

رویکردهای نانوتکنولوژی قارچی در سنتز نانوذرات چندفلزی با کاربردهای کشاورزی

Myconanotechnology Approaches for the Synthesis of Multi-Metallic Nanoparticles with Agricultural Applications

زینب بهمنی^{۱*}، لیلا بادبروت^۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۱

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۹

چکیده

نانوتکنولوژی قارچی به عنوان یک رویکرد زیستی نوین و پایدار در سنتز نانوذرات فلزی، معدنی و چندفلزی، نقش مهمی در توسعه کشاورزی پایدار و صنایع مرتبط ایفا می کند. در این رویکرد، قارچها با استفاده از مکانیسمهای بیوشیمیایی اختصاصی خود، از جمله آنزیمهای کاهنده، متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات پروتئینی، موجب احیای یونهای فلزی و تشکیل نانوذراتی با پایداری بالا و سازگاری زیستی می شوند. سنتز نانوذرات قارچی عمدتاً از طریق دو مسیر درون سلولی و برون سلولی انجام می گیرد که مسیر برون سلولی به دلیل سهولت جداسازی و بازده بالاتر، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. نوع گونه قارچی، شرایط کشت، pH، دما و نوع پیش ماده فلزی یا چندفلزی، از عوامل مؤثر بر اندازه، شکل و ویژگیهای فیزیکوشیمیایی نانوذرات به شمار می روند. نانوذرات تولید شده کاربردهای گسترده‌ای در حذف آلاینده‌های محیطی، تولید نانوکودها و آفت کش‌های هوشمند، دارورسانی و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارند. با وجود مزایای قابل توجه، چالش‌هایی در زمینه مقیاس پذیری صنعتی، کنترل کیفیت و ارزیابی اثرات زیست محیطی همچنان وجود دارد که لزوم انجام پژوهش‌های بیشتر برای بهینه سازی این رویکرد را نشان می دهد. چشم انداز آینده نانوتکنولوژی قارچی بر تأمین امنیت غذایی، حفاظت از محیط زیست و توسعه اقتصاد زیستی پایدار استوار است.

واژگان کلیدی: نانوذره اکسید فلزی، نانو ذره سه فلزی، نانوکامپوزیت‌ها، نقاط کوانتومی، کاربردهای کشاورزی

مقدمه

نانوتکنولوژی علم دستکاری ماده در مقیاس اتمی و مولکولی است که تحولی اساسی در حوزه‌های مختلف علمی ایجاد کرده است (Singh et al., 2024a). این فناوری امکان ساخت نانوذراتی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر با خواص منحصر به فرد را می دهد. روش‌های سنتی سنتز نانوذرات، شامل روش‌های فیزیکی و شیمیایی، از کارایی بالایی برخوردار هستند. اما این روش‌ها معمولاً از مواد شیمیایی خطرناک استفاده می کنند که اثرات نامطلوبی بر محیط زیست به جا می گذارند (Šebesta et al., 2022). در نتیجه، توجه به سنتز نانوذرات با رویکردهای شیمی سبز و استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی به عنوان جایگزین‌های پایدار در حال افزایش است (Zanbili and Poursattar Marjani, 2025). مایکونانوفناوری به عنوان یک رویکرد جدید از نانوبیوتکنولوژی، بر استفاده از قارچها برای سنتز نانومواد تمرکز دارد. ویژگی‌هایی مانند تحمل فلزی بالا، رشد آسان و قابلیت مدیریت زیست توده، قارچها را برای تولید نانوذرات بسیار مناسب می سازد. این فرایند که بخشی از زیست سنتز محسوب می شود، تحت تأثیر متابولیسم و ترکیبات مولکولی منحصر به فرد قارچها قرار دارد. در نتیجه، نانوذراتی با پایداری بالاتر و خواص متمایز نسبت به سایر فرایندهای زیستی تولید

۱- استادیار، گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

نویسنده مسئول مکاتبات: z.bahmani@ilam.ac.ir

می‌شوند (Durán *et al.*, 2023). قارچ‌ها مجموعه‌ای متنوع از آنزیم‌ها و متابولیت‌های ثانویه را تولید می‌کنند که در فرایند مایکوسنتز به‌عنوان عوامل کاهنده (کاهش‌دهنده یون‌های فلزی) و همچنین به‌عنوان عوامل پوشاننده (capping agents) عمل می‌کنند و موجب تبدیل نمک‌های فلزی به نانومواد می‌شوند (Abdel-Aziz *et al.*, 2018). نقش عوامل پوشاننده در حفظ پایداری نانوذرات حیاتی است، زیرا از تجمع آن‌ها جلوگیری کرده و با افزایش قابلیت انحلال، عملکردشان را بهبود می‌بخشند (Saravanan *et al.*, 2021). یکی از مزایای اصلی مایکوسنتز، عدم نیاز به عوامل پوشاننده خارجی است، زیرا قارچ‌ها به‌طور طبیعی مولکول‌هایی با نقش‌های کاهنده و پوشاننده ترشح می‌کنند که موجب پایداری نانوذرات می‌شود (Pradhan and Turner, 2023). از نظر صنعتی، قارچ‌ها به‌راحتی در مقیاس بزرگ کشت می‌شوند و سازگاری بالایی با شرایط محیطی دارند. این ویژگی‌ها، مایکوسنتز را به راهکاری عملی و پایدار برای تولید مقیاس‌پذیر نانومواد تبدیل کرده است (Azizi *et al.*, 2025). شبکه میسلومی قارچ‌ها به دلیل استحکام بالا، توانایی تحمل جریان‌ها و هم‌زدن‌های شدید در بیوراکتورها را دارد (Saravanan *et al.*, 2021). همچنین، سطح خارجی گسترده میسلوم باعث تعامل مؤثرتر با نمک‌های فلزی و تسریع در فرایند تشکیل نانومواد می‌شود (Babaniyi *et al.*, 2023). قارچ‌های رشته‌ای (Filamentous Fungi) سطح تماس بیشتری فراهم می‌کنند. این ویژگی باعث آزادسازی مقادیر بیشتری پروتئین و متابولیت برای کاهش یون‌های فلزی می‌شود. در نتیجه، کارایی تبدیل این یون‌ها به نانومواد افزایش می‌یابد. همچنین، این قارچ‌ها توانایی بالایی در جذب و تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین دارند. همین ویژگی، نقش آن‌ها را در این حوزه برجسته می‌سازد (Madhavi *et al.*, 2023). ساختار منشعب هیف‌ها نیز به‌عنوان یک قالب ایده‌آل برای تشکیل نانومواد عمل می‌کند، زیرا گروه‌های عاملی متصل‌شونده به فلز در دیواره سلولی و پلیمرهای خارج سلولی، شرایط مناسبی برای جوانه‌زنی و رشد نانومواد ایجاد می‌کنند (Li *et al.*, 2022). با وجود پژوهش‌های قبلی در مورد سنتز نانوذرات میکروژنیک، این مرور بر روی مسیره‌های گوناگون سنتز و انواع نانوذره‌های قارچی تمرکز دارد و نقش عوامل فیزیکوشیمیایی در فرایند سنتز را بررسی می‌کند. در پایان، ضمن بررسی چالش‌های موجود، مزایا و چشم‌اندازهای آینده نانوذرات قارچی مورد بحث قرار می‌گیرد (Oyebamiji *et al.*, 2025; Adeleke *et al.*, 2024).

مسیره‌های بیوسنتز نانوذرات قارچی

مایکوسنتز نانوذرات از طریق واکنش زیست‌توده قارچی با محلول‌های نمک فلزی صورت می‌گیرد و دو مسیر اصلی برون‌سلولی و درون‌سلولی برای آن پیشنهاد شده است. در مسیر برون‌سلولی، فیلتراسیون قارچ حاوی متابولیت‌ها با نمک فلزی واکنش داده و منجر به تشکیل نانوذرات می‌شود که معمولاً با تغییر رنگ فیلتراسیون قابل مشاهده است (Mandal *et al.*, 2006). آنزیم‌هایی مانند NADH و نیترات ردوکتاز در انتقال الکترون و سنتز نقش دارند (Hietzschold *et al.*, 1999). یون‌های فلزی به‌عنوان عامل استرس‌زا، ترشح متابولیت‌ها و آنزیم‌های کاهش‌دهنده را تحریک می‌کنند که بقای قارچ را از طریق کاهش یون‌های فلزی (مانند نقره) بهبود می‌بخشند (Adebayo-Tayo *et al.*, 2019). همچنین، پروتئین‌ها از طریق پیوندهای کووالانسی یا الکترواستاتیکی با یون‌های فلزی برهم‌کنش کرده و موجب احیا و پایداری آن‌ها می‌شوند (Singh *et al.*, 2014). مسیر برون‌سلولی رایج‌تر است و در آن نانوذرات نقره، طلا، آهن، و اکسید روی توسط گونه‌های مختلفی مانند *Penicillium citrinum*، *Agaricus bisporus* و *Aspergillus fumigatus* سنتز شده‌اند (Honary *et al.*, 2013; Mathur *et al.*, 2021).

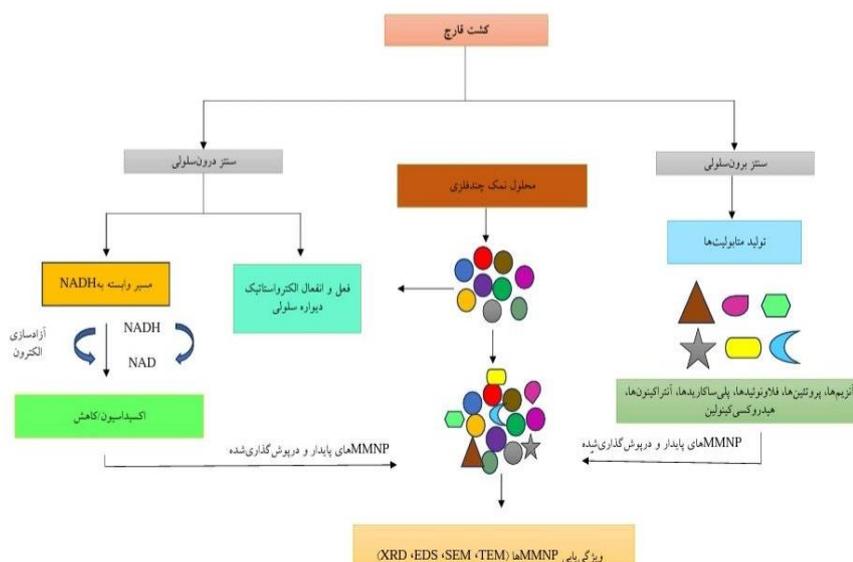
مسیر درون‌سلولی، که مطالعات کمتری درباره آن گزارش شده، شامل تشکیل نانوذرات روی سطح میسلوم است که عمدتاً ناشی از جذب یون‌های فلزی مثبت توسط بارهای منفی گروه‌های کربوکسیلیک و آمینی پروتئین‌های سطحی است (Chauhan *et al.*, 2023). نانوذرات تولید شده از این مسیر معمولاً کوچک‌تر هستند (Yadav *et al.*, 2015)، اما سختی مراحل پایین‌دستی، این روش را محدود ساخته است. در نتیجه، مسیر برون‌سلولی به دلیل سهولت و سرعت سنتز ناشی از ترشح انبوه آنزیم‌ها، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Bhainsa and D'Souza, 2006). قارچ‌ها توانایی تولید نانوذرات فلزی و نیمه‌هادی گسترده‌ای از جمله Ag، Au، CdS/CdSe، Pt، ZnO، Fe₃O₄، TiO₂، SiO₂، و نقاط کوانتومی CdS/CdSe را دارند (Li *et al.*, 2022). به‌طور خاص، گونه‌هایی مانند *Fusarium oxysporum* در بیوسنتز نانوذرات طلا، نقره و نقاط

کوانتومی شناخته شده‌اند، در حالی که گونه‌هایی نظیر *Trichoderma* و *Aspergillus* نیز در سنتز نانوذرات نقره و طلا فعال هستند (Sidhu et al., 2025a; Rai et al., 2021).

مکانیسم سنتز نانوذرات با استفاده از قارچ‌ها

سنتز نانوذرات با واسطه قارچ‌ها فرایند زیستی پیچیده‌ای است که در آن آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌های ترشح شده نقش اصلی را در احیای یون‌های فلزی ایفا می‌کنند؛ این فرایند به شبکه‌ای از مولکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و بیوممبران‌ها متکی است. آنزیم‌های کلیدی در این میان، ردوکتاز وابسته به NADH و نیترات ردوکتاز هستند (Singh et al., 2024b). فعالیت این آنزیم‌ها به pH محیط حساس است؛ به طوری که در محیط‌های اسیدی عملکرد اکسیدوردوکتازی و در شرایط قلیایی، نقش ردوکتازی از خود نشان می‌دهند (Gade et al., 2010). قارچ‌ها توانایی احیای یون‌های فلزی را هم در خارج سلول و هم درون سلول دارند. برای مثال، *Fusarium oxysporum* با ترشح آنزیم‌ها نانوذرات نقره را به صورت برون‌سلولی تولید می‌کند (Azadani et al., 2024). در حالی که *Aspergillus flavus* یون‌های طلا را جذب کرده و با استفاده از نیترات ردوکتاز، نانوذرات طلای درون‌سلولی تولید می‌نماید (Abu-Tahon et al., 2020).

برخی قارچ‌ها با سنتز آنزیم‌های اختصاصی، فرایند را تسهیل می‌کنند؛ مانند *Trichoderma reesei* که با ترشح آنزیم‌های ویژه، یون‌های نقره را احیا می‌کند (Gemishev et al., 2022). همچنین، توانایی دوگانه به‌عنوان عامل کاهنده و پایدار کننده در برخی گونه‌ها مشاهده شده است. به‌عنوان مثال *Penicillium fellutanum* یون‌های تیتانیوم را به نانوذرات TiO_2 تبدیل کرده و هم‌زمان آن‌ها را با پروتئین‌های ترشح شده پوشش داده و پایدار می‌سازد (Kathiresan et al., 2009). این مکانیسم‌های زیستی نشان می‌دهند که تفاوت در نوع قارچ و شرایط محیطی (مانند pH) مستقیماً بر مسیر سنتز (برون‌سلولی یا درون‌سلولی) و نوع نانوذره حاصل تأثیر می‌گذارد (شکل ۱).



شکل ۱- سنتز نانوذرات چند فلزی (MMNPs) با واسطه قارچ‌ها از طریق مسیرهای خارجی و درون‌سلولی آنزیم‌ها، پروتئین‌ها، و متابولیت‌های ترشح شده توسط قارچ در محیط برون‌سلولی به عنوان عوامل کاهنده، پایدارکننده، و پوشاننده عمل می‌کنند و سنتز MMNPs را تسهیل می‌نمایند. در رویکرد درون‌سلولی، یون‌های فلزی در داخل سلول‌های قارچی زیست‌انباشت می‌شوند، جایی که فرایندهای آنزیمی و متابولیکی باعث کاهش یون‌ها و تولید MMNPs می‌گردند. این نانوذرات سپس از زیست‌توده قارچی استخراج می‌شوند.

Fig. 1. Fungi-mediated synthesis of multimetallic nanoparticles (MMNPs) via extracellular and intracellular pathways. In the extracellular route, enzymes, proteins, and secondary metabolites secreted by fungi into the surrounding medium function as reducing, stabilizing, and capping agents, thereby facilitating the formation of MMNPs. In the intracellular approach, metal ions are bioaccumulated within fungal cells, where enzymatic and metabolic processes drive their reduction and subsequent MMNP formation. The synthesized nanoparticles are then recovered from the fungal biomass.

نقش گونه‌های قارچی و شرایط کشت

گونه‌های قارچی، شرایط کشت و نوع بستر از عوامل کلیدی در سنتز نانوذرات به شمار می‌روند، زیرا این فرایند حاصل تعامل پیچیده میان عناصر متعدد است (Adeleke *et al.*, 2024). از آنجا که گونه‌ها و جنس‌های مختلف توانایی متفاوتی در کاهش پیش‌سازهای فلزی دارند، انتخاب گونه قارچی مناسب اهمیت زیادی دارد. هر گونه، به دلیل متابولیسم و دستگاه آنزیمی خاص خود، می‌تواند نانوذراتی با اندازه‌ها و اشکال گوناگون تولید کند، موضوعی که در مطالعات مختلف نیز تأیید شده است (Srivastava and Bhargava, 2021). گونه‌های قارچی منابع ارزشمندی برای سنتز نانوذرات به شمار می‌روند و در گروه‌های تاکسونومیکی متنوع قرار می‌گیرند. ویژگی نانومواد تولید شده بستگی به نوع پیش‌سازهایی دارد که هر گونه توانایی استفاده از آن‌ها را دارد (Rai and Golinka, 2023). یکی دیگر از عوامل مهم در سنتز نانوذرات، نوع بستر مورد استفاده برای کشت قارچ است. ترکیب بستر علاوه بر دسترسی به پیش‌سازهای شیمیایی، بر پایداری و زیست‌سازگاری نانومواد نیز اثرگذار است. دلیل این امر آن است که بسترهای مختلف، ترکیب‌های تغذیه‌ای و پیام‌های متابولیکی متفاوتی ایجاد می‌کنند و همین تفاوت می‌تواند بر پاسخ قارچ و در نهایت بر ویژگی‌های نانومواد تولیدی اثر بگذارد (Priyadarshini *et al.*, 2021). شرایط کشت قارچ‌ها نیز نقش اساسی در سنتز نانوذرات ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال عواملی چون pH، دما و میزان دسترسی به مواد غذایی تأثیر قابل‌توجهی بر این فرایند دارند. بنابراین بهینه‌سازی محیط کشت متناسب با نیازهای گونه انتخابی، برای دستیابی به نانوذرات با کیفیت مطلوب ضروری است (Carrapiço *et al.*, 2023). همچنین، روش‌های مختلف تهیه عصاره قارچی مانند اتوکلاو کردن، فیلتراسیون، جوشاندن یا سانتریفوژ، بر میزان آزادسازی پروتئین‌ها و پیش‌سازهای آنزیمی اثر می‌گذارند و به همین دلیل بر سنتز و تکرارپذیری نانوذرات میکروژنیک مؤثر هستند (Silva *et al.*, 2016). اندازه و شکل نانومواد علاوه بر گونه قارچی، به نوع نمک‌های فلزی مورد استفاده نیز وابسته است. به‌عنوان مثال، نانوذرات ZnO با اشکال مخروطی، مکعبی و کروی و در بازه اندازه‌های ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با استفاده از نمک‌های نیترات روی، سولفات روی و کلرید روی سنتز شده‌اند (Moormann and Bachand, 2021). بنابراین، درک دقیق تعامل میان بستر و قارچ برای طراحی و استانداردسازی فرایند سنتز نانوذرات با ویژگی‌های مطلوب، ضرورتی اساسی دارد.

تأثیر عوامل فیزیکی شیمیایی بر سنتز نانوذرات قارچی

ویژگی‌های اصلی نانوذرات سنتز شده توسط قارچ‌ها، شامل اندازه، شکل، مورفولوژی، نرخ سنتز و بازده، تابعی از عوامل فیزیکی شیمیایی محیط مانند pH، دما، غلظت ترکیبات پیش‌ساز ماده و زمان واکنش هستند (Rezghi Rami *et al.*, 2024). pH محیط تأثیر حیاتی بر اندازه، شکل و پایداری نانوذرات دارد، زیرا تعامل قارچ با محلول‌های نمکی و فعالیت‌های آنزیمی را تنظیم می‌کند (Priyadarshini *et al.*, 2021). محیط‌های قلیایی ملایم معمولاً شرایط بهینه را فراهم کرده و منجر به تولید ذرات کوچک‌تر، یکنواخت‌تر و پایدارتر می‌شوند؛ در حالی که pH خفیف بالا یا خیلی پایین منجر به افزایش اندازه و کاهش پایداری می‌گردد (Al-Khattaf, 2021؛ Azizi *et al.*, 2025). دما نیز سرعت کاهش یون‌های فلزی را افزایش می‌دهد که در صورت افزایش بیش از حد، می‌تواند منجر به دناوره شدن آنزیم‌ها و کاهش پایداری نانوذرات شود؛ به‌عنوان مثال، در *Aspergillus sydowii* افزایش دما تا ۵۰ درجه سلسیوس تولید AgNPs را افزایش داد، اما در ۶۰ درجه کاهش یافت (Wang *et al.*, 2021). علاوه بر این، غلظت پیش‌سازها نقش مهمی در نرخ سنتز و اندازه ذرات دارد؛ غلظت‌های پایین سنتز را کند کرده و غلظت‌های بیش از حد می‌توانند منجر به تجمع و ویژگی‌های نامطلوب شوند. شدت جذب پلاسمون سطحی مستقیماً با غلظت نمک مرتبط است. غلظت‌های بهینه برای سنتز AgNPs در گونه‌های مختلف شامل ۱ میلی‌مولار در *Aspergillus terreus*، ۱/۵ میلی‌مولار در *Fusarium oxysporum* و ۴ میلی‌مولار در *Cladosporium sp.* گزارش شده است (Ameen, 2022؛ Birla *et al.*, 2013؛ Azizi *et al.*, 2025). زمان انکوباسیون نیز تعیین‌کننده است؛ دوره‌های کوتاه سنتز را کاهش می‌دهند، در حالی که دوره‌های طولانی ممکن است محلول را اشباع کنند و به همین دلیل، کنترل دقیق این عامل برای بهینه‌سازی تولید ضروری است. افزایش حجم فیلتر قارچی نیز به نوبه خود نرخ سنتز را افزایش می‌دهد (Azizi *et al.*, 2025).

انواع نانوذرات سنتز شده توسط قارچ‌ها

قارچ‌ها قادرند دامنه وسیعی از نانوذرات را تولید کنند که شامل نانوذرات فلزی (تک‌فلزی، دو فلزی و سه فلزی)، نانوذرات اکسیدی، نقاط کوانتومی، و همچنین نانوذرات هیبریدی و کامپوزیتی است. چنین تنوعی در محصولات نانویی موجب شده است که نانوذرات قارچی نه تنها در حوزه پزشکی و دارورسانی، بلکه در کشاورزی، محیط زیست و صنایع مختلف نیز کاربردهای گسترده‌ای داشته باشند. در ادامه به صورت مفصل به هر کدام از این نانوذرات پرداخته خواهد شد.

نانوذرات فلزی و اکسید فلزی

قارچ‌ها قادر به سنتز نانوذرات فلزی و اکسید فلزی با اندازه‌ها و شکل‌های متنوعی مانند کروی، میله‌ای، شش‌ضلعی و مکعبی هستند. به عنوان نمونه، *Aspergillus niger* نانوذرات کروی آهن (۱۸ نانومتر) و طلا (۱۳ نانومتر) تولید می‌کند (Abdeen et al., 2016; Bhambure et al., 2009). در حالی که *A. japonicus* نانوذرات مکعبی اکسید آهن (۸۲ نانومتر) را سنتز می‌کند (Bhargava et al., 2013). نانوذرات نقره میله‌ای توسط *Trichoderma viride* (Fayaz et al., 2010) و نانوذرات طلا با اشکال مختلف توسط *Verticillium sp.* گزارش شده‌اند (Mukherjee et al., 2001). علاوه بر این، قارچ‌های اندوفیتیک مانند *Aspergillus terreus* قادر به تولید نانوذرات اکسید فلزاتی همچون CuO ، Co_3O_4 ، Fe_3O_4 و NiO هستند (Mousa et al., 2021). مکانیسم‌های پیشنهادی برای این فرایند شامل کاهش زیستی نمک‌های فلزی توسط ماکرومولکول‌های قارچی (Mathur et al., 2021)، جذب زیستی یون‌های فلزی به دیواره سلولی (Busi and Paramanatham, 2018) و کمپلکس شدن فلزات توسط کیتین موجود در دیواره سلولی قارچ است (Wang et al., 2018). نانوذرات حاصل کاربردهای زیستی گسترده‌ای دارند؛ برای مثال، نانوذرات طلا سنتز شده از *Alternaria chlamydospora* دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌باکتریال بودند (Ameen et al., 2023)، و نانوذرات نقره تولید شده توسط قارچ‌های بیمارگر حشرات خاصیت حشره‌کشی علیه آفت *Plutella xylostella* نشان دادند (Santos et al., 2022). تحقیقات اخیر در زمینه سنتز زیستی نانوذرات توسط قارچ‌ها، به دلیل پتانسیل بهبود خواص، به سمت نانوذرات چندفلزی (شامل آلیاژها و ساختارهای هسته-پوسته) گرایش پیدا کرده‌اند (Buchwalter et al., 2015). این نانوذرات بر اساس تعداد فلزات به دسته‌های دوفلزی (bimetallic)، سه‌فلزی (trimetallic) و چهارفلزی (quadrometallic) تقسیم می‌شوند. ترکیب‌های دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی معمولاً با مزایایی نظیر افزایش واکنش‌پذیری شیمیایی، پایداری بالاتر، و بهبود خواص نوری و کاتالیزوری همراه هستند که آن‌ها را به عنوان مواد پیشرفته برای کاربردهای علمی، صنعتی و پزشکی مطرح می‌سازد (Zhang et al., 2017; Basavegowda and Baek, 2021). سنتز این نانوذرات معمولاً از طریق روش‌هایی مانند کاهش همزمان (co-reduction) یا کاهش مرحله‌ای (successive reduction) انجام می‌شود تا خواص منحصر به فردی نسبت به نانوذرات تک‌فلزی حاصل شود (Sumbal et al., 2019).

نانوذرات چندفلزی تولید شده با واسطه قارچ‌ها از مزایای ساختاری مهمی برخوردارند؛ آن‌ها معمولاً اندازه کوچک‌تر، نسبت سطح به حجم بالاتر و واکنش‌پذیری سطحی بیشتری دارند. این ویژگی‌ها به نوبه خود امکان ایجاد تعداد بیشتری مکان فعال برای کاتالیز و جذب سطحی را فراهم کرده و منجر به بهبود انتقال الکترون و تسریع واکنش‌های شیمیایی می‌گردد (Zhao et al., 2024). با وجود این پیشرفت‌ها، تمرکز پژوهشی بیشتر بر نانوذرات دوفلزی و سه‌فلزی بوده است و مطالعات پیرامون نانوذرات چندفلزی تولید شده توسط قارچ‌ها در مراحل اولیه قرار دارد. بنابراین، برای درک کامل سیر تحول ساختاری، میزان پایداری و ویژگی‌های عملکردی این مواد در کاربردهای مختلف، نیاز به انجام تحقیقات گسترده و جامع‌تری احساس می‌شود.

نانوذرات قارچی دوفلزی (Bi-metallic nanoparticles)

نانوذرات دوفلزی، ساختارهایی در مقیاس نانو هستند که از دو فلز مختلف تشکیل شده‌اند. این نانوذرات به واسطه ترکیب فلزات، دارای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی منحصر به فردی هستند. فعالیت زیستی بالای آن‌ها عمدتاً ناشی از برهمکنش مثبت بین دو فلز تشکیل‌دهنده است که بر ساختار، قدرت پیوند و واکنش‌پذیری نانوذره تأثیر

می‌گذارد (Sharma *et al.*, 2019). از جمله نانوذرات دوفلزی شناخته شده می‌توان به Au/Pd, Au/Pt, Ag/Cu, Ag/Au و Fe₃O₄/ZnO به واسطه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود، از فعالیت‌های ضدباکتریایی قابل توجهی برخوردارند. علاوه بر این، امکان کنترل دقیق بر اندازه، شکل و ریخت‌شناسی این نانوذرات زمینه‌ساز بهبود ویژگی‌های سطحی و افزایش نسبت سطح به حجم آن‌ها می‌شود. این ویژگی می‌تواند منجر به ارتقای کارایی در برهم‌کنش با میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه افزایش اثرات ضدباکتریایی گردد. از این‌رو، نانوذرات دوفلزی نه تنها در حوزه پزشکی، بلکه در زمینه‌های متنوعی همچون کاتالیز و حفاظت محیط‌زیست نیز به‌عنوان گزینه‌هایی کارآمد و امیدبخش مطرح می‌شوند (Das and Karankar, 2019). به‌عنوان مثال، قارچ *Candida* توانایی تولید نانوذرات دوفلزی Cd/Hg با مورفولوژی کروی و قطر تقریبی ۱۰ نانومتر را دارد. این نانوذرات Cd₄HgS₅ به دلیل ترکیب خاص و ابعاد نانومتری، ویژگی‌های قابل توجهی برای کاربردهای گوناگون نشان داده‌اند (Romero-Núñez *et al.*, 2019). در مطالعه‌ای دیگر، زیست‌توده قارچ *Trichoderma reesei* برای کاهش زیستی یون‌های نقره و طلا به‌کار گرفته شد و در نتیجه نانوذره دو فلزی Au-Ag سنتز شدند. این نانوذرات با توجه به اثرات افزایشی دو فلز، فعالیت ضدباکتریایی بالایی در برابر بیمارگرهای بیمارستانی نشان دادند (Singh *et al.*, 2014). همچنین، سنتز نانوذرات دوفلزی Ag-Au و نانوذرات تک‌فلزی با استفاده از قارچ *Neurospora crassa* گزارش شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که یک گونه قارچی قادر است از طریق مسیره‌های زیستی خود انواع متنوعی از نانومواد یک فلزی و دوفلزی را تولید کند (Castro-Longoria *et al.*, 2011).

نانوذرات سه‌فلزی (Trimetallic Nanoparticles)

نانوذرات سه‌فلزی (TNPs) از ترکیب سه فلز متفاوت ساخته می‌شوند و با اهدافی مانند کاهش مصرف فلزات، بهینه‌سازی نظم اتمی و کنترل دقیق بر اندازه و مورفولوژی طراحی می‌شوند. این نانوذرات در مقایسه با نمونه‌های تک‌فلزی و دوفلزی، از کارایی بالاتری برخوردار هستند. این نوع نانوذرات در حوزه‌های مختلفی مانند پزشکی، ضد میکروبی، کاتالیز، بسته‌بندی فعال مواد غذایی و فناوری‌های حسگری دارای کاربردهای گسترده‌ای هستند (Basavegowda and Baek, 2021). خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد TNPs عمدتاً از اثرات افزایشی و عملکرد چندمنظوره آن‌ها ناشی می‌شود که پتانسیل بالایی را برای استفاده در کاربردهای مختلف فراهم می‌سازد (Zaleska-Medynska *et al.*, 2016). با وجود مزایای چشمگیر، مطالعات مربوط به اثرات ضد میکروبی TNPs نسبت به نانوذرات تک‌فلزی و دوفلزی محدودتر است. با این حال، شواهد نشان می‌دهد که این نانوذرات حتی در غلظت‌های پایین نیز از عملکرد ضدباکتریایی مؤثری برخوردارند و در بسیاری از موارد، عملکردی برتر از نانوذرات تک‌فلزی یا دوفلزی مشابه خود دارند (Das and Karankar, 2019). به‌عنوان مثال نانوذرات Tri-CSZ با استفاده از بیومس فیلتر شده قارچ *Aspergillus niger* AH1 سنتز شدند. در این فرایند، فیلتر بدون سلول قارچ با محلول‌های استات مس، سلنیت سدیم و استات روی ترکیب گردید و تشکیل نانوذرات با تغییر رنگ محلول به سبز تیره تأیید شد. این نانوذرات فعالیت ضدقارچی قابل توجهی علیه گونه‌های *Mucorales* از خود نشان دادند، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن‌ها در کنترل بیولوژیکی قارچ‌ها و توسعه داروهای ضدقارچی است (Gaber *et al.*, 2024) (جدول ۱).

نقاط کوانتومی (Quantum Dots)

علاوه بر نانوذرات فلزی و اکسید فلزی، اخیراً نقاط کوانتومی (QDs) که نوعی نانوذره نیمه‌رسانا با ابعاد بسیار کوچک (۲ تا ۱۰ نانومتر) هستند، نیز به‌وسیله قارچ‌ها سنتز شده‌اند. نقاط کوانتومی به دلیل خواص نوری و الکترونیکی منحصر به فردشان، به‌ویژه در زمینه زیست‌حسگری، تصویربرداری زیستی و دارورسانی، کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند (Choudhary *et al.*, 2021). در این فرآیند، پروتئین‌ها و پپتیدهای قارچی به‌عنوان عامل پوششی عمل کرده و موجب پایداری، آب‌دوستی و زیست‌سازگاری نقاط کوانتومی می‌شوند. یکی از مثال‌های مهم این نوع نانوذره شامل سنتز CdS QDs توسط قارچ *Phanerochaete chrysosporium* است (Chen *et al.*, 2014). همچنین از مثال‌های مهم دیگر نیز می‌توان به سنتز CdS QDs توسط *Rhizopus stolonifera* اشاره کرد (Mareeswari *et al.*, 2016).

CdSe QDs تو سطر *Candida utilis*، در همین راستا سنتز CdS QDs با استفاده از قارچ *Fusarium oxysporum* نیز گزارش شده است (Sandoval-Cardenas et al., 2017)

جدول ۱- نانوذرات چندفلزی MMNPs سنتز شده توسط قارچها، شامل پیکربندیهای ساختاری، ویژگیهای ضروری و کاربردهای آنها در زیست پزشکی، کشاورزی و اصلاح محیط زیست و کاتالیز

Table 1. Fungi-mediated synthesis of multimetallic nanoparticles (MMNPs): structural configurations, key physicochemical properties, and their applications in biomedicine, agriculture, environmental remediation, and catalysis.

منابع	کاربردها	اندازه و خواص نانوذرات	نانوذرات چند فلزی سنتزی	قارچ مورد استفاده	ردیف
Sidhu et al. (2025b)	تولید آنزیمهایی مثل آمیلاز، پروتئاز و لیپاز توانایی تجزیه آلایندهایی مثل رنگها و سموم	18 نانومتر	Au-Ag	<i>Fusarium semitectum</i>	۱
Soliman et al. (2024)	در فرآیندهای صنعتی مثل تخمیر و تولید آنزیم	14-8 نانومتر	Au/Ag	<i>Fusarium oxysporum</i>	۲
Chen et al. (2014)	آنزیمها (مثل اینورتاز) و متابولیت های ثانویه	سنتز درون سلولی با قطر 10 نانومتر	Cd ₄ HgS ₅	<i>Candida Species</i>	۳
Castro-Longoria et al. (2011)	تولید اتانول زیستی، و تجزیه پسماندهای گیاهی	با قطر متوسط 32 نانومتر	Ag/Au	<i>Neurospora crassa</i>	۴
Syed et al. (2021)	فعالیت ضد میکروبی، ضد سرطانی و ضد لیشمانیایی	40-15 نانومتر	α-Ag ₂ S	<i>Humicola sp.</i>	۵
Kumaravel et al. (2021)	فعالیت کشندگی لارو بر روی لاروهای <i>S. frugiperda</i> سن سوم	9.50 نانومتر	ZnO/TiO ₂	<i>Metarhizium anisopliae</i>	۶
Rasheed et al. (2024)	ضدمیکروبی علیه <i>Escherichia coli</i> تولیدکننده ESBL با منشأ دامپزشکی	80-66 نانومتر	Se-BiO-CuO	<i>Talaromyces haitouensis</i>	۷
Abu-Tahon et al. (2024)	عملکرد ترومبولیتیک، ضد تجمع پلاکت و فعالیت ضد توموری	کروی، با قطر متوسط 10-8 نانومتر	Ag/Au	<i>Aspergillus niger</i>	۸
Omran et al. (2024)	فعالیت ضد باکتریایی علیه باکتریهای بیماری زای غذایی و گیاهی		CuO/TiO ₂	<i>Trichoderma viren7s</i>	۹
Gaber et al. (2024)	فعالیت ضد قارچی علیه پاتوژن گیاهی <i>Fusarium oxysporum</i>	92.85 نانومتر	ZnO-CuO	<i>Aspergillus fumigatus</i>	۱۰

نانوکامپوزیتها

نانوکامپوزیتها دسته ای از نانومواد هستند که با پراکنده شدن پرکننده های با اندازه نانو (nanoscale filler) در ماتریس های پلیمری ساخته می شوند. این ساختارها به دلیل سطح ویژه و ظرفیت جذب بالا، کاربردهای گسترده ای در تصفیه فاضلاب، حذف رنگ و آفت کش ها و همچنین زیست پالایی فلزات سنگین دارند (Saberri Riseh et al., 2024). گروه های عاملی موجود در دیواره سلولی قارچها مانند کربوکسیل، کیتین و گلوکانها با نانوذرات فلزی برهم کنش نموده و نانوبیوکامپوزیتها را تشکیل می دهند (Cotica et al., 2018). مطالعات نشان داده است که قارچ *Aspergillus flavus* در ترکیب با نانوذرات Fe₃O₄ قادر به تشکیل نانوبیوکامپوزیت مغناطیسی بوده و در حذف رنگ نساجی Reactive Black 5 مؤثر است، بدون آنکه تغییر قابل توجهی در مورفولوژی هیفها ایجاد کند (Li et al., 2015). علاوه بر این، نانوبیوکامپوزیت های حاصل از *Metarhizium anisopliae* و نانوذرات Fe₃O₄ با روش های هم رسوب گذاری و پلی وینیل الکل سنتز شده و پتانسیل بالایی در زیست پالایی و کنترل آفات نشان داده اند (Chaves et al., 2022). ترکیب نانوذرات نقره با آگزوپلی ساکاریدهای *Rhodotorula mucilaginosa* منجر به تشکیل نانوبیوکامپوزیتی با فعالیت ضد میکروبی و ضد بیوفیلم علیه باکتری های مهمی مانند *E. coli* و *S. aureus* و *P. aeruginosa*

شد (Vazquez-Rodriguez *et al.*, 2020). به علاوه، نانوبیوکامپوزیت مبتنی بر کیتوسان *Pleurotus ostreatus* ظرفیت بالایی در جذب رنگ‌های نساجی مانند *Reactive Orange* نشان داد (Yildirim *et al.*, 2022).

شناسایی ساختاری، ترکیبی و نوری نانوذرات قارچی

شناسایی نانوذرات نقش حیاتی در درک دقیق ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، از جمله اندازه میانگین، شکل ظاهری و ویژگی‌های منحصربه‌فرد سنتز شده، ایفا می‌کند. برای تعیین ساختار بلوری این نانوذرات، از روش‌های مبتنی بر پرتو ایکس مانند پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده می‌شود. به منظور شناسایی ترکیب عنصری و ویژگی‌های سطحی، طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS) به کار گرفته می‌شود که هر دو اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های درونی و سطحی نانوذرات فراهم می‌آورند. علاوه بر روش‌های ساختاری، تحلیل‌های میکروسکوپی برای بررسی ابعاد، ریخت‌شناسی (مورفولوژی) و الگوی توزیع نانوذرات ضروری هستند. در این راستا، تکنیک‌هایی نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری با تفکیک‌پذیری بالا (HRTEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان یک مکمل مهم برای میکروسکوپ‌های الکترونی، طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) به کار می‌رود تا امکان شناسایی ترکیب شیمیایی نواحی مختلف نانوذره، خصوصاً در ساختارهای هسته-پوسته، و مشخص‌سازی توزیع عناصر در سطح نمونه فراهم شود.

برای شناسایی و اندازه‌گیری کمی عناصر در نانوذرات با دقت بالا و در سطوح پایین، از طیف‌سنجی جرمی پلاسمای القایی (ICP-MS) و نسخه تک‌ذره‌ای آن (SP-ICP-MS) استفاده می‌شود که قادر به تعیین دقیق اندازه، تعداد و غلظت عناصر فلزی هستند (Laborda *et al.*, 2014). همچنین، برای بررسی ترکیب و پایداری نانوذرات چندفلزی، از روش‌های نوری مانند طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) استفاده می‌شود که برای تحلیل نانوذرات سطح پیوندی و تعیین ویژگی‌های نوری کاربرد دارد. این روش در مطالعات بر روی نانوذرات نقره (Ag)، طلا (Au) و دوفلزی Ag-Au، باند پلاسمون سطحی (SPR) را آشکار می‌کند؛ برای مثال، باندهای ۴۱۰ نانومتر برای Ag و ۵۳۴ نانومتر برای Au مشاهده شده است، و باند جذبی نانوذرات دوفلزی بین این دو مقدار قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده برهم‌کنش بین فلزات است (Çıplak *et al.*, 2020). با وجود کاربرد گسترده روش‌های فوق، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر در ارزیابی ابعاد و توزیع اندازه نانوذرات، استفاده از روش‌های مکمل ضروری است. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تصاویر با وضوح بالا از شکل و ساختار ذرات ارائه می‌دهد، در حالی که پراکنش نور دینامیکی (DLS) می‌تواند توزیع اندازه ذرات را در حالت معلق در محلول مشخص کند. ترکیب این اطلاعات به‌دست‌آمده از DLS و UV-Vis، همراه با داده‌های میکروسکوپی، یک تصویر جامع و کامل از خصوصیات فیزیکی نانوذرات چندفلزی را برای محققان به ارمغان می‌آورد.

کاربرد نانوذرات قارچی در حذف آلاینده‌های محیط‌زیستی

در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات زیستی به‌ویژه نانوذرات تولید شده توسط قارچ‌ها (مایکونانوذرات) در زمینه حذف آلاینده‌های محیطی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (El-Sayed *et al.*, 2020). نانوذرات نقره، طلا، اکسید روی و سلنیوم که از طریق قارچ‌هایی نظیر *Monascus purpureus*، *Trichoderma longibrachiatum* و *Cladosporium oxysporum* به‌صورت زیستی تولید می‌شوند، توانایی بالایی در حذف آلاینده‌هایی مانند رنگ‌های آلی (متیلن بلو، رودامین B)، فلزات سنگین (مانند کروم، سرب و کادمیوم) و ترکیبات سمی دارند (Mahanty *et al.*, 2019; El-Sayed *et al.*, 2020). نانوذرات حاصل از فرایندهای زیستی دارای سطحی غنی از گروه‌های عاملی پروتئینی هستند که با ایجاد نواحی آب‌گریز، کارایی جذب آلاینده‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهند. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که نانوذرات نقره سنتز شده توسط قارچ‌ها نقش مهمی در تجزیه رنگ‌های صنعتی و کاهش غلظت ترکیبات آلاینده در فاضلاب ایفا می‌کنند. این نانوذرات با عملکرد کاتالیزوری خود، سرعت واکنش‌های تجزیه را افزایش داده و در نتیجه زمان لازم برای حذف آلاینده‌ها را کاهش می‌دهند (Popli *et al.*, 2018). علاوه بر این، استفاده از این نانوذرات می‌تواند به کاهش تولید محصولات جانبی ناخواسته در برخی فرایندهای صنعتی، مانند سنتز پروپیلن اکسید، منجر شود، که این امر نشان‌دهنده نقش مؤثر نانوفناوری مبتنی بر قارچ‌ها در بهبود کارایی

و پایداری فرایندهای صنعتی مختلف است (Popli *et al.*, 2018). از سوی دیگر، استفاده از نانوذرات اکسید آهن و نقره سنتز شده توسط قارچها، در حذف فلزات سنگین از فاضلابهای صنعتی موفقیت آمیز بوده است. بر اساس گزارشهای مختلف در برخی مطالعات تا ۹۰ درصد کروم موجود در پساب حذف شده است (Mahanty *et al.*, 2019). علاوه بر این ویژگیها، هزینههای پایین تولید و زیست‌سازگاری بالا، نانوتکنولوژی قارچی را به‌عنوان یک راهکار نوین، مؤثر و پایدار برای مدیریت آلودگی‌های محیط‌زیستی معرفی می‌کند (Khandel and Shahi, 2018).

نقش نانوذرات قارچی در تحویل هوشمند و مدیریت محصولات در کشاورزی

سنتز زیستی نانوذرات با استفاده از قارچها کاربردهای گسترده‌ای در کشاورزی از جمله تولید نانوکودها، نانوافت‌کشها، نانوعلف‌کشها و نانوحشره‌کشها دارد و در مدیریت تنش‌های زیستی و غیرزیستی مؤثر است (El-Saadony *et al.*, 2022). یکی از رویکردهای نوین، استفاده از کیتوزان به‌عنوان یک پلیمر طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر برای پراکنده کردن مؤثر نانوافت‌کشها و رسوبدهی روی سطوح گیاهی (ساقه‌ها و برگها) است که این امر موجب حفظ طولانی‌مدت مواد شیمیایی، افزایش جذب و فراهمی زیستی ماده مؤثر می‌شود (Bashir *et al.*, 2022). از نظر مکانیزم اثر کودها، نانوذرات با اندازه بسیار کوچک خود، حلالیت و پراکندگی عناصر غذایی را افزایش می‌دهند و با عبور آسان از دیواره سلولی گیاه، نرخ جذب و کارایی نانوکودها و نانوافت‌کشها را بهبود می‌بخشند، که این امر منجر به کاهش اثرات زیست‌محیطی منفی ناشی از تبخیر و آبشویی کودهای شیمیایی سنتزی می‌گردد (Zhu *et al.*, 2025). در مورد آفت‌کشها، نانوذرات به‌دلیل کپسوله‌سازی یا اتصال ماده مؤثره، قابلیت هدفمندی بالا، انتقال دقیق به محل هدف و کاهش اثرات ناخواسته را فراهم می‌کنند. آزادسازی کنترل‌شده و تدریجی آفت‌کشها باعث پایداری و اثربخشی طولانی‌مدت شده و نیاز به تکرار مصرف و آلودگی خاک و روانابها را کم می‌کند (Wahab *et al.*, 2024). نانوکودها نیز با کپسوله‌سازی یا کلاته‌سازی عناصر، آزادسازی تدریجی و مؤثر مواد مغذی را تضمین کرده و با کاهش آبشویی و تبخیر، کارایی را افزایش می‌دهند (Saurabh *et al.*, 2024). علاوه بر این، نانوسنسورها ابزارهایی برای پایش شاخص‌هایی مانند حاصلخیزی خاک، میزان مواد مغذی و سطح آلودگی فراهم می‌سازند که این امر مدیریت مزرعه را به‌صورت هدفمند و کارآمدتر می‌سازد (Yadav *et al.*, 2023).

چالش‌ها و فرصت‌ها در توسعه سنتز نانوذرات با استفاده از قارچها

توسعه سنتز نانوذرات با استفاده از قارچها، هم‌زمان با ارائه فرصت‌های جدید در زمینه‌های مختلف، با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین چالشها، بهینه‌سازی فرایند تولید نانوذرات به‌صورت اختصاصی برای هر گونه قارچی در مقیاس صنعتی است (Tijani *et al.*, 2024). عواملی مانند ترکیب بستر کشت، شرایط محیطی (شامل دما، pH، رطوبت و نور) و تفاوت‌های متابولیکی میان قارچها می‌توانند منجر به تغییراتی در اندازه، شکل و بازده نهایی نانوذرات شوند. کنترل دقیق این شرایط در مقیاس بزرگ نیازمند زیرساخت‌های پیشرفته و سیستم‌های پایش مداوم است. افزایش مقیاس تولید ممکن است با مشکلاتی مانند آلودگی میکروبی همراه باشد که نه‌تنها کیفیت نانوذرات را کاهش می‌دهد، بلکه هزینه‌ها را نیز افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، تولید نانوذراتی با ویژگی‌های یکنواخت (از نظر اندازه و شکل) در سطح صنعتی نیازمند فناوری‌های دقیق و پرهزینه‌ای است. همچنین، کاهش زمان سنتز بدون افت کیفیت، اگرچه برای صنعت مهم است، اما ممکن است بر کارایی نهایی نانوذرات اثر منفی بگذارد (Viriato *et al.*, 2024). یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از نانوذرات مایکروژنیک، فرایند استخراج و تصفیه آن‌ها از توده زیستی قارچی است. روش‌هایی مانند سانتریفیوژ و فیلتراسیون، هرچند در مقیاس آزمایشگاهی کارایی مطلوبی دارند، اما در مقیاس صنعتی با پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های بالا مواجه می‌شوند. علاوه بر این، راه‌اندازی زیرساخت‌های گسترده برای کشت و فرآوری قارچها نیازمند سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه است. ایمنی کاربرد نانوذرات قارچی در حوزه‌هایی مانند کشاورزی، پزشکی و محیط‌زیست باید با استفاده از آزمون‌های دقیق و تحت نظارت مقررات سخت‌گیرانه بررسی شود (Wahab *et al.*, 2024). نبود درک دقیق از مسیرهای متابولیکی مؤثر در سنتز نانوذرات نیز می‌تواند مانعی برای بهینه‌سازی و توسعه این فناوری باشد. در نهایت، نگرانی‌ها درباره پیامدهای زیستی و زیست‌محیطی بلندمدت نانوذرات ممکن است بر پذیرش آن‌ها تأثیر منفی

بگذارد. با این حال، این فناوری فرصت‌های بسیاری را نیز فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، زیرساخت‌هایی که در صنعت قارچ‌داری در مقیاس وسیع برای تولید مواد غذایی استفاده می‌شوند، می‌توانند پایه‌ای مناسب برای توسعه تولید نانوذرات در مقیاس صنعتی باشند. علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری در زمینه بیوراکتورها و سیستم‌های کشت کنترل‌شده، مسیر تولید انبوه نانوذرات را هموار کرده است (Dey *et al.*, 2024). سنتز نانوذرات با استفاده از قارچ‌ها در مقایسه با روش‌های شیمیایی متداول، انرژی کمتری مصرف می‌کند و نیاز به مواد شیمیایی خطرناک مانند عوامل کاهنده و پایدارکننده را کاهش می‌دهد. این ویژگی‌ها نه تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌اند، بلکه آثار زیست‌محیطی را نیز به حداقل می‌رسانند. همچنین، به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند اتوماسیون، یادگیری ماشینی، کروماتوگرافی پیشرفته، فناوری‌های غشایی و فیلتراسیون می‌تواند بازده فرایند را افزایش داده و مقیاس‌پذیری آن را تسهیل کند. در نهایت، حمایت‌های قانونی و سیاست‌های تشویقی در زمینه توسعه نانوفناوری‌های ایمن و پایدار، می‌توانند نقشی کلیدی در افزایش تقاضا و گسترش کاربرد نانوذرات قارچی ایفا کنند (Sudheer *et al.*, 2022).

نتیجه‌گیری

سنتز نانومواد به‌واسطه قارچ‌ها، چه به‌صورت درون‌سلولی و چه برون‌سلولی، به‌عنوان یک رویکرد کارآمد و سازگار با محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است. این روش توانسته است ظرفیت قابل‌قبولی برای تولید نانومواد با کاربرد در پزشکی، کشاورزی، صنایع غذایی، نساجی و محصولات آرایشی نشان دهد. با این حال، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی نانومواد حاصل به‌شدت به گونه قارچی مورد استفاده و شرایط فیزیکی‌وشیمیایی فرایند وابسته است. عواملی مانند pH، دما، زمان انکوباسیون و غلظت یون‌های فلزی نقش تعیین‌کننده‌ای در اندازه، شکل و پایداری نانوذرات دارند. با وجود پیشرفت‌های اخیر، تعداد گونه‌های قارچی بررسی‌شده همچنان محدود است. علاوه بر این، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی بوده‌اند. اطلاعات اندکی درباره عملکرد نانومواد قارچی در شرایط واقعی و پیچیده محیطی وجود دارد. این خلأ، ضرورت انجام مطالعات نیمه‌میدانی و میدانی را برجسته می‌کند. چنین مطالعاتی برای ارزیابی اثربخشی، پایداری، تکرارپذیری و سرنوشت نانومواد در اکوسیستم‌های طبیعی، به‌ویژه در سامانه‌های کشاورزی و زیست‌پزشکی، ضروری هستند.

درک بهتر مسیرهای مکانیکی و فرایندهای بیوشیمیایی دخیل در میکوسنتز می‌تواند امکان کنترل هدفمند ویژگی‌های نانوذرات را فراهم کند. این شناخت به بهینه‌سازی کاربردهای عملی نانومواد کمک خواهد کرد. در این میان، توجه به دسترسی زیستی نانومواد، میزان آزادسازی یون‌های فلزی و نوع برهم‌کنش آن‌ها با میکروارگانیسم‌های هدف و غیرهدف اهمیت زیادی دارد. این عوامل تأثیر مستقیمی بر کارایی و پیامدهای زیست‌محیطی نانومواد دارند. ترکیبات زیست‌فعال قارچی که در فرایند میکوسنتز به‌عنوان عوامل کاهنده و پایدارکننده عمل می‌کنند، نقش کلیدی در تشکیل نانوذرات دارند. این ترکیبات به دلیل خواص ضد میکروبی، ضدسرطانی و ضدویروسی، می‌توانند فرصت‌های جدیدی برای توسعه نانوداروها و سامانه‌های رهایش هدفمند ایجاد کنند. با این وجود، نگرانی‌هایی درباره اثرات سمی بالقوه نانومواد قارچی بر میکروارگانیسم‌های مفید خاک و سایر اجزای اکوسیستم مطرح است. بنابراین، انجام ارزیابی‌های جامع سمیت، به‌ویژه در بازه‌های زمانی بلندمدت و در سطوح مختلف زنجیره غذایی، اجتناب‌ناپذیر است. در این چارچوب، به‌کارگیری رویکرد «طراحی ایمن» در توسعه و کاربرد نانومواد قارچی اهمیت ویژه‌ای دارد. طراحی سامانه‌های رهایش کنترل‌شده و تدوین چارچوب‌های قانونی و نظارتی متناسب می‌تواند به کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی کمک کند. در نهایت، انتقال موفق این فناوری از آزمایشگاه به صنعت نیازمند حل چالش‌های مقیاس‌پذیری، استانداردسازی فرایندهای تولید، کاهش هزینه‌ها و تضمین یکنواختی و کیفیت محصول نهایی است. تحقق این هدف تنها از طریق رویکردهای میان‌رشته‌ای و با در نظر گرفتن هم‌زمان ایمنی، کارایی و پایداری زیست‌محیطی امکان‌پذیر خواهد بود.

References

منابع

- Abdeen, M., Sabry, S., Ghozlan, H., El-Gendy, A.A. and Carpenter, E.E. 2016.** Microbial-physical synthesis of Fe and Fe₃O₄ magnetic nanoparticles using *Aspergillus niger* YESM1 and supercritical condition of ethanol. *Journal of Nanomaterials* 2016(9): 9174891. <https://doi.org/10.1155/2016/9174891>.
- Abdel-Aziz, S.M., Prasad, R., Hamed, A.A. and Abdelraof, M. 2018.** Fungal Nanoparticles: A Novel Tool for a Green Biotechnology? Pp. 61–87. In: Rai, M. and Golinska, P. (eds.), *Fungal Nanobionics: Principles and Applications*. Springer.
- Abu-Tahon, M.A., Alshammari, F.A., Shahhat, I.M., Ghareib, M. and Abdallah, W.E. 2024.** Eco-friendly synthesis, characterization, and biomedical applications of biosynthesized bimetallic silver-gold nanoparticles by culture supernatant of *Aspergillus niger*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 197: 137-158.
- Adebayo-Tayo, B.C., Ogunleye, G.E. and Ogbale, O. 2019.** Biomedical application of green synthesized silver nanoparticles using the filtrate of *Trichoderma viride*: Anticancer and immunomodulatory potentials. *Polymers in Medicine* 49(1): 57-62.
- Adeleke, B.S., Olowe, O.M., Ayilara, M.S., Fasusi, O.A., Omotayo, O.P., Fadiji, A.E., Onwudiwe, D.C. and Babalola, O.O. 2024.** Biosynthesis of nanoparticles using microorganisms: A focus on endophytic fungi. *Heliyon* 10(1): e39636. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39636>.
- Al-Khattaf, F.S. 2021.** Gold and silver nanoparticles: Green synthesis, microbes, mechanism, factors, plant disease management and environmental risks. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28(6): 3624–3631.
- Ameen, F. 2022.** Optimization of the synthesis of fungus-mediated bi-metallic Ag-Cu nanoparticles. *Applied Sciences* 12(3): 1384. <https://doi.org/10.3390/app12031384>.
- Azadani, F.N., Madani, M., Karimi, J. and Sepahvand, S. 2024.** Green synthesis of silver nanoparticles by *Fusarium oxysporum* and its function against *Aspergillus* and *Fusarium* fungi. *Indian Journal of Microbiology* 64(1): 213-224.
- Azizi, G., Ashengroph, M. and Zorab, M.M. 2025.** Taguchi-Based optimization of nano-silver particle synthesis using fungal extract of *Cladosporium* sp. OP242915. *BioNanoScience* 15: 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12668-024-01620-9>.
- Babaniyi, B.R., Ogundele, O.D., Thompson, S.O. and Aransiola, S.A. 2023.** Microbial Nanomaterial Synthesis: Types and Applications. Pp. 3–28. In: *Microbial nanomaterials: Synthesis, applications, and future perspectives*. Springer.
- Basavegowda, N. and Baek, K.H. 2021.** Multimetallic nanoparticles as alternative antimicrobial agents: Challenges and perspectives. *Molecules* 26(4): 912. <https://doi.org/10.3390/molecules26040912>.
- Bashir, S.M., Ahmed Rather, G., Patricio, A., Haq, Z., Sheikh, A.A., Shah, M.Z., Singh, H., Khan, A. A., Imtiyaz, S. and Ahmad, S.B. 2022.** Chitosan nanoparticles: A versatile platform for biomedical applications. *Materials* 15(19): 6521. <https://doi.org/10.3390/ma15196521>.
- Bhambure, R., Bule, M., Shaligram, N., Kamat, M. and Singhal, R. 2009.** Extracellular biosynthesis of gold nanoparticles using *Aspergillus niger* – its characterization and stability. *Chemical Engineering*, 167: 1-7.
- Bhargava, A., Jain, N., Barathi, L.M., Akhtar, M.S., Yun, Y.S. and Panwar, J. 2013.** Synthesis, characterization and mechanistic insights of mycogenic iron oxide nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research* 15(11): 1489. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2031-5>.
- Birla, S.S., Gaikwad, S.C., Gade, A.K. and Rai, M.K. 2013.** Rapid synthesis of silver nanoparticles from *Fusarium oxysporum* by optimizing physiocultural conditions. *The Scientific World Journal* 2013, 796018. <https://doi.org/10.1155/2013/796018>.
- Buchwalter, P., Rosé, J. and Braunstein, P. 2015.** Multimetallic catalysis based on heterometallic complexes and clusters. *Chemical Reviews* 115(1): 28–126.
- Busi, S. and Paramanatham, P. 2018.** Metal and Metal Oxide Mycogenic Nanoparticles and their Application as Antimicrobial and Antibiofilm Agents. Pp. 243-271. In: *Fungal Nanobionics: Principles and Applications*. Springer.
- Carrapico, A., Martins, M.R., Caldeira, A.T., Mirao, J. and Dias, L. 2023.** Biosynthesis of metal and metal oxide nanoparticles using microbial cultures: mechanisms, antimicrobial activity and applications to cultural heritage. *Microorganisms* 11, 378. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020378>.
- Castro-Longoria, E., Vilchis-Nestor, A. R. and Avalos-Borja, M. 2011.** Biosynthesis of silver, gold and bimetallic nanoparticles using the filamentous fungus *Neurospora crassa*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 83(1): 42–48.
- Chauhan, A., Anand, J., Parkash, V. and Rai, N. 2023.** Biogenic synthesis: A sustainable approach for nanoparticles synthesis mediated by fungi. *Inorganic Nano-Metal Chemistry* 53(4): 460-473.

- Chaves, T. de O., Bini, R.D., Oliveira Junior, V.A. de, Polli, A.D., Garcia, A., Dias, G.S., Santos, I.A. dos, Nunes de Oliveira, P., Pamphile, J.A. and Cotica, L.F. 2022.** Fungus-based magnetic nanobiocomposites for environmental remediation. *Magnetochemistry* 8(11): 139. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8110139>.
- Chen, G., Yi, B., Zeng, G., Niu, Q., Yan, M., Chen, A., Du, J., Huang, J. and Zhang, Q. 2014.** Facile green extracellular biosynthesis of CdS quantum dots by white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 117: 199-205.
- Choudhary, S., Joshi, B. and Joshi, A. 2021.** Translation of carbon dot biosensors into an embedded optical setup for spoilage and adulteration detection. *ACS Food Science & Technology* 2(6): 1068-1076.
- Ciplak, Z., Getiren, B., Gokalp, C, Yildiz, A. and Yildiz, N. 2020.** Green synthesis of reduced graphene oxide-AgAu bimetallic nanocomposite: Catalytic performance. *Chemical Engineering Communication* 207(4): 559-573.
- Cotica, L.F., Garcia, A., Polli, A.D., Bini, R.D., de Chaves, T., de Oliveira Junior, V.A. and Pamphile, J.A. 2018.** Nanobiocomposites: Synthesis and Environmental Applications. Pp. 451-478. In: *Fungal Biomolecules: Sources, Applications and Recent Developments*. John Wiley Publications.
- Das, P. and Karankar, V.S. 2019.** New avenues of controlling microbial infections through anti-microbial and anti-biofilm potentials of green mono- and multi-metallic nanoparticles: A review. *Journal of Microbiological Methods* 167: 105766. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.105766>.
- Dey, B., Ador, M.A.H., Haque, M.M.U., Ferdous, J., Halim, M.A., Uddin, M.B. and Ahmed, R. 2024.** Strategic insights for sustainable growth of mushroom farming industry in Bangladesh: A comprehensive evaluation using SWOT-AHP and TOPSIS frameworks. *Heliyon* 10(20): e36956.
- Durán, N., De Jesus, M.B., Tasic, L., Fávero, W.J. and Nakazato, G. 2023.** Mechanism of Synthesis of Metal Nanoparticles by Fungi. Pp: 254-280. In: Rai, M. and Golinska, P. (eds.), *Mycosynthesis of Nanomaterials: Perspectives and Challenges*. CRC Press.
- El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.M., Desoky, E.S.M., Babalghith, A.O., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Ebrahim, A.A.M. and Abd El-Mageed, T.A. 2022.** Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science* 13: 946717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717>.
- El-Sayed, E.S.R., Abdelhakim, H.K. and Zakaria, Z. 2020.** Extracellular biosynthesis of cobalt ferrite nanoparticles by *Monascus purpureus* and their antioxidant, anticancer and antimicrobial activities: Yield enhancement by gamma irradiation. *Materials Science and Engineering: C* 107: 110318.
- Fayaz, A.M., Balaji, K., Girilal, M., Yadav, R., Kalaichelvan, P.T. and Venketesan, R. 2010.** Biogenic synthesis of silver nanoparticles and their synergistic effect with antibiotics: A study against gram-positive and gram-negative bacteria. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine* 6(1): 103-109.
- Gaber, S.E., Hashem, A.H., El-Sayyad, G.S. and Attia, M.S. 2024.** Antifungal activity of myco-synthesized bimetallic ZnO-CuO nanoparticles against fungal plant pathogen *Fusarium oxysporum*. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14(20): 25395-25409.
- Gade, A., Ingle, A., Whiteley, C. and Rai, M. 2010.** Mycogenic metal nanoparticles: Progress and applications. *Biotechnology Letters* 32(4): 593-600.
- Gemishev, O., Panayotova, M., Gicheva, G. and Mintcheva, N. 2022.** Green synthesis of stable spherical monodisperse silver nanoparticles using a cell-free extract of *Trichoderma reesei*. *Materials* 15(2): 481. <https://doi.org/10.3390/ma15020481>.
- Hietzschold, S., Walter, A., Davis, C., Taylor, A.A. and Sepunaru, L. 2019.** Does nitrate reductase play a role in silver nanoparticle synthesis? Evidence for NADPH as the sole reducing agent. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 7(9): 8070-8076.
- Honary, S., Barabadi, H., Gharaei-Fathabad, E. and Naghibi, F. 2013.** Green synthesis of silver nanoparticles induced by the fungus *Penicillium citrinum*. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* 12(1): 7-11.
- Kathiresan, K., Manivannan, S., Nabeel, M.A. and Dhivya, B. 2009.** Studies on silver nanoparticles synthesized by a marine fungus, *Penicillium fellutanum* isolated from coastal mangrove sediment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 71(1): 133-137.
- Khan, N.T., Jameel, M. and Jameel, J. 2017.** Silver nanoparticles biosynthesis by *Fusarium oxysporum* and determination of its antimicrobial potency. *Journal of Nanomedicine & Biotherapeutic Discovery* 7(1): 1-5.
- Khandel, P. and Shahi, S.K. 2018.** Mycogenic nanoparticles and their bioprospective applications: Current status and future challenges. *Journal of Nanostructure in Chemistry* 8(4): 369-391.

- Kumaravel, J., Lalitha, K., Arunthirumeni, M. and Shivakumar, M.S. 2021.** Mycosynthesis of bimetallic zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles for control of *Spodoptera frugiperda*. Pesticide Biochemistry and Physiology 178: 104910. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104910>.
- Laborda, F., Bolea, E. and Jiménez-Lamana, J. 2014.** Single particle inductively coupled plasma mass spectrometry: A powerful tool for nanoanalysis. Analytical Chemistry 86(5). <https://doi.org/10.1021/ac402980q>.
- Li, L., Xu, M., Chubik, M., Chubik, M., Gromov, A., Wei, G. and Han, W. 2015.** Entrapment of radioactive uranium from wastewater by using fungus-Fe₃O₄ bio-nanocomposites. RSC Advances 5(52): 41611-41616.
- Li, Q., Liu, F., Li, M., Chen, C. and Gadd, G.M. 2022.** Nanoparticle and nanomineral production by fungi. Fungal Biology Reviews 41: 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.07.003>.
- Ma, M., Zhang, Y., Yu, W., Shen, H.Y., Zhang, H.Q. and Gu, N. 2003.** Preparation and characterization of magnetite nanoparticles coated by amino silane. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 212(2-3): 219-226.
- Madhavi, A., Srinivasulu, M., Shankar, P.C. and Rangaswamy, V. 2023.** Synthesis and Applications of Fungal-Mediated Nanoparticles. Pp. 123-145. In: Silva Montenegro, M.C.B, Maddela, N.R., Prasad, R. and Rodriguez Diaz, J.M. (eds.). Microbial Processes for Synthesizing Nanomaterials. Springer.
- Mahanty, S., Bakshi, M., Ghosh, S., Chatterjee, S., Bhattacharyya, S., Das, P., Das, S. and Chaudhuri, P. 2019.** Green synthesis of iron oxide nanoparticles mediated by filamentous fungi isolated from Sundarban mangrove ecosystem, India. BioNanoScience 9(3): 637-651.
- Mandal, D., Bolander, M.E., Mukhopadhyay, D., Sarkar, G. and Mukherjee, P. 2006.** The use of microorganisms for the formation of metal nanoparticles and their application. Applied Microbiology and Biotechnology 69(5): 485-492.
- Mareeswari, P., Brijitta, J., Etti, S.H., Meganathan, C. and Kaliaraj, G.S. 2016.** *Rhizopus stolonifera* mediated biosynthesis of biocompatible cadmium chalcogenide quantum dots. Enzyme Microbiology and Technology 95: 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.08.016>.
- Mathur, P., Kumawat, M., Nagar, R., Singh, R. and Daima, H.K. 2024.** Tailoring metal oxide nanozymes for biomedical applications: Trends, limitations, and perceptions. Analytical and Bioanalytical Chemistry 416(23): 5965-5984.
- Mathur, P., Saini, S., Paul, E., Sharma, C. and Mehtani, P. 2021.** Endophytic fungi mediated synthesis of iron nanoparticles: Characterization and application in methylene blue decolorization. Current Research in Green and Sustainable Chemistry 4: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100053>.
- Moormann, G.C. and Bachand, G.D. 2021.** Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using fungal filtrates (Report No. SAND2021-11882). Sandia National Laboratories.
- Mousa, S.A., El-Sayed, E.S.R., Mohamed, S.S., Abo El-Seoud, M.A., Elmehlawy, A.A. and Abdou, D.A.M. 2021.** Novel mycosynthesis of Co₃O₄, CuO, Fe₃O₄, NiO, and ZnO nanoparticles by the endophytic *Aspergillus terreus* and evaluation of their antioxidant and antimicrobial activities. Applied Microbiology and Biotechnology 105: 741-753.
- Mukherjee, P., Ahmad, A., Mandal, D., Senapati, S., Sainkar, S.R., Khan, M.I., Parishcha, R., Ajaykumar, P.V., Alam, M., Kumar, R. and Sastry, M. 2001.** Fungus-mediated synthesis of silver nanoparticles and their immobilization. Nano Letters 1(10): 515-519.
- Omran, B.A., Rabbee, M.F., Abdel-Salam, M.O. and Baek, K.H. 2024.** Mycofabrication of bimetal oxide nanoparticles (CuO/TiO₂) using the endophytic fungus *Trichoderma virens*: material properties and microbiocidal effects against bacterial pathogens. Ceramics International 50: 30843-30857.
- Oyebamiji, A.K., Akintelu, S.A., Afolabi, S.O., Ebenezer, O., Akintayo, E.T. and Akintayo, C.O. 2025.** A comprehensive review on mycosynthesis of nanoparticles, characteristics, applications, and limitations. Plasmonics 20(1): 1-19.
- Popli, D., Anil, V., Subramanyam, A.B., Namratha, M.N., Ranjitha, V.R., Rao, S.N., Rai, R.V. and Govindappa, M. 2018.** Endophyte fungi, *Cladosporium* species-mediated synthesis of silver nanoparticles possessing *in vitro* antioxidant, anti-diabetic and anti-Alzheimer activity. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology 46(4): 676-683.
- Pradhan, N. and Turner, R.J. 2023.** Using Fungi to Produce Metal/Metalloid Nanomaterials. Pp. 3-26. In: Rai, M. and Golinska, P. (eds.). Mycosynthesis of Nanomaterials: Perspectives and Challenges. CRC Press.
- Priyadarshini, E., Priyadarshini, S.S., Cousins, B.G. and Pradhan, N. 2021.** Metal-fungus interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles. Chemosphere 274: 129976. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129976>.

- Rai, M., Bonde, S., Golinska, P., Trzcińska-Wencel, J., Gade, A., Abd-Elsalam, K.A., Shende, S., Gaikwad, S. and Ingle, A.P. 2021.** *Fusarium* as a novel fungus for the synthesis of nanoparticles: Mechanism and applications. *Journal of Fungi* 7(2): 139. <https://doi.org/10.3390/jof7020139>.
- Rai, M. and Golinska, P. 2023.** Myconanotechnology: Emerging Trends and Applications. <https://doi.org/10.1201/9781003327356>.
- Rasheed, R., Uzair, B., Raza, A., Binsuwaidan, R. and Alshammari, N. 2024.** Fungus-mediated synthesis of Se-BiO-CuO multimetallic nanoparticles as a potential alternative antimicrobial against ESBL-producing *Escherichia coli* of veterinary origin. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* 14: 1301351.
- Rezghi Rami, M., Meskini, M. and Ebadi Sharafabad, B. 2024.** Fungal-mediated nanoparticles for industrial applications: Synthesis and mechanism of action. *Journal of Infection and Public Health* 17(10): 102536. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2024.102536>.
- Romero Núñez, A., González, G., Romero Ibarra, J.E., Vega González, A., Cruz Jiménez, G. and Hernández Cristóbal, O. 2019.** Synthesis of bimetallic nanoparticles of Cd₄HgS₅ by *Candida* species. *Crystals* 9(2): 61. <https://doi.org/10.3390/cryst9020061>.
- Saberi Riseh, R., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., Tamanadar, E. and Skorik, Y. 2024.** Nanocomposites in agriculture as pesticides for plant protection: A review. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 15(2): 023003. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ad4bad>.
- Sandoval Cárdenas, I., Gómez Ramírez, M. and Rojas Avelizapa, N.G. 2017.** Use of a sulfur waste for biosynthesis of cadmium sulfide quantum dots with *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Materials Science in Semiconductor Processing* 63: 33-39.
- Santos, T.S., de Souza Varize, C., Sanchez Lopez, E., Jain, S.A., Souto, E.B., Severino, P. and Mendonça, M. da C. 2022.** Entomopathogenic fungi mediated AgNPs: Synthesis and insecticidal effect against *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology* 188: 105204. <https://doi.org/10.3390/ma15217596>.
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Karishma, S., Vo, D.V.N., Jeevanantham, S., Yaashikaa, P.R. and George, C.S. 2021.** A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications. *Chemosphere* 264: 128580. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128580>.
- Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A.K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P.K., Jeet, P., Sarkar, B., Upadhyaya, A. and Das, A. 2024.** Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences* 6: 559. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>.
- Šebesta, M., Vojtková, H., Cyprichová, V., Ingle, A.P., Urík, M. and Kolenčík, M. 2022.** Mycosynthesis of metal-containing nanoparticles-Fungal metal resistance and mechanisms of synthesis. *International Journal of Molecular Sciences* 23(3): 14084. <https://doi.org/10.3390/ijms232214084>.
- Sharma, G., Kumar, A., Sharma, S., Naushad, M., Dwivedi, R.P. and Alothman, Z.A. 2019.** Novel development of nanoparticles to bimetallic nanoparticles and their composites: A review. *Journal of King Saud University - Science* 31(2): 257-269.
- Sidhu, A.K., Agrawal, S.B., Verma, N., Kaushal, P. and Sharma, M. 2025a.** Fungal-mediated synthesis of multimetallic nanoparticles: Mechanisms, unique properties, and potential applications. *Frontiers in Nanotechnology* 7: 1549713.
- Sidhu, A.K., Verma, N., Kaushal, P., Agrawal, S.B. and Bhatia, S. 2025b.** Green synthesis of polymeric nanoparticles: Agricultural applications and toxicological implications. *Discover Applied Sciences* 7(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06877-7>.
- Silva, L.P., Bonatto, C.C. and Polez, V.L.P. 2016.** Green Synthesis of Metal Nanoparticles by Fungi: Current trends and challenges. Pp. 219-238. In: Prasad, R. (ed.). *Advances and Applications through Fungal Nanobiotechnology*. Springer.
- Singh, D., Rathod, V., Ninganagouda, S., Hiremath, J., Singh, A.K. and Mathew, J. 2014.** Optimization and characterization of silver nanoparticle by endophytic fungi *Penicillium* sp. isolated from *Curcuma longa* (turmeric) and application studies against MDR *E. coli* and *S. aureus*. *Bioinorganic Chemistry and Applications* 2014: e408021. <https://doi.org/10.1155/2014/408021>.
- Singh, S., Tiwari, H., Verma, A., Gupta, P., Chattopadhyay, A., Singh, A., Singh, S., Kumar, B., Mandal, A., Kumar, R., Yadav, A.K., Gautam, H.K. and Gautam, V. 2024a.** Sustainable synthesis of novel green-based nanoparticles for therapeutic interventions and environmental remediation. *ACS Synthetic Biology* 13(6): 1352-1368. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00206>.
- Singh, V., Pandit, C., Pandit, S., Roy, A., Rustagi, S., Awwad, N.S., Ibrahim, H.A., Anand, J., Malik, S., Yadav, K.K. and Tambuwala, M. 2024b.** Deciphering the mechanisms and biotechnological implications of nanoparticle synthesis through microbial consortia. *Journal of Basic Microbiology* 64(3): e12345.

- Soliman, M.K., Abu-Elghait, M., Salem, S.S. and Azab, M.S. 2024.** Multifunctional properties of silver and gold nanoparticles synthesis by *Fusarium pseudonygamai*. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14(22): 28253–28270.
- Srivastava, S. and Bhargava, A. 2021.** *Green nanoparticles: The future of nanobiotechnology* (1st ed.). Springer.
- Sudheer, S., Bai, R.G., Muthoosamy, K., Tuvikene, R., Gupta, V.K. and Manickam, S. 2022.** Biosustainable production of nanoparticles via mycogenesis for biotechnological applications: A critical review. *Environmental Research* 204: 111963.
- Sumbal, Naem, A., Naz, S., Sarfraz Ali, J., Mannan, A. and Zia, M. 2019.** Synthesis, characterization and biological activities of monometallic and bimetallic nanoparticles using *Mirabilis jalapa* leaf extract. *Biotechnology Reports* 22: e00338. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00338>.
- Syed, A., Al-Saedi, M.H., Bahkali, A.H., Elgorban, A.M., Kharat, M., Pai, K., Ghodake, G. and Ahmad, A. 2021.** Biological synthesis of a-Ag₂S composite nanoparticles using the fungus *Humicola sp.* And its biomedical applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 66: 102770. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102770>.
- Tijani, N.A., Hokello, J., Awojobi, K.O., Marnadu, R., Shkir, M., Ahmad, Z., Afolabi, A.O., Adewinbi, S.A. and Adebayo, I.A. 2024.** Recent advances in mushroom-mediated nanoparticles: A critical review of mushroom biology, nanoparticles synthesis, types, characteristics and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 96: 105695. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105695>.
- Vazquez-Rodriguez, A., Vasto-Anzaldo, X.G., Leon-Buitimea, A., Zarate, X. and Morones-Ramirez, J.R. 2020.** Antibacterial and antibiofilm activity of biosynthesized silver nanoparticles coated with exopolysaccharides obtained from *Rhodotorula mucilaginosa*. *IEEE Transactions on NanoBioscience* 19(3): 498-503.
- Viriato, V. and Carvalho, S.A.D. 2024.** A business model for circular bioeconomy: Edible mushroom production and its alignment with the sustainable development goals (SDGs). *Recycling* 9(4): 68.
- Wahab, A., Muhammad, M., Ullah, S., Abdi, G., Shah, G.M., Zaman, W. and Ayaz, A. 2024.** Agriculture and environmental management through nanotechnology: Eco-friendly nanomaterial synthesis for soil-plant systems, food safety, and sustainability. *Science of the Total Environment* 926: 171862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171862>.
- Wang, D., Xue, B. and Zhou, Y. 2021.** Fungus-mediated green synthesis of nano-silver using *Aspergillus sydowii* and its antifungal/antiproliferative activities. *Scientific Reports* 11: 10356. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89854-5>.
- Wang, L., Liu, X., Lee, D.J., Tay, J.H., Zhang, Y., Wan, C.L. and Chen, X.F. 2018.** Recent advances on biosorption by aerobic granular sludge. *Journal of Hazardous Materials* 357: 253-270.
- Yadav, A., Kon, K., Kratosova, G., Duran, N., Ingle, A.P. and Rai, M. 2015.** Fungi as an efficient mycosystem for the synthesis of metal nanoparticles: Progress and key aspects of research. *Biotechnology Letters* 37(11): 2099-2120.
- Yadav, A., Yadav, K., Ahmad, R. and Abd-Elsalam, K.A. 2023.** Emerging frontiers in nanotechnology for precision agriculture: Advancements, hurdles and prospects. *Agrochemicals* 2(2): 220-256.
- Yildirim, A., Acay, H. and Baran, F. 2022.** Synthesis and characterisation of mushroom-based nanocomposite and its efficiency on dye biosorption via antimicrobial activity. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 102(8): 1545-1562.
- Zaleska-Medynska, A., Marchelek, M., Diak, M. and Grabowska, E. 2016.** Noble metal-based bimetallic nanoparticles: The effect of the structure on the optical, catalytic and photocatalytic properties. *Advances in Colloid and Interface Science* 229: 80-107.
- Zanbili, F. and Poursattar Marjani, A. 2025.** Innovative green and bio-based approaches for photosensitive nanoparticle synthesis: A review on methodologies, characterization, and applications. *Micro and Nano Systems Letters* 13: 3. <https://doi.org/10.1186/s40486-025-00223-7>.
- Zhang, J., Ma, J., Fan, X., Peng, W., Zhang, G. and Zhang, F. 2017.** Graphene supported Au-Pd-Fe₃O₄ alloy trimetallic nanoparticles with peroxidase-like activities as mimic enzyme. *Catalysis Communications* 89: 148-151.
- Zhao, X., Hou, N., Wan, C., Zhang, L. and Liu, X. 2024.** Gold nanoparticles synthesis mediated by fungus isolated from aerobic granular sludge: Process and mechanisms. *Heliyon* 10(6): e28281.
- Zhu, H., Chen, S., Xue, J., Wang, X., Xiao, Z. and Luo, Y. 2025.** Application of nanotechnology in sprouts and microgreens: Current developments and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Research* 19: 101680. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101680>.

Myconanotechnology Approaches for the Synthesis of Multi-Metallic Nanoparticles with Agricultural Applications

Z. Bahmani^{1*} and L. Badborout²

Received: 20 Jul., 2025

Accepted: 12 Sep., 2025

ABSTRACT

Fungal nanotechnology is a novel and sustainable biological approach for the synthesis of metallic, mineral, and bimetallic nanoparticles, with growing importance in sustainable agriculture and related industries. In this approach, fungi employ specific biochemical mechanisms, including reducing enzymes, secondary metabolites, and proteinaceous compounds, to reduce metal ions and form nanoparticles with high stability and biocompatibility. Fungal nanoparticle synthesis occurs through both intracellular and extracellular pathways, with the extracellular route receiving greater attention due to its higher yield and easier recovery. The fungal species, culture conditions, pH, temperature, and the type of metal or bimetallic precursor significantly influence the size, shape, and physicochemical properties of the nanoparticles. These biogenic nanoparticles have wide applications in environmental remediation, the production of nano fertilizers and smart pesticides, drug delivery, and the enhancement of plant resistance to biotic and abiotic stresses. Despite these advantages, challenges related to industrial scalability, quality control, and environmental risk assessment remain and require further investigation. Overall, fungal nanotechnology offers promising prospects for food security, environmental protection, and the development of a sustainable bio based economy.

Key words: Nanocomposites, Metal oxide nanoparticles, Quantum dots, Tri-metallic nanoparticles

1 Assistant Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

2. PhD student, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Corresponding author: z.bahmani@ilam.ac.ir