20.1001.1.20080026.1401.16.2.4.3

مروری بر روش‌های مختلف سنتز سبز نانوذرات توسط ریز جلبک‌ها

بهاره نوروزی[1*]

[1] گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۱۶

چکیده

استفاده از ریز جلبک‌ها برای سنتز نانوذرات، روشی ایمن، سازگار با محیط‌زیست و ارزان با صرفه‌جویی در منابع انرژی است که نانوذراتی با اشکال و اندازه‌های متنوع تولید می‌کند. نانوذرات تولیدشده باواسطه ریزجلبک‌ها دارای ویژگی‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی مختلفی هستند که کاربردهای همه‌جانبه‌ای به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی، ضد سرطانی، فتوکاتالیستی و غیره دارند. اگرچه تاکنون مطالعات زیادی در مورد سنتز بیولوژیکی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها انجام‌شده است، مطالعات کمی بر روی سنتز نانوذرات با استفاده از سیانوباکتری‌ها انجام‌شده است. مقاله حاضر به‌طور جامع، ساخت نانوذرات باواسطه سیانوباکتری‌ها، شرایط غیرزیستی و زیستی بیوسنتز آن‌ها ازجمله روشنایی، pH، دما، نوع فرآیند سنتز (برون-سلولی و درون‌سلولی)، مکانیسم‌های مربوط به سنتز بیولوژیکی و همچنین عوامل مؤثر بر فرآیند سنتز را مورد بررسی قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سنتز سبز نانوذرات، سیانوباکتری‌ها، ترکیبات زیست فعال، ریز جلبک‌ها

مقدمه

صنعت نانوتکنولوژی شامل سنتز، شناسایی و توسعه نانو مواد مختلف است که نقش مهمی در زندگی روزمره دارد که با تولید محصولات ارزشمند، منجر به بهبود تولیدات صنعتی، کشاورزی، ارتباطات و پزشکی می‌شود. اصطلاح نانو به هر ذره یا ماده‌ای که ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر داشته باشد اشاره می‌کند. نانوذرات ازنظر خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌طور قابل‌توجهی با مواد بزرگ دیگر تفاوت دارند. این تفاوت‌ها عمدتاً به‌دلیل نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها است که منجر به تفاوت‌های قابل‌توجهی در فعالیت‌های کاتالیزوری و حرارتی، نقطه ذوب، رسانایی، خواص مکانیکی و جذب نوری می‌شود. این ویژگی‌ها باعث می‌شود نانوذرات تقریباً در همه زمینه‌ها قابل‌استفاده باشند. نانوذرات نقش مهمی در تشخیص زیستی و حسگر نوری، نانو فوتونیک و تصویربرداری و درمان بسیاری از بیماری‌های مؤثر بر سلامت انسان دارند (Rai و همکاران، ۲۰۱۹).

نانوذرات نقره به‌دلیل اندازه کوچک و مساحت سطح بزرگ می‌توانند به‌طور مؤثر با سطوح میکروبی برهمکنش داشته باشند و بنابراین به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی استفاده می‌شوند (Yalçın و همکاران، ۲۰۲۲). به‌عنوان مثال نانوذرات نقره سنتز شده با استفاده از *Fusarium Keratoplasticum*، فعالیت ضد باکتریایی قابل‌توجهی در برابر باکتری‌های بیماری‌زا نشان دادند. نانولوله‌های کربنی نیز نقش کلیدی در تحویل دارو دارند، زیرا ظرفیت بالایی برای حمل دارو و کنترل انتشار آن‌ها به سلول‌های هدف‌دارند. نانوذرات کوانتومی برای تشخیص محل سلول‌های

*نویسنده مسئول: bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

بدخیم در داخل بدن استفاده می‌شوند (Rashad و همکاران، ۲۰۱۹).

نانوذرات اکسید آهن در تصویربرداری رزونانس و تشخیص تومورها استفاده می‌شود. نانوذرات طلا به دلیل سمیت کم، تقاضای زیادی برای کاربردهای مختلف در زمینه‌های مختلف دارند. علاوه براین، نانوذرات طلا دارای فعالیت فتوترمال و فوتوآکوستیک بالایی هستند که آن‌ها را برای استفاده در درمان فتوترمال برای سرطان مناسب می‌کند. سایر نانوذرات بیوژن مانند نانوذرات اکسید مس، نانوذرات اکسید روی، نانوذرات سلنیوم، به‌عنوان عوامل ضد سرطانی قوی عمل می‌کنند. تنوع در اشکال نانوذرات ازجمله کروی، مکعبی، سوزنی، مثلثی، میله‌ای و غیره، آن‌ها را قادر می‌سازد تا در زمینه‌های مختلفی مانند ساخت دستگاه، الکترونیک، اپتیک و سلول‌های سوخت زیستی استفاده شوند (El-Sheekh و El-Kassas، ۲۰۱۴).

شکل ۱- تنوع در اشکال نانوذرات ساخته‌شده توسط سیانوباکتری‌ها (El-Sheekh و El-Kassas، ۲۰۱۴).

مسیرهای فیزیکوشیمیایی مورداستفاده برای تولید نانوذرات، اغلب سخت، گران و منجر به آزادسازی محصولات جانبی سمی می‌شود که سیستم‌های اکولوژیکی را تهدید می‌کند. به همین دلیل امروزه سنتز سبز نانوذرات با استفاده از عوامل بیوژنیک، جایگزین روش‌های سنتز شیمیایی و فیزیکی شده است. دیاتوم ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، گیاهان، قارچ‌ها، باکتری‌ها، اکتینومیست ها، گلسنگ‌ها، سیانوباکتری‌ها و ریز جلبک‌ها، پیش سازهای فلزی را به نانوذرات احیا می‌کنند. علاوه بر آن، تکنیک‌های سنتز سبز درون و خارج سلولی برای کاهش مواد حجیم به نانو فرم‌ها با استفاده از عصاره‌های بیولوژیکی نیز توسعه‌یافته‌اند (Yalçın و همکاران، ۲۰۲۲).

وجود ترکیبات زیستی مانند فلاوانون‌ها، آمیدها، آنزیم‌ها، پروتئین‌ها، رنگدانه ها، پلی‌ساکاریدها، فنولیک ها، ترپنوئیدها یا آلکالوئیدها منجر به احیا و تثبیت نانوذرات با نسبت سطح به حجم بالا می‌شوند و درنتیجه موجب افزایش توانایی آن‌ها در مقاومت در برابر شرایط سخت می‌شوند. شکل و اندازه نانوذرات سنتز شده توسط میکروارگانیسم‌ها را می‌توان توسط عوامل غیرزیستی و زیستی مختلف ازجمله pH، دما، ماهیت میکروارگانیسم‌ها، فعالیت بیوشیمیایی آن‌ها و برهم‌کنش با فلزات سنگین کنترل کرد (Hamida و همکاران، ۲۰۲۱).

در چند سال گذشته، سنتز نانوذرات با استفاده از سیانوباکتری‌ها به یک زمینه تحقیقاتی فعال تبدیل‌شده است. سیانوباکتری‌ها گروه متنوعی از پروکاریوت‌های

فوتواتوتروفیک هستند که در طیف وسیعی از اکوسیستم‌ها وجود دارند. آن‌ها با توانایی خود در تثبیت نیتروژن اتمسفری و احیای گاز نیتروژن به آمونیاک با استفاده از آنزیم‌های نیتروژن ردوکتاز، منجر به تبدیل زیستی فلزات به نانوذرات می‌شوند. علاوه براین، آن‌ها حاوی مولکول‌های زیستی مختلفی ازجمله متابولیت‌های ثانویه، پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و رنگدانه ها هستند که خواص بیولوژیکی مهمی مانند فعالیت ضدمیکروبی و ضد سرطانی را به همراه دارند (Vimbela و همکاران، ۲۰۱۷).

اگرچه تاکنون چندین مطالعه دقیق در مورد سنتز بیولوژیکی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها انجام شده است، مطالعات کمی بر روی سنتز نانوذرات با استفاده از سیانوباکتری‌ها انجام‌شده است. مقاله حاضر به‌طور جامع، ساخت نانوذرات باواسطه سیانوباکتری‌ها، شرایط غیر زیستی و زیستی بیوسنتز آن‌ها ازجمله روشنایی، pH، دما، نوع فرآیند سنتز (برون سلولی و درون‌سلولی)، مکانیسم‌های مربوط به سنتز بیولوژیکی، کاربردهای نانوذرات در زمینه‌های مختلف و همچنین استراتژی‌های سمیت نانوذرات در برابر سلول‌های زنده و به دنبال آن عوامل مؤثر بر فرآیند سنتز را بررسی می‌کند.

طبقه‌بندی نانوذرات: نانوذرات را می‌توان بر اساس عوامل مختلفی ازجمله شکل و ابعاد، ترکیبات فاز، ماهیت و منشأ طبقه‌بندی کرد. به‌عنوان‌مثال، نانوذرات طبیعی شامل آن‌هایی هستند که در زیست‌کره درنتیجه ساختن فلزات سنگین توسط موجودات زنده وجود دارند و همچنین آن‌هایی که تصادفاً در اثر آتش‌سوزی جنگل‌ها، فوران‌های آتش‌فشانی، هوازدگی سنگ‌ها، انفجار مواد معدنی رسی، فرسایش خاک و طوفان‌های شن ایجاد می‌شوند. در مقابل، نانوذرات مهندسی‌شده‌ای نیز هستند که با استفاده از مسیرهای شیمیایی و فیزیکی تولید می‌شوند. نانوذرات را نیز می‌توان بر اساس ماهیت شیمیایی آن‌ها طبقه‌بندی کرد. نانوذرات معدنی شامل نانوذرات فلزی و اکسید فلزی مانند نقره، طلا، پلاتین، اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید مس و نانوذرات اکسیدروی هستند. نانوذرات آلی شامل نانوذرات کربن، ترکیبات N- هالامین و نانوذرات کیتوزان هستند (El-Sheekh و El-Kassas، ۲۰۱۴).

سنتز و خصوصیات نانوذرات: روش‌های مختلفی برای سنتز نانوذرات وجود دارد، روش‌های مرسوم مانند رویکردهای شیمیایی و فیزیکی و همچنین روش‌های مدرن شامل سنتز بیولوژیکی با استفاده از موجودات زنده، آنزیم‌ها، ویتامین‌ها و غیره هستند. در روش‌های شیمیایی، اجزای اصلی فلزات، پیش ساز و عوامل تثبیت‌کننده و کاهنده هستند. عوامل کاهنده عبارت‌اند از سیترات سدیم، آسکوربات و بوروهیدرید سدیم و عوامل تثبیت‌کننده شامل پلی‌وینیل پیرولیدون، نشاسته و سدیم کربوکسیل متیل سلولز هستند (Rashad و همکاران، ۲۰۱۹). در روش‌های سنتز فیزیکی مانند فرسایش لیزری، مواد به نانو شکل‌های خود تبدیل می‌شوند. مشکلات استفاده از رویکردهای فیزیکوشیمیایی، مصرف انرژی، هزینه بالا و سرعت تولید پایین است و مهم‌تر از همه این است که این فرآیندها به دلیل بازده سمی خود که سیستم‌های اکولوژیکی را تهدید می‌کنند، دوستدار محیط‌زیست نیستند؛ بنابراین، تلاش برای توسعه و استفاده از روش‌های سازگار با محیط‌زیست برای سنتز نانوذرات همواره در جریان است (Hamida و همکاران، ۲۰۲۰a).

هدف از روش سنتز بیولوژیکی استفاده از منابع طبیعی (موجودات تک‌سلولی تا چندسلولی) برای تبدیل مواد حجیم به ذرات نانومقیاس با خواص منحصربه‌فرد است. این فرآیند معمولاً با حضور پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، رنگدانه ها و غیره انجام می‌شود.

ارگانیسم‌های تک‌سلولی شامل باکتری‌ها، سیانوباکتری و دیاتومه ها هستند، درحالی‌که موجودات چند سلولی شامل جلبک و گیاه هستند. تنوع منابع طبیعی و مولکول‌های زیستی بالقوه، تولید نانوذرات با خواص منحصربه‌فرد متفاوت را موجب می‌شود. نانوذرات همچنین برای ارزیابی خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، ازجمله اندازه، توزیع، پراکندگی، پایداری، بار و مورفولوژی سطح، تحت آنالیزهای مختلف مشخصه یابی قرار می‌گیرند. این تحلیل‌ها از تکنیک‌های طیف‌سنجی مانند طیف‌سنجی مرئی ماوراء بنفش، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه، پتانسیل زتا، پراکندگی نور دینامیکی و طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی هسته‌ای برای تعیین محدوده‌های طول‌موج، ترکیب شیمیایی پوشش‌های زیستی احاطه‌کننده نانوذرات بیوژنیک و برای تأیید تشکیل نانوذرات و همچنین مشخص کردن بار و قطر هیدرودینامیکی آن‌ها استفاده می‌کند. از آنالیزهای مبتنی بر اشعه ایکس مانند پراش اشعه ایکس، طیف‌سنجی الکترونی فوتو اشعه ایکس، طیف‌سنجی پراکنش انرژی برای ارزیابی ترکیب، ساختار و فاز کریستالی استفاده می‌شود. علاوه بر آن تکنیک‌های میکروسکوپی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا و میکروسکوپ نیروی اتمی برای تعیین اندازه و ظاهر مورفولوژیکی نانوذرات استفاده می‌شود. همچنین، چندین تکنیک برای تخمین خواص مغناطیسی نانوذرات مانند رزونانس فرومغناطیسی، مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی و غیره نیز وجود دارند (Hamida و همکاران، ۲۰۲۰a) (جدول یک).

جدول ۱: تکنیک‌های تشخیص نانوذرات را نشان می‌دهد (Hamida و همکاران، ۲۰۲۰b).

عملکرد	تجزیه‌وتحلیل شخصیت	نوع تحلیل
تأیید تشکیل نانوذرات و تشخیص محدوده طول‌موج آن‌ها	طیف‌سنجی مرئی فرابنفش (UV)	تکنیک طیف‌سنجی
تعیین ترکیب شیمیایی پوشش‌های زیستی اطراف نانوذره بیوژنیک	تبدیل فوریه طیف‌سنجی مادون‌قرمز	
مشخص کردن بار نانوذرات	پتانسیل زتا	
تخمین قطر هیدرودینامیکی	پراکندگی دینامیک نور (DLS)	
تعیین محتوا و خلوص نانوذرات	(NMR)	
ترکیب، ساختار و فاز کریستالی نانوذرات	پراش اشعه ایکس (XRD)	مبتنی بر اشعه ایکس
ساختار نانوذرات را ارزیابی می‌کند	طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتوایکس (XPS)	
ارزیابی ساختار اتمی نانوذرات	طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS)	
تعیین اندازه و ظاهر مورفولوژیکی نانوذرات	میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)	تکنیک میکروسکوپی
تعیین اندازه و ظاهر مورفولوژیکی نانوذرات	میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) با وضوح‌بالا	
تعیین هندسه، اندازه، مورفولوژی، زبری سطح نانوذرات	میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)	
برآورد اشباع مغناطیسی، ماندگاری مغناطیسی و میدان مغناطیسی زدایی	مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی(VSM) رزونانس فرو مغناطیسی (FMR)	تکنیک مغناطیسی

مکانیسم‌های بالقوه روش‌های سنتز سبز: روش ساخت زیستی نانوذرات از ارگانیسمی به ارگانیسم دیگر متفاوت است. علاوه براین، تفاوت‌هایی در بین سویه‌های مختلف یک‌گونه یافت می‌شود. به‌طور طبیعی، نانوذرات زمانی سنتزمی شوند که میکروارگانیسم‌ها در معرض مواد سمی قرار می‌گیرند، پس در پاسخ به آن مواد خارج سلولی ترشح می‌کنند

تا مواد را جذب کنند، یا از طریق فعل‌وانفعالات الکترواستاتیکی با آن ترکیبات برهمکنش می‌کنند. محققان نشان دادند که نیروهای الکترواستاتیکی ازجمله عواملی هستند که به فرآیند احیای نانوذرات در سلول‌های قارچی کمک می‌کنند. تبدیل زیستی نانوذرات از یک الگوی کلی پیروی می‌کند که در آن یون‌های فلزی درسلول های میکروبی در حضور آنزیم‌ها به دام می‌افتند و سپس برای تشکیل نانوذرات احیا می‌شوند. علاوه براین، احیای نانوذرات توسط میکروارگانیسم‌ها را می‌توان به سنتز درون‌سلولی و خارج سلولی طبقه‌بندی کرد (Velusamy و همکاران، ۲۰۱۶).

سنتز درون‌سلولی نانوذرات: تشکیل نانوذرات درون‌سلولی به مواردی اطلاق می‌شود که احیا مواد حجیم به نانوذرات در داخل سلول‌های میزبان تحت کنترل عوامل بیولوژیکی مختلف انجام می‌شود. روش‌های سنتز (in Vivo) نانوذرات در آزمایشگاه شامل سه مرحله کلی است: ۱ (کشت میکروارگانیسم‌های هدف. ۲) برهمکنش بین محلول پیش ساز و سلول‌های زنده و ۳) جداسازی و خالص‌سازی نانوذرات از سلول‌ها. برای تعیین خصوصیات نیز از تکنیکهای فیزیکوشیمیایی استفاده می‌شود. در مرحله آخر، مخلوط میکروارگانیسم‌های زنده و نانوذرات رسوب شده در ۱۲۰۰۰g سانتریفیوژ می‌شود. بعد از شستشو، سلول‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند فراصوت لیز شده و برای استخراج نانوذرات مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند (El-Sheekh و El-Kassas، ۲۰۱۴).

فعل‌وانفعالات درون‌سلولی بین مواد حجیم و میکروارگانیسم هارا می‌توان با دو پروتکل مختلف انجام داد. درروش اول زیست‌توده میکروارگانیسم هدف در فاز لگاریتمی توسط سانتریفیوژ جمع‌آوری می‌شود، سپس زیست‌توده برای حذف هرگونه اثری از نمک، شستشو می‌شود و سپس با غلظت مناسبی از محلول مواد پیش ساز مخلوط می‌شود. درروش دوم میکروارگانیسم‌ها به‌صورت جداگانه همراه با محلول مواد حجیم کشت داده‌شده و به مدت ۲ هفته در شرایط کشت نگهداری می‌شوند. در سیانوباکتری‌ها، یون‌ها توسط الکترون‌های تولیدشده از طریق سیستم انتقال الکترون، ازجمله واکنش‌های تولید انرژی در فتوسنتز و تا حدی در سیستم انتقال الکترون تنفسی درنتیجه وجود آنزیم‌هایی مانند ردوکتازهای وابسته به NADH، تا حدودی کاهش می‌یابند. واکنش‌های ردوکس در سیتوپلاسم، غشاهای تیلاکوئید و غشای سلولی انجام می‌شوند. محققان نشان دادند که پس از واکنش بین *Plectonema boryanum* UTEX 485 و نیترات نقره، نانوذرات نقره کروی، هشت‌وجهی در داخل سلول‌ها و در محلول کشت رسوب داده شد. درواقع یون‌های نقره توسط یک دهنده الکترون داخل سلولی احیا می‌شوند یا توسط یک سیستم انتقال‌دهنده غشایی صادر می‌شود (Kumarasamy و همکاران، ۲۰۲۰).

P. boryanum محلول‌های کلرید طلا III را به نانوذرات طلا به‌صورت داخل سلولی احیا می‌کند. همچنین فعل‌وانفعالات سیانوباکتری‌ها یا مواد آلی آزادشده از طریق غشای سیانوباکتری‌ها با کلرید طلا III، رشد نانوذرات فلزی طلا را افزایش می‌دهد. محققان دیگر پیشنهاد کردند که آنزیم‌های نیترات ردوکتازممکن است به القای آنزیم مسئول سنتز نانوذرات نقره در *Bacillus licheniformis* کمک کنند. مطالعه دیگری نشان داد که نیتروژنازها (آنزیم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن) ممکن است عوامل احیاکننده قوی برای ساخت یون‌های طلا به نانوذرات طلا باشند. محققان دیگر نشان دادند که تیلاکوئیدهای جداشده از *Potamogeton nodosus* (یک گیاه آبزی) و *Spinacia oleracea* (یک گیاه خاکزی) ممکن

است مسئول ساخت یون‌های طلا به نانوذرات طلا در طی واکنش‌های فتوشیمیایی باشند. محققان دیگر نشان دادند که پلی‌ساکاریدها و سایر ماکرو مولکول‌ها ممکن است مسئول احیای داخلی و تثبیت نانوذرات باشند (انوار و همکاران، ۲۰۲۱). گزارش‌های دیگر نشان داده اندکه رنگدانه های سیانوباکتری به‌عنوان مولکول‌های محرک زیستی قوی عمل می‌کنند که به‌صورت درون‌سلولی مواد حجیم رابه نانوذرات احیا می‌کنند (Roychoudhury و همکاران، ۲۰۱۶).

سنتز خارج سلولی نانوذرات: سنتز خارج سلولی در خارج از سلول اتفاق می‌افتد و مولکول‌های بیولوژیکی تراوش شده مانند رنگدانه ها، یون‌ها، پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، هورمون‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها، نقش مهمی در فرآیند احیای نانوذرات دارند. این مولکول‌های زیستی به‌عنوان عوامل کاهنده و پوشاننده در طول فرآیند ساخت بیولوژیک عمل می‌کنند. روش‌های مختلفی برای سنتز خارج سلولی نانوذرات وجود دارد، ازجمله استفاده از محیط‌های کشت بدون سلول، عصاره‌های زیست‌توده سلولی و بیومولکول ها (El-Sheekh و El-Kassas، ۲۰۱۴).

محیط کشت فاقد سلول: نانوذرات را می‌توان با استفاده از محیط کشت میکروارگانیسم‌ها پس از حذف زیست‌توده توسط سانتریفیوژ، سنتز کرد. محیط‌های کشت فاقد سلولی فیلتر شده با محلول‌های پیش ساز تحت شرایط خاص برای سنتز نانوذرات فلزی مخلوط می‌شوند. محققان پنج سویه سیانوباکتری را آزمایش کردند و نشان دادند که محیط کشت بدون سلول *Synechococcus* sp. قادر به سنتزنانوذرات نقره در شرایط نور بودند و نانوذرات نقره نیز با استفاده از مایع رویی به‌صورت خارج سلولی سنتز شدند. بسیاری از مطالعات نقش حیاتی محتویات زیستی مانند آنزیم‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات فنلی و آلکالوئیدی موجود در کشت بدون سلول را در کنترل فرآیند کاهش زیستی نانوذرات نشان داده‌اند (قلی زاده و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین محققان پیشنهاد کردند که مولکول‌های زیستی مانند NADH ردوکتازها و پروتئین‌های حاوی گوگرد در مایع رویی بدون سلول در ساختن زیستی نانوذرات فلزی نقش عمده‌ای دارند (Velusamy و همکاران، ۲۰۱۶).

بیومس سلولی فیلتر شده: محققان سنتز نانوذرات را با استفاده از بیومس سلولی فیلتر شده را توسط بیومس سلولی فیلتر شده بعد از سانتریفیوژ و ته‌نشین شدن، حداقل سه بار با آب مقطر شستند تا هرگونه فلز اضافی از محیط حذف شود. سپس بیومس ته‌نشین شده تمیز شده با استفاده از دستگاه لیوفیلیزر در فریزر با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند و سپس با استفاده از هاون خرد می‌شوند. پودر به‌دست‌آمده با آب مقطر مخلوط می‌شود و سپس با استفاده از کاغذ صافی واتمن فیلتر می‌شود. درنهایت، فیلتر با محلول‌های پیش ساز فلزی مخلوط می‌شود و در شرایط مناسب انکوبه می‌شود. در این روش، گروه‌های زیستی فعال مانند پروتئین‌ها و آنزیم‌های موجود در فیلتراسیون سلولی، نقش مهمی در ساخت زیستی و تثبیت نانوذرات دارند. در مسیر دیگر، زیست‌توده سلولی در فاز لگاریتمی جمع‌آوری می‌شود و چندین بار شستشو می‌شود تا عناصر کمیاب از بین بروند و سپس برای مدت‌زمان مشخصی در آب مقطر خیسانده می‌شوند. پس‌ازآن، مخلوط سانتریفیوژ می‌شود ومایع رویی برای سنتز نانوذرات استفاده می‌شود (Velusamy و همکاران، ۲۰۱۶).

سنتزنانوذرات مبتنی بر مولکول‌های زیستی

رنگدانه ها: سیانوباکتری‌ها، ریز جلبک‌ها، اکتینومیست ها، جلبک‌ها و غیره با رنگدانه های غالبی در سلول‌هایشان مانند کاروتنوئیدها، فیکواریترین و

فیکوسیانین سی در سلول‌های خود متمایز می‌شوند. این رنگدانه ها آن‌ها را قادر به سنتز نانوذرات می‌سازد. فیکوسیانین سی، یک رنگدانه کمکی فتوسنتزی آبی است که بخشی از فیکوبیلیزوم ها را تشکیل می‌دهد و شامل ساختارهای متصل به تیلاکوئیدها در برداشت و انتقال الکترون‌ها به سمت مراکز واکنش فتوسیستمII است. درواقع فیکوسیانین سی، انتقال الکترون را کنترل می‌کند و توانایی اتصال به فلزات سنگین را دارد (Kumarasamy و همکاران، ۲۰۲۰).

محققان فیکوسیانین سی را از دو گونه مختلف سیانوباکتری *Spirulina* و *Limnothrix* جدا کردند و درنتیجه منجر به تولید نانوذرات نقره با اشکال و اندازه‌های مختلف شدند. محققان تفاوت در ویژگی‌های مورفولوژیکی را به این واقعیت نسبت دادند که دو ترکیب فیکوسیانین سی جداشده، ازنظر خلوص و وزن مولکولی متفاوت هستند. همچنین، آن‌ها نشان دادند که بین توانایی فیکوسیانین سی برای سنتز نانوذرات و حضور نور، رابطه وجود دارد، زیرا رنگدانه در شرایط تاریک نمی‌تواند نیترات نقره را به نانوذرات نقره کاهش دهد. درواقع فیکوسیانین C، به‌عنوان یک عامل محافظ (درپوش) در طول فرآیند احیای نیترات نقره به نانوذره نقره عمل می‌کند (Bin-Meferij و Hamida، ۲۰۱۹).

محققان دیگر نشان دادند که رنگدانه فیکوسیانین حاوی پروتئین جدا شده از *Nostoc linckia*، نیترات نقره را تحت نور مستقیم (۲۴۰۰-۲۶۰۰ لوکس) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق به نانوذرات نقره تبدیل کرد. در مطالعه دیگری، فیکوواریترین جداشده از *Nostoc carneum* به‌عنوان یک عامل کاهنده برای سنتز نانوذرات نقره استفاده می‌شود. محققان با موفقیت نانوذرات سولفید کادمیوم را با استفاده از فیکوواریترین سی از گونه سیانوباکتریوم *Phormidium tenue* سنتز کردند. البته مکانیسمی که در آن فیکوواریترین سی منجر به سنتز نانوذرات نقره می‌شود مشخص نیست. بااین‌حال محققان پیشنهاد می‌کنند که ممکن است شبیه مکانیسم رنگدانه قرمز فیکوواریترین سی باشد که از جلبک‌های قرمز استخراج می‌شود که می‌تواند نانوذرات نقره را بدون افزودن مواد احیاکننده، سنتز کند (Singh و همکاران، ۲۰۲۰).

پروتئین‌ها: بسیاری از مطالعات، نقش کلیدی پروتئین‌ها را در تثبیت و احیای نانوذرات آشکار ساختند. محققان نشان دادند که پروتئین‌های کاتیونی که توسط *Verticillium* sp. و *Fusarium oxysporum* ترشح می‌شوند، دارای فعالیت هیدرولیتیک بوده و آن‌ها را قادر می‌سازد تا نانوذرات مگنتیت را احیا کنند و یا پوشش‌دار سازند. محققان دیگر دریافتند که پروتئین باکتریایی با وزن مولکولی بین ۲۵ تا ۶۶ کیلو دالتون به فرآیند کاهش نانوذرات طلا کمک می‌کند، درحالی‌که پروتئینی با وزن مولکولی بین ۶۶ تا ۱۱۶ کیلو دالتون مسئول ساخت نانوذرات نقره است. درواقع اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها به‌عنوان عوامل تثبیت‌کننده و کاهنده در فرآیند ساخت زیستی نانوذرات فلزی عمل می‌کنند. وجود گروه‌های آمینو، کربوکسیل، سولفات و غیره در توالی اسیدآمینه پروتئین‌های سیانوباکتری، فرآیند کاهش زیستی نانوذرات بسیار کوچک با توزیع اندازه ذرات یکنواخت را تسهیل می‌کنند (Mandhata و همکاران، ۲۰۲۲).

محققان دیگر سنتز خارج سلولی نانوذرات با پوسته هسته نقره-طلا را با استفاده از پروتئین تک‌سلولی *Spirulina plantensis* انجام دادند. آن‌ها باندهای FTIR را در ۱۵۴۱،۱۶۵۳ و ۱۲۴۲ سانتی‌متر به‌عنوان باندهای آمید پروتئین‌ها یا پلی پپتیدها شناسایی کردند و نشان دادند که پروتئین‌های جلبکی نقش مهمی در فرآیند تثبیت این نانوذرات ایفامی

کنند. محققان دیگر گزارش کردند که یک پروتئین ۲۲ کیلو دالتون از *Phormidium* مسئول کاهش سولفات مس به نانوذرات اکسید مس بود. محققان دیگر برای اولین بار نانوذرات طلا را در مواد پلیمری خارج سلولی سلول‌های رویشی و لایه پلی‌ساکارید هتروسیست *Anabaena cylindrica* شناسایی کردند (Hanna و همکاران، ۲۰۲۲).

آنزیم‌ها: بسیاری از مطالعات نقش آنزیم‌های مختلف، ازجمله نیترات ردوکتازها و آنزیم‌های وابسته به NADH را در فرآیند کاهش زیستی نانوذرات موردبررسی قرار داده‌اند. علاوه براین، محققان گزارش کردند که سوپراکسید دیسموتاز، نقش حیاتی در تولید خارج سلولی نانوذرات نقره با استفاده از *F. oxysporum* دارد. نیترات ردوکتازها، متالوپروتئین هایی هستند که یون‌های مولیبدن را به‌عنوان کوفاکتور دارند و واکنش‌های متعددی را در چرخه نیتروژن، کربن و گوگرد کاتالیز می‌کنند. بسیاری از مطالعات، اهمیت این آنزیم‌ها را به‌عنوان یک عامل کاهش‌دهنده قوی در فرآیند ساخت بیولوژیک نانوذرات فلزی نشان داده‌اند. محققان پیشنهاد کردند که نیترات ردوکتاز وابسته به NADH به سنتز خارج سلولی نانوذرات طلا توسط *Chlorella pyrenoidosa* کمک می‌کند. محققان دیگر سنتز نانوذرات نقره، طلا، پالادیوم و پلاتیوم را در حضور سیانوباکتری‌ها با استفاده از نیتروژناز به‌عنوان عوامل کاهنده بررسی کردند. آن‌ها سه سویه *Calothrix pulvinate*, *Anabaena flos-aquae* و *Leptolyngbya foveolarum* را برای تشکیل نانوذرات بررسی کردند. *C. pulvinate*، نانوذرات پالادیوم و پلاتیوم را بعد از سی دقیقه و ۱۵ روز، نانوذرات طلا را بعد از چند ساعت و نانوذره نقره را بعد از ۲۴ ساعت می‌سازد. در مقابل، هنگامی‌که همان پیش‌ساز و سویه‌ها با نیتروژنازها انکوبه شدند، نانوذرات پالادیوم و پلاتیوم، طلا و نقره به‌ترتیب پس از ۲ ساعت، ۷۲ ساعت، ده ساعت و ۱۰ دقیقه تشکیل شدند (Rai و همکاران، ۲۰۱۹).

پلی‌ساکاریدها: محققان از پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی *Nostoc commune* برای احیای نیترات نقره به نانوذرات نقره استفاده کردند. به‌طور خلاصه، ۱۰ گرم سیانوباکتری خشک‌شده را با آب مخلوط کردند، مخلوط را در ۱۰۰ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم در pH=10 به حالت تعلیق درآوردند و آن را در یک مخلوط‌کن با سرعت متوسط به مدت ۱۰ ثانیه همگن کردند و سپس به مدت یک‌شب در دمای محیط هم زدند. سپس سوسپانسیون مجدداً حداقل سه بار به مدت ۱۰ ثانیه همگن شد و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط باقی ماند. لایه بالایی (پلی‌ساکاریدها) با استفاده از کاردک برداشته شد و لایه آبی پایینی در ۶۰۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه در بیست درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. بیومس ته‌نشین شده، دور ریخته شدند و مایع رویی حاوی بخش محلول در آب که شامل اگزوپلی ساکاریدها بود به مدت یک‌شب در برابر آب مقطر دیالیز شد و با استفاده از یک لیوفیلیزر در انجماد خشک شد. سپس ۵۰ میلی‌لیتر از محلول آبی اگزوپلی ساکارید (ده میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) به سی میلی مولار محلول نیترات نقره اضافه شد. واکنش در ۱۵psi و ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه اتوکلاو شد. برای رسوب نانوذرات بیوژنیک نقره، مخلوط در ۱۵۰۰۰ g به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. درواقع اگزوپلی ساکاریدها به‌عنوان عوامل کاهش‌دهنده و پوشش‌دهنده قوی عمل می‌کنند و نشان دادند که پوشش‌دار کردن نانوذرات نقره با اگزوپلی ساکاریدها از تماس ذرات با اکسیژن جلوگیری می‌کند و پایداری آن‌ها را افزایش می‌دهد (Roychoudhury و همکاران، ۲۰۱۶).

عوامل مؤثر برساخت بیولوژیک نانوذرات با استفاده از میکروارگانیسم‌ها: عوامل زیادی باید در طول سنتز بیولوژیکی در نظر گرفته شوند، از جمله روشنایی، زمان در معرض قرار گرفتن،pH، دما و غلظت. کنترل این عوامل می‌تواند تولید نانوذرات با خواص فیزیکوشیمیایی مناسب را تسهیل کند (Hamida و همکاران، 2020b).

روشنایی: وجود یا عدم وجود نور نقش مهمی در بیوسنتز نانوذرات دارد. نور حداقل برای تسریع فرآیند کاهش زیستی برای سنتز نانوذرات موردنیاز است. نور فاکتور مهمی است که سنتز درون‌سلولی و خارج سلولی نانوذرات نقره را در سیانوباکتری‌های فتوتروفیک کنترل می‌کند. برخی سیانوباکتری‌ها در شرایط تاریک قادر به تولید نانوذرات نیستند. بااین‌حال، در شرایط یکسان اما پس از قرار گرفتن در معرض نور، سویه‌های مشابه قادر به ساخت نانوذرات نقره از نیترات نقره بودند. از سوی دیگر، سویه‌های دیگر ازجمله *Anabaena* sp., *Limnothrix* sp., و *Synechocystis* sp. قادر به تولید نانوذرات تحت هم شرایط نور و هم تاریکی نبودند. این را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که سویه‌های مختلف ترکیبات مختلفی را تولید می‌کنند که قادر به سنتز نانوذرات هستند و تنها برخی از آن‌ها به انرژی فعال‌سازی نور نیاز دارند. نکته مهم دیگر در رابطه با روشنایی، شدت نور است. محققان احیای کامل خارج سلولی یون‌های نقره به نانوذرات نقره را بعد از در معرض بودن با مخلوط عصاره برگ *Azadirachta indica* و محلول نیترات نقره در برابر نور خورشید تنها به مدت ۵ دقیقه گزارش کردند (Huang و Zimba، ۲۰۱۹).

زمان در معرض قرار گرفتن: زمان واکنش در بین میکروارگانیسم‌های مختلف متفاوت است و برخی قادرند نانوذرات را در عرض چند دقیقه سنتز کنند، درحالی‌که دیگران به هفته‌ها نیاز دارند. محققان گزارش کردند که تنها ۲۸ روز لازم است تا *P. boryanum* UTEX 485، نانوذره نقره را سنتز کند، درحالی‌که محققان دیگر نشان دادند *Leptolyngbya* sp.، نانوذرات نقره را به‌صورت خارج سلولی از نیترات نقره پس از ۲۰ دقیقه ساخت. مطالعه اخیر نشان دادکه پراکندگی و پایداری نانوذرات نقره سنتز شده با استفاده از *Oscillatoria limnetica* با افزایش زمان تغییر کرد. پس از ۴۸ ساعت سنتز، ارزش طول‌موج طیف UV ثابت بود و پس از ۹ ماه انکوباسیون، شدت نوری از ۰/۷۱ تا ۰/۵۹۹ تغییر کرد که نشان‌دهنده پایداری نانوذرات نقره با تجمع کم است. پایداری نانوذرات نقره با واسطه *Anabaena* پس از ۶ ماه نگهداری توسط محققان بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره حداقل در ۳ ماه اول بدون تغییر در طیف جذبی، پایدار بودند (Pandey و همکاران، ۲۰۲۰; Huang و Zimba، ۲۰۱۹).

pH: pH به‌طور قابل‌توجهی بر اندازه و توزیع نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد. سنتز خارج سلولی نانوذرات نقره با استفاده از فیکواریترین در محیط اسیدی مهار می‌شود، درحالی‌که واکنش در شرایط قلیایی pH=10 افزایش می‌یابد. علاوه براین، نانوذرات کوچک‌تر و پراکنده‌تر در pH=10 مشاهده می‌شود، درحالی‌که نانوذرات بزرگ‌تر و بیشتر در pH=12 مشاهده می‌شود (ARDELEAN و همکاران، ۲۰۲۲).

درجه حرارت: محققان توانایی *P. boryanum* را برای ساخت نانوذرات درون و خارج سلولی پلاتیوم موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که رنج وسیعی از دماها روی تشکیل نانوذرات تأثیرگذار است که خود نشان‌دهنده این است که تبلور و تبلور مجدد نانوذرات به دما بستگی دارد. کاهش دما منجر به ایجاد حالت آمورف و بی‌شکل می‌شود، درحالی‌که یک ساختار کریستالی در دماهای بالاتر غالب است (Younis و همکاران، ۲۰۲۲).

غلظت پیش سازها و عوامل کاهنده طبیعی: غلظت مواد کاهنده زیستی تأثیر مهمی بر ویژگی‌های نانوذرات ازجمله شکل و اندازه دارد. سنتز نانوذرات وابسته به دوز است و به نوع جلبک مورداستفاده نیز مرتبط است. محققان نشان دادند که افزایش غلظت سیانوباکتری *Oscillatoria limnetica*، جذب پیک‌های حاصل را افزایش داد. علاوه براین، آن‌ها گزارش کردند که تغییر در موقعیت از ۴۲۰ به ۴۳۰ نانومتر، همراه با گسترش قله‌ها، نشان‌دهنده افزایش اندازه ذرات است. آن‌ها همچنین دریافتند که سنتز خارج سلولی نانوذرات نقره به دوز نیترات نقره نیز بستگی دارد. به‌طورکلی، افزایش غلظت مواد پیش ساز منجر به افزایش شدت نوری ثبت‌شده توسط اسپکتروفتومتری UV می‌شود (Uzair و همکاران، ۲۰۲۰).

ماهیت میکروارگانیسم‌ها: ماهیات میکروارگانیسم‌ها به محتویات مولکول‌های زیستی‌شان و نوع مولکول‌ها مانند پلی‌ساکاریدها، پپتیدها و رنگدانه ها بستگی دارد، بنابراین، میکروارگانیسم‌های مختلف در توانایی خود برای تشکیل نانوذرات متفاوت هستند. محققان، فعالیت احیای سه کشت سیانوباکتری را موردمطالعه قراردادند و مشاهده کردند که سایز و اندازه نانوذرات بستگی به جنس سیانوباکتری مورداستفاده دارد (Keskin و همکاران، ۲۰۱۶).

علاوه براین، سویه‌های مختلف از یک‌گونه، نانوذراتی با ویژگی‌های متفاوت فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی تولید می‌کنند. محققان از سویه‌های متفاوت از یک‌گونه *Nostoc*، شامل *Nostoc* sp. Bahar M,32 و *Nostoc* HKAR-2 *Nostoc muscorum* NCCU-442 استفاده کردند و محدوده‌های متفاوتی از نانوذرات نقره با اندازه‌های ۸/۵ تا ۲۶، ۵۱ تا ۱۰۰ و ۴۲ نانومتر را ساختند. عواملی مانند زیستگاه میکروارگانیسم‌ها و توانایی آن‌ها در حذف فلزات از محیط ممکن است در ویژگی‌های نانوذرات تأثیر گزار باشد. جلبک‌های سبز آبی با توانایی انباشت فلزات سنگین از محیط اطراف و تجزیه این فلزات به نانوذرات متمایز می‌شوند. محققان نشان دادند که ۳۰ سویه سیانوباکتری جداشده از یک زیستگاه دریایی پتانسیل قابل‌توجهی برای کاهش خارج سلولی نیترات نقره به نانوذرات نقره رادارند. در مقابل، یوباکترهای دیگری که در برابر فلزات سنگین مقاوم هستند مانند *Aphanizomenon* sp. نمی‌تواند نانوذرات نقره را از فلز نقره تحت شرایط آزمایشگاهی بسازد (Moraes و همکاران، ۲۰۲۱).

نانوذرات نقره: نانوذرات نقره ازجمله مهم‌ترین نانوذره فلزی مورداستفاده در زمینه‌های مختلف هستند و در بسیاری از محصولات صنعتی و پزشکی ازجمله پانسمان‌ها، ابزار جراحی و ماسک‌ها، مواد شوینده و محصولات مراقبتی یافت می‌شوند. به‌طورمعمول، نانوذرات نقره با رویکردهای شیمیایی و فیزیکی ساخته می‌شوند. با توجه به معایب این مسیرها شامل هزینه بالا، نیازهای انرژی بالا و محصولات جانبی سمی، روش‌های سنتز سبز برای تولید نانوذرات پاک و جلوگیری از اثرات مضر تکنیک‌های فیزیکوشیمیایی توسعه‌یافته‌اند. به‌عنوان‌مثال، محققان اشاره کردند که سرعت تزریق و دمای واکنش، عوامل مهمی برای سنتز نانوذرات نقره هستند که می‌توانند نانوذرات نقره کروی با اندازه نانو ۱۷ نانومتر در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید کنند. در مقابل، بسیاری از مطالعات نشان دادند که می‌توانند نانوذرات نقره را حتی با کوچک‌ترین اندازه‌های ۱۰،۱۰-۱۵، ۱۴/۹ نانومتر نیز در دمای اتاق سنتز کنند. آن‌ها دریافتند که نانوذرات نقره دارای شکل مثلثی با محدوده اندازه بین ۳۰ تا ۱۲۰ نانومتر هستند. محققان از عوامل تثبیت‌کننده شیمیایی مانند سیترات و پلی (استایرن سولفونات)

برای به دست آوردن نانوذرات نقره پایدار استفاده کردند. درحالی‌که *Arthrospira maxima* و *Arthrospira platensis* قادر به تولید نانوذرات نقره مثلثی (به ترتیب ۶۱ و ۴۶ نانومتر) در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت بدون نیاز به هیچ عامل تثبیت‌کننده بودند (Moritz و Geszke-Moritz، ۲۰۱۳).

در میان این موجودات بیولوژیکی، جلبک‌های سبز آبی مسیر ساده‌ای را برای تولید نانوذرات نقره موردنظر فراهم می‌کنند. *Desertifilum* IPPAS B-1220 برای ساخت زیستی نانوذرات نقره برای اولین بار توسط محققان موردبررسی قرار گرفت، آن‌ها نانوذرات نقره را به‌صورت خارج سلولی با استفاده از عصاره زیست‌توده سلولی تحت نور مستقیم به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق سنتز کردند. تشکیل نانوذرات نقره توسط پیک جذب UV در ۴۲۱ نانومتر تأیید شد. الگوی پراش XRD نشان‌دهنده نانو کریستالی بودن نانوذرات نقره بود. با توجه به طیف غالب FTIR، محققان گزارش کردند که زیست مولکول‌های اصلی مسئول فرآیندهای کاهش زیستی و تثبیت، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها هستند. همچنین، آن‌ها دریافتند که Desertifilum sp. IPPAS B-1220 می‌تواند نانوذرات کروی نقره را با رنجی از ۴/۵ تا ۲۶ نانومتر نیز تولید کند. محققان از *P. boryanum* *UTEX* 485 برای اولین بار برای هم سنتز درون‌سلولی و هم خارج سلولی نانوذرات نقره استفاده کردند. آن‌ها یافتند که نانوذرات نقره، اشکال هشت‌وجهی و کروی با رنج نانو سایزی از یک تا ۲۰۰ و ده نانومتر دارند. EDS و XPS، ارتباط آهن، فسفر و گوگرد را با نانوذرات نقره نشان دادند. آن‌ها گزارش دادند که فرآیند ساخت زیستی نیترات نقره می‌تواند با فرآیند متابولیک با استفاده از نیترات با کاهش نیترات به نیتریت و آمونیوم که قبل از مرگ سیانوباکتری به‌عنوان گلوتامین تثبیت می‌شود، مرتبط باشد. بااین‌حال، آزادسازی مواد آلی پس از مرگ باکتریایی منجر به رسوب نانوذرات نقره در محلول می‌شود (Vimbela و همکاران، ۲۰۱۷).

یک مطالعه اخیر فعالیت هیدرولیتیک سویه جدیدی از سیانوباکتری‌ها *Nostoc* sp. Bahar M را در تولید نانوذرات نقره از نیترات نقره به‌صورت خارج سلولی موردبررسی قراردادند. رزونانس پلاسمون نانوذرات نقره باواسطه *Nostoc* در ۴۰۳ نانومتر بود که نشان‌دهنده اندازه کوچک‌تر این نانوذرات است. همچنین، الگوی XRD ساختار کریستالی مکعبی وجه محور نانوذرات نقره را تأیید کرد. TEM و SEM نشان دادندکه نانوذرات نقره تولید شده توسط *Nostoc* sp. Bahar M به‌صورت غیریکنواخت پراکنده می‌شوند و کروی شکل‌اند و میانگین اندازه نانو آن‌ها ۱۴/۹ نانومتر است. همچنین، داده‌های FTIR نشان داد که مولکول‌های پروتئینی نقش مهمی را در مراحل ساخت زیستی نانوذرات نقره ایفا می‌کنند. اخیراً عصاره آبی بیومس *Oscillatoria limnetica* برای سنتز نانوذرات نقره در دمای اتاق برای ۱۸ ساعت مورداستفاده قرار گرفت. نانوذرات نقره کروی شکل بودند و اندازه‌های متنوعی بین ۳/۳۰ و ۱۷/۹۷ نانومتر داشتند. همچنین، محققان تأثیر عوامل غیر زیستی متغیر مانند pH، زمان و غلظت مواد کاهنده طبیعی و نیترات نقره را برای تعیین شرایط بهینه برای سنتز نانوذرات نقره موردمطالعه قراردادند. آن‌ها دریافتند که مناسب‌ترین شرایط برای تولید نانوذرات نقره از *Oscillatoria limnetica* در pH ۶/۷ و به‌مدت ۱۸ ساعت بود و همچنین فرآیند سنتز وابسته به دوز است. سی گونه سیانوباکتری برای سنتز خارج سلولی نانوذرات نیترات نقره غربالگری شدند. نتایج نشان داد که همه سی سیانوباکتری قادر به تشکیل نانوذرات

نقره از مواد پیش ساز خود، با محدوده اندازه متغیر بودند (Hamida و همکاران، ۲۰۲۱).

Cylindrospermum stagnale بهترین عملکرد را داشت و کوچک‌ترین نانوذرات نقره با اندازه‌های نانومتری ۳۸ تا ۴۰ نانومتر را تولید کرد. به‌طور مشابه، محققان توانایی ساخت نانوذرات نقره چندین گونه سیانوباکتری جداشده از جنگل‌های حرا شامل *Aphanothece*, *Oscillatoria*, *Microcoleus*, *Aphanocapsa*, *Phormidium*, *Lyngbya*, *Gloeocapsa*, *Spirulina* و *Synechococcus* را موردبررسی قراردادند. از بین همه میکروارگانیسم‌های آزمایش‌شده، فقط *Microcoleus* sp. می‌تواند نیترات نقره را کاهش دهد و نانوذرات نقره کروی شکل با قطر متوسط ۵۵ نانومتر را تشکیل دهد. محققان سنتز خارج سلولی و درون‌سلولی نانوذرات نقره را با انکوباسیون در نور و تاریکی با استفاده از ایزوله‌های سیانوباکتریایی مختلف مانند *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Cylindrospermospsis* sp. 121–1, *Cylindrospermopsis* sp. USC CRB3, *Lyngbya* sp., *Limnothrix* sp., *Synechocystis* sp., و *Synechococcus* sp. انجام دادند. به‌غیراز *Aphanizomenon* sp.، همه سیانوباکتری‌های تست‌شده نیترات نقره را به نانوذرات نقره تحت نور مستقیم با استفاده از کشت فاقد سلول و عصاره بیومس سلولی انجام دادند. علاوه براین، تنها عصاره زیست‌توده سلولی *Anabaena* sp., *Limnothrix* sp. و *Synechocystis* sp. قادر به سنتز نانوذرات نقره تحت انکوباسیون در تاریکی بودند (Patel و همکاران، ۲۰۱۵).

نانوذرات طلا: نانوذرات طلا به‌عنوان رسانای گرمایی خوب و سمیت کم در برابر سلول‌های طبیعی شناخته‌شده‌اند که برای درمان سرطان بسیار مناسب هستند (Bin-Meferij و Hamida، ۲۰۱۹). علاوه بر روش‌های فیزیکوشیمیایی، سنتز بیولوژیکی می‌تواند با سنتزنانوذرات طلا به روشی سازگار با محیط‌زیست، مورداستفاده قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال، توانایی *Anabaena laxa* برای کاتالیز تبدیل هیدروژن تتراکلروآورات (III) به نانوذرات طلا به اثبات رسیده است. *A. laxa* می‌تواند نانوذرات طلا را به روش درون‌سلولی با مورفولوژی‌ها و اندازه‌های مختلف با سه غلظت مختلف از کلرید اوریک بسازد. آن‌ها همچنین نشان دادند که حداکثر پیک طیف UV در ۵۴۵ و ۵۶۰ نانومتر برای ۵.۰ و ۱ میلی‌مولار کلرید اوریک است. نتایج حاصل از آنالیز پراکنش اشعه X نیز نشان‌دهنده تبلور نانوذرات طلا است. همچنین، میکروگراف‌های TEM نشان داد که نانوذرات طلایی که در ۰/۵ میلی مولار ظاهر می‌شوند، کروی هستند، اما تعداد کمی از نانوذرات با اشکال دیگر (مثلثی، شش‌ضلعی و نامنظم) نیز مشاهده شد. اندازه این نانوذرات از ۰ تا ۳۰ نانومتر متغیر بود. بااین‌حال، بزرگ‌ترین ذرات دارای محدوده اندازه بین سی تا صد نانومتر هستند. در غلظت بالاتر (۱ میلی‌مولار کلرید اوریک)، شکل‌های مثلثی، شش‌ضلعی و نامنظم نانوذرات طلایی با گستره بین ۲۰ تا ۵۰ نانومتر ظاهر شدند. علاوه براین، کشت‌های سیانوباکتری‌های زنده توانستند نانوذرات طلا را کارآمدتر از نمونه‌های مرده تشکیل دهند که نشان‌دهنده نقش فعالیت متابولیک در فرآیند کاهش زیستی نانوذرات طلایی است (Husain و همکاران، ۲۰۱۵).

به‌طور مشابه، محققان دیگر توانایی کاهش زیستی *A. flos-aquae* را به روش داخل سلولی برای سنتز نانوذرات طلا نشان دادند. محققان دیگر نشان دادند که *A. cylindrical* و *Anabaena* sp.، یون‌های طلا را به نانوذرات طلا بدون آزادسازی ترکیب سمی آناتوکسین تبدیل می‌کند. آن‌ها ذکر کردند که *A. cylindrical* قادر به تولید درون‌سلولی نانوذرات طلا بعد از ۴ ساعت انکوباسیون با نور مستقیم است. الگوی XRD نانوذرات طلا نشان داد که این نانوذرات

دارای شکل بیضی هستند. نانوذرات طلای بیوسنتز شده کروی بودند و اندازه متوسط آن‌ها ۱۰ نانومتر بود. علاوه براین، میکروگراف‌های TEM نشان داد که نانوذرات طلا عمدتاً در سلول‌های رویشی (۵۰ درصد) در مقایسه با هتروسیست ها توزیع‌شده و در امتداد غشاهای تیلاکوئید قرار دارند. محققان پیشنهاد کردند که هتروسیست ها برای ساخت نانوذرات، اهمیت چندانی ندارند، زیرا نتایج آن‌ها نشان داد که بیش از ۱۰ سلول رویشی حاوی نانوذرات طلا هستند، درحالی‌که تنها یک هتروسیست حاوی نانوذرات است (Afzal و همکاران، ۲۰۱۹).

فعالیت‌های کاهش زیستی سه گونه سیانوباکتری، *Phormidium valderianum*، *P. tenue* و *Microcoleus chthonoplastes* در برابر محلول کلرید اوریک در مقادیر مختلف pH موردمطالعه قرار گرفت. محققان نشان دادند که هر سه سویه سیانوباکتری آزمایش‌شده قادر به سنتز نانوذرات طلا بودند، بااین‌حال، تنها *P. valderianum* قادر به تولید نانوذرات طلا با اشکال و اندازه‌های مختلف، ازجمله نانو کره (۱۵ نانومتر) و مثلثی (۲۴ نانومتر) و شش‌ضلعی (۲۵ نانومتر) در پاسخ به تغییرات pH بود (Aziz و همکاران، ۲۰۲۱).

Gloeocapasa sp. برای سنتز درون‌سلولی نانوذرات طلا با استفاده از کل سلول‌ها مورداستفاده قرار گرفت. به همین دلیل محلول کلرید اوریک با ده میلی‌لیتر کشت *Gloeocapasa* مخلوط شد و در دمای اتاق به حالت چرخان قرار گرفت. پس از چند ساعت، نانوذرات طلا تشکیل‌شده بود و جذب UV آن‌ها ۵۴۷ نانومتر بود. علاوه براین نتایج FTIR نشان داد که پروتئین‌های جلبکی مسئول فرآیند کاهش زیستی هستند که این نانوذرات را تشکیل می‌دهند، زیرا پیک‌های قوی در ۳۴۲۴/۹۶ سانتی‌متر مشاهده شد که مرتبط با کشش پیوند N-H در ۱۶۴۰/۱۶ سانتی‌متر بود. این پیوند کششی مربوط به آمید است. علاوه براین، میکروگراف‌های SEM و TEM نشان داد که نانوذرات طلا شکل کروی و قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند (Bruna و همکاران، ۲۰۲۱) (جدول دو).

جدول ۲- سنتز نانوذرات طلای سنتز شده توسط سیانوباکتری‌ها (Mandhata و همکاران، ۲۰۲۲).

سویه	NPs	اندازه	شکل	درحالت سنتز	روشنایی	دما	PH	زمان	کاربرد نانوذرات
Anabaena strain L31	ZnO	70-100	کروی	-	تاریک		7	72h	ضد آفتاب دوستدار محیط‌زیست
Anabaena flos-aquae	β - FeOOH	100	نانو میله	+	سبک	۲۵	7	۲۸ روز	NM
Anabaena flos-aquae, ALCP B2	β- FeOOH	NM	نانو میله	+	سبک	۲۰	7	۲۸ روز	بیوفیلم های هیبریدی
abaena flos-aquae, ALCP B24	Pt	NM	NM	+	سبک	۲۰	NM		NM
Nostoc sp. EA03	Pd	NM	NM	+	سبک	NM	NA	۳۰min	NM
Calothrix pulvinat	ZnO	50-80	ستاره	-	سبک	NA	9	2h	آنتی باکتریال و

ضد سرطان									
NM	روز28	7	RT	سبک	+	نانو میله	100	β-FeOO	*Calothrix pulvinate*
NM	۳۰min	NA	20	سبک	- +	کروی	35	Pd	*Calothrix pulvinate*
NM	۱۵ روز	NA	NA	سبک	- +	کروی	32	Pt	*Lyngbya majuscula*
NA	72h	4	NA	سبک	+	کروی	5-25	Au-Ag nanoalloy	*Phormidium tenue* NTDM05
برچسب زیستی	روز5	NM	NM	سبک	-	کروی	1-5	CdS	Phormidium cyanobacterium
NM	42h	NM	NM	تاریک	-	شبه کروی	10-40	CuO	*Plectonema boryanum* UTEX 485
NM	24h	4-10	28	تاریک	- +	دراز	30	Pt	*Plectonema boryanum* UTEX 485
NM	24h	4-10	25-100	سبک	-	کروی	30	Pd	*Spirulina platensis*
عامل آنتی باکتریال	120h	NM	37	سبک	-	کروی	30-40	CuO	*Spirulina platensis*

سایر نانومواد: توانایی سیانوباکتری‌ها برای کاهش نانوذرات فلزی به نانوذرات طلا و نقره محدود نیست، بلکه در سایر فلزات ازجمله پلاتین، پالادیوم و کادمیوم و همچنین اکسیدهای فلزی ازجمله اکسید مس و اکسید روی نیز دیده‌شده است. محققان توانایی *P. boryanum UTEX 485* را برای تشکیل نانوذرات پلاتین و پالادیوم در دماهای متغیر موردبررسی قراردادند. محققان ذکر کردند که نانوذرات پالادیوم بعد از انکوباسیون با *P. boryanum* برای ۲۸ روز در دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود (Hamouda و همکاران، ۲۰۱۹).

میکروگراف TEM نانوذرات پالادیوم نشان داد که این ذرات دارای اشکال کروی و کشیده هستند، اما در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فقط هیدرید پالادیوم کروی ظاهر می‌شود. تجزیه‌وتحلیل XRD نانوذرات پالادیوم سنتز شده در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درجه سانتی‌گراد پیک‌های متفاوتی را نشان داد که نشان‌دهنده نانوبلور بودن نانوذرات پالادیوم است، بااین‌حال، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد هیچ پیک پراشی شناسایی نشد. به‌طور مشابه، تجزیه‌وتحلیل فیزیکوشیمیایی مختلف نانوذرات پلاتین سنتز شده توسط *P. boryanum UTEX* در دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۸ روز و در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ روز توسط محققان انجام شد. نتایج نشان داد که گوگرد، فسفر و نیتروژن با پلاتین ارتباط دارند و تجزیه‌وتحلیل EDX وجود گوگرد با پلاتین را نشان داد (MubarakAli و همکاران، ۲۰۱۲).

بنابراین، نویسندگان حدس زدند که این عناصر آلی نقش مهمی در فرآیند کاهشی یون‌های پلاتینوم به نانوذرات پلاتین دارند. محققان با استفاده از روش درون‌سلولی، نانوذرات طلا، نقره، پلاتین و پالادیوم را با استفاده از بیومس *C. pulvinata, A. flos- aquae* و *L. foveolarum* ساختند. آن‌ها پیشنهاد کردند که پلی‌ساکاریدها مسئول تثبیت نانوذرات هستند. نانوذرات سولفید کادمیوم با استفاده از میکروارگانیسم‌های مختلف ازجمله مخمرها، جلبک‌ها

و قارچ‌ها سنتز می‌شوند (Rahman و همکاران، ۲۰۰۹).

فیکواریترین سی جداشده از *P. tenue* برای سنتز ۵ نانومتری نانوذرات سولفید کادمیوم از پیش سازهای آن‌ها با استفاده از مخلوط آبی کلرید کادمیوم و سولفید سدیم مورداستفاده قرار گرفت. نانوذرات سولفید کادمیوم بعد از انکوباسیون با رنگدانه فیکواریترین سی برای ۲۴ ساعت در ۳۷ درجه سانتی‌گراد شکل گرفتند. تشکیل نانوذرات سولفید کادمیوم با پیک جذب در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر تأیید شد. تجزیه‌وتحلیل FTIR نوارهای جدیدی را در ۱۵۴۳، ۱۳۶۴ و ۱۲۲۳ سانتی‌متر نشان داد. تنها در نانوذرات پوشش‌دار شده با فیکواریترین سی، ارتعاش جدیدی به‌واسطه پیوند C\S یافت شد. سایر باندها در ۱۳۶۴ و ۱۰۳۴ سانتی‌متر دیده می‌شوند مربوط به ارتعاشات کششی C-N آمینو آمین‌های معطر بود. علاوه براین، تجزیه‌وتحلیل EDAX وجود هم کادمیوم و هم گوگرد را در نانوذرات سولفید کادمیوم نشان داد (Hamida و همکاران، ۲۰۲۰).

اکسیدهای فلزی: *Nostoc* sp. و *Anabaena* sp. برای تولید نانوذرات اکسید روی استفاده می‌شوند، درحالی‌که نانوذرات اکسید مس (CuO) توسط *Phormidium cyanobacterium* و *S. plantensis* تولید می‌شوند. محققان دیگر، نانوذرات بتا آهن اکسی هیدروکساید (β-FeOOH) را با استفاده از *A. flos-aquae, C. pulvinata* و *Klebsormidium* sp. سنتز کردند. آن‌ها دریافتندکه دو مکانیسم اساسی وجود دارد که از طریق آن‌ها آهن گیاهان عالی به دست می‌آید که به استراتژی I و استراتژی II اشاره می‌کنند. استراتژی I شامل اسیدی شدن خاک و تشکیل ریشه‌های جانبی و سلول‌های انتقالی خاص در ریزودرم و همچنین القای ترانسپورترهای چلات ردوکتاز Fe^{3+} و Fe^{2+} است. این استراتژی در همه گیاهان به‌جز گرس ها استفاده می‌شود. گراس ها از استراتژی II پیروی می‌کنند که در آن آهن به‌صورت کمپلکس Fe^{3+} سیدوفور جذب می‌شود (Hanna و همکاران، ۲۰۲۲).

با همه این‌ها، مکانیسم ساخت اکسید آهن توسط سیانوباکتری‌ها از استراتژی II یعنی کسب آهن مبتنی بر سیدروفور پیروی می‌کند. به دلیل دسترسی محدود به آهن، سلول‌ها، مولکول‌های چلاته کننده فلز Fe^{3+} آلی را از خود آزاد می‌کنند (سیدوفورها) که می‌توانند یون‌های آهن را در محیط حل کرده و به درون سلول‌ها هدایت کنند. به‌طور مشابه، محققان دیگر نانوذرات آکاگانیت را به‌صورت بیولوژیکی از *A. flos-aquae* تولید کردند. آنالیز XRD سیانوباکتری‌های فریز داری شده پس از واکنش بانمک‌های آهن، وجود نانوذرات آکاگانیت چهارضلعی با مقداری فازآمورف مرتبط با زیست‌توده سیانوباکتری‌ها را نشان داد (Pandey و همکاران، ۲۰۲۰).

نانوذرات دوفلزی: نانوذرات دوفلزی ترکیبی از دو فلز مختلف را شامل می‌شود که نسبت آن‌ها را می‌توان برای ارائه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی جدیدی که از فلزات سازنده آن‌ها مشتق می‌شوند، تغییر داد (Ghobashy و همکاران، ۲۰۲۱). این نانوذرات به دلیل آزادی بیشتری که در اختیاردارند برای کاربردهای مختلف جذاب هستند. محققان از سنتز خارج سلولی برای تولید نانوذرات پوشش هسته نقره–طلا با استفاده از پروتئین تک‌سلولی *S. plantensis* استفاده کردند. طول‌موج طیفی نانوذرات دوفلزی نقره–طلا ۵۰۹ نانومتر و اندازه آن‌ها ۲۵–۱۷ نانومتر بود. محققان دیگر *Lyngbya majuscule* را در معرض محلول هم مولاری طلا و نقره (۱ میلی مولار، pH=4) به مدت ۷۲ ساعت برای تولید نانوآلیاژ طلا– نقره قراردادند. آن‌ها گزارش

کردند که جذب UV نانوآلیاژ، ۴۸۱ نانومتر بود و اندازه نانوذره در محدوده ۵ تا ۲۵ نانومتر بود (Singh و همکاران، ۲۰۲۰).

نتیجه‌گیری

نانوتکنولوژی سبز، سنتز نانوذرات را با فرآیندهای سازگار با محیط‌زیست و ارزان‌قیمت تسهیل می‌کند و درنتیجه بازده بالایی دارد. منابع طبیعی مختلفی برای بیوسنتز نانوذرات ازجمله گیاهان، قارچ‌ها، باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها تاکنون مطالعه شدند. بااین‌حال، بسیاری از سویه‌های سیانوباکتری هنوز ناشناخته باقی ماندند. بنابراین مطالعات بیشتری برای کشف فعالیت‌های بیوکاتالیستی سویه‌های سیانوباکتری و توانایی‌های آن‌ها برای تبدیل فلزات پیش ساز به نانو فرم‌ها مورد نیاز است. اگرچه فرضیه‌های زیادی ارائه‌شده است، اما هنوز مکانیسم دقیق سنتز نانوذرات با استفاده از سیانوباکتری‌ها هنوز روشن نشده است؛ بنابراین، بررسی بیشتر چگونگی سنتز نانوذرات توسط میکروارگانیسم‌ها و تعیین اینکه چرا سویه‌های مختلف از یک‌گونه منجر به تولید نانوذراتی با شکل‌های مختلف می‌شوند، بسیار ضروری است. علاوه براین، مطالعه اثرات شرایط زیستی و غیرزیستی مانند نیروی الکترواستاتیک، وضعیت متابولیک، شرایط رشد و بیومولکول ها (آنزیم‌ها، رنگدانه ها، پروتئین‌ها و غیره) بر فرآیند ساخت سبز، کنترل خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی نانوذرات را امکان‌پذیر می‌سازد. ظهور بیماری‌های مهلک که به‌طورجدی سلامتی انسان را تهدید می‌کنند، انگیزه اصلی برای شروع تحقیقاتی درزمینهٔ غربالگری فعالیت نانوذرات سبز در حوزه‌های مختلف پزشکی، عوامل ضدمیکروبی و ضد سرطانی جدید خواهد بود (انوار و همکاران، ۲۰۲۱).

منابع

Afzal, B., Yasin, D., Husain, S., Zaki, A., Srivastava, P., Kumar, R. Fatma, T., 2019. Screening of cyanobacterial strains for the selenium nanoparticles synthesis and their anti-oxidant activity. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 21, 101307.

Ardelean, A.V., Moroşanu, A.-M., Ardelean, I., Moisescu, C., Cornea, C.P., 2022. Gold nanoparticles synthesis by green microalgae and the cyanobacterium synechocystis pcc 6803 in light and in darkness, and pollutants degradation by these nanoparticles in vitro. AgroLife Scientific Journal 11 (1), 9-17.

Aziz, M., Zaki, A., Ahamad, I., Fatma, T., 2021. Silver Nanoparticle Synthesis from Cyanobacteria: Environmental and Biomedical Applications. Emerging Technologies for Nanoparticle Manufacturing. Springer.

Bin-meferij, M.M., Hamida, R.S., 2019. Biofabrication and antitumor activity of silver nanoparticles utilizing novel nostoc sp. Bahar M. International Journal of Nanomedicine 14, 9019.

Bruna, T., Maldonado-bravo, F., Jara, P., Caro, N., 2021. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. International Journal of Molecular Sciences 22, 7202.

El-Sheekh, M.M., El-Kassas, H.Y., 2014. Application of biosynthesized silver nanoparticles against a cancer promoter cyanobacterium, Microcystis aeruginosa. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention 15, 6773-6779.

Ghobashy, R.S., Elsheekh, M.M., ismail, G.A., Gheda, S.F., 2021. Biosynthesis of metal nanoparticles using blue-green algae (*Cyanobacteria*) and their possible applications: Thesis Abstract. International Journal of Cancer and Biomedical Research 5, 6-6.

Hamida, R.S., Abdelmeguid, N.E., Ali, M.A., Bin-meferij, M.M., Khalil, M.I., 2020a. Synthesis of silver nanoparticles using a novel cyanobacteria Desertifilum sp. extract: their antibacterial and cytotoxicity effects. International Jurnal of Nanomedicine 15, 49.

Hamida, R.S., Ali, M.A., Goda, D.A., Redhwan, A., 2021. Anticandidal Potential of Two Cyanobacteria-Synthesized Silver Nanoparticles: Effects on Growth, Cell Morphology, and Key Virulence Attributes of Candida albicans. Pharmaceutics 13, 1688.

Hamida, R.S., Ali, M.A., Redhwan, A., Bin-Meferij, M.M., 2020b. Cyanobacteria–a promising platform in green nanotechnology: a review on nanoparticles fabrication and their prospective applications. International Journal of Nanomedicine 15, 6033.

Hamouda, R.A., Hussein, M.H., Abo-Elmagd, R.A., Bawazir, S.S., 2019. Synthesis and biological characterization of silver nanoparticles derived from the cyanobacterium Oscillatoria limnetica. Scientific Reports 9, 1-17.

Hanna, A.L., Hamouda, H.M., Goda, H.A., Sadik, M.W., Moghanm, F.S., Ghoneim, A.M., Alenezi, M.A., Alnomasy, S.F., Alam, P., Elsayed, T.R., 2022. Biosynthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Produced by Phormidium ambiguum and Desertifilum tharense Cyanobacteria. Bioinorganic Chemistry and Applications, 2022.

Huang, I.-S., Zimba, P.V., 2019. Cyanobacterial bioactive metabolites—A review of their chemistry and biology. Harmful Algae 86, 139-209.

Husain, S., Sardar, M., Fatma, T., 2015 .Screening of cyanobacterial extracts for synthesis of silver nanoparticles. World Journal of Microbiology and Biotechnology 31, 1279-1283.

Keskin, S., Oya, N., Kocberber kilic, N., Dönmez, G., Tekinay, T. Green synthesis of silver nanoparticles using cyanobacteria and evaluation of their photocatalytic and antimicrobial activity. Journal of Nano Research, 2016. Trans Tech Publ, 120-127.

Kumarasamy, R., Navyaka, P., Haque, E., 2020. Bioengineered Silver Nanoparticle from Spirulina platensis in attenuating biofilm mediated virulence in Vibrio parahemolyticus: An in vitro and in vivo Approach. International Journal of Pharmaceutical Investigation 10, 486-491.

Mandhata, C.P., Sahoo, C.R., Padhy, R.N., 2022. Biomedical applications of biosynthesized gold nanoparticles from cyanobacteria: An overview. Biological Trace Element Research 1-21.

Moraes, L.C., Figueiredo, R.C., Ribeiro-Andrade, R., Pontes-Silva, A.V., Arantes, M.L., Giani, A., Figueredo, C.C., 2021. High diversity of microalgae as a tool for the synthesis of different silver nanoparticles: A species-specific green synthesis. Colloid and Interface Science Communications, 42, 100420.

Moritz, M., Geszke-Moritz, M., 2013. The newest achievements in synthesis, immobilization and practical applications of antibacterial nanoparticles. Chemical Engineering Journal 228, 596-613.

Mubarakali, D., Gopinath, V., Rameshbabu, N., Thajuddin, N., 2012. Synthesis and characterization of CdS nanoparticles using C-phycoerythrin from the marine cyanobacteria. Materials Letters 74, 8-11.

Pandey, S.N., Verma, I., Kumar, M., 2020. Cyanobacteria: potential source of biofertilizer and synthesizer of metallic nanoparticles. Advances in Cyanobacterial Biology. Elsevier.

Patel, V., Berthold, D., Puranik, P., Gantar, M., 2015. Screening of cyanobacteria and microalgae for their ability to synthesize silver nanoparticles with antibacterial activity. Biotechnology Reports 5, 112-119.

Rahman, A., Ismail, A., Jumbianti, D., Magdalena, S., Sudrajat, H., 2009. Synthesis of copper oxide nano particles by using Phormidium cyanobacterium. Indonesian Journal of Chemistry 9, 355-360.

Rai, S., Wenjing, W., Shrivastava, A.K., Singh, P.K., 2019. Cyanobacteria as a source of nanoparticles and their applications. Role of plant growth promoting microorganisms in sustainable agriculture and nanotechnology. Elsevier.

Rashad, S., A El-Chaghaby, G., A Elchaghaby, M., 2019. Antibacterial activity of silver nanoparticles biosynthesized using Spirulina platensis microalgae extract against oral pathogens. Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries 23, 261-266.

Roychoudhury, P., Ghosh, S., PAL, R., 2016. Cyanobacteria mediated green synthesis of gold-silver nanoalloy. Journal of plant biochemistry and biotechnology 25, 73-78.

Singh, Y., Kaushal, S., Sodhi, R.S., 2020. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using cyanobacterium Leptolyngbya sp. WUC 59 cell-free extract and their effects on bacterial growth and seed germination. Nanoscale Advances 2, 3972-3982.

Uzair, B., Liaqat, A., Iqbal, H., Menaa, B., Razzaq, A., Thiripuranathar, G., Fatima Rana, N., Menaa, F., 2020. Green and cost-effective synthesis of metallic nanoparticles by algae: Safe methods for translational medicine. Bioengineering 7, 129.

Velusamy, P., Kumar, G.V., Jeyanthi, V., Das, J., Pachaiappan, R., 2016. Bio-inspired green nanoparticles: synthesis, mechanism, and antibacterial application. Toxicological Research 32, 95-102.

Vimbela, G.V., Ngo, S.M., Fraze, C., Yang, L., Stout, D.A., 2017. Antibacterial properties and toxicity from metallic nanomaterials. International Journal of Nanomedicine 12, 3941.

Yalcin, D., Erkaya, İ.A., Erdem, B., 2022. Antimicrobial, antibiofilm potential, and anti-quorum sensing activity of silver nanoparticles synthesized from Cyanobacteria Oscillatoria princeps. Environmental Science and Pollution Research 1-15.

Younis, N.S., Mohamed, M.E., El-Semary, N.A., 2022. Green Synthesis of Silver Nanoparticles by the Cyanobacteria Synechocystis sp.: Characterization, Antimicrobial and Diabetic Wound-Healing Actions. Marine Drugs 20, 56.

Journal of New Technologies in Aquaculture Development, Azadshahr Branch, Islamic Azad University
Vol. 16, No. 2, Summer 2022

A review of different methods of green synthesis of nanoparticles by microalgae

Bahareh Nowruzi[1*]

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Abstract

The use of microalgae for the synthesis of nanoparticles is a safe, environmentally friendly and inexpensive method with energy saving that produces nanoparticles of various shapes and sizes. Nanoparticles produced by microalgae have various biological, physical and chemical properties that have all-round applications as antimicrobial, anticancer, photocatalytic agents, etc. Although many studies have been conducted on biological synthesis using microorganisms, few studies have been conducted on the synthesis of nanoparticles using cyanobacteria. This article comprehensively describes the production of nanoparticles by cyanobacteria, the abiotic and biotic conditions of their biosynthesis, including lighting, pH, temperature, the type of synthesis process (extracellular and intracellular), the mechanisms related to biological synthesis, and also explain the factors affecting the synthesis process.

Keywords: Green synthesis of nanoparticles, Cyanobacteria, Bioactive compounds, Microalgae

*Corresponding author: bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir