, M., Asghari, B., Alizadeh, Z., 2023. Dandelion flower-fabricated Ag nanoparticles versus synthetic ones with characterization and determination of photocatalytic, antioxidant, antibacterial, and α -glucosidase inhibitory activities. *Scientific Reports*, 13(1), 15444.
22. Youssef, K., Hashim, A.F., Hussien, A., Abd-Elsalam, K.A. (2017). *Fungi as Eco synthesizers for nanoparticles and their application in agriculture*. Springer, USA. 20p.

Microorganism-Mediated Synthesis of Metal Nanoparticles: Prospects in Biotechnology and Agriculture

Sanaz Ashrafi-Saeidlou^{1*}

¹ Researcher (Ph.D.), Soil and Water Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran, *sanazashrafi92@yahoo.com

Abstract

Biological synthesis of metallic nanoparticles has emerged as an innovative and environmentally friendly approach that has attracted considerable attention in nanotechnology in recent years. Among the biological systems, microorganisms such as bacteria and fungi are recognized as efficient biofactories for nanoparticle production due to their ability to secrete enzymes, secondary metabolites, and natural reducing agents. These systems enable the synthesis of nanoparticles with controllable size, shape, and stability while eliminating the need for hazardous chemicals and reducing production costs, thereby providing sustainable and scalable alternatives. Biologically synthesized metallic nanoparticles exhibit broad applications in various fields including medicine, pharmaceuticals, environmental remediation, and particularly agriculture. In agroecosystems, such nanoparticles can act as nano-fertilizers, plant growth promoters, and agents for disease management, thus contributing to enhanced crop productivity. Nevertheless, challenges such as process optimization, production standardization, precise control of physicochemical properties, and comprehensive biosafety assessment remain to be addressed. This review aims to discuss the biological mechanisms underlying microbial synthesis of metallic nanoparticles, while highlighting their potentials, limitations, and future perspectives in biotechnology and agriculture.

Keywords: Biological synthesis, Metallic nanoparticles, Microorganisms, Biotechnology, Sustainable agriculture