فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست

سال پانزدهم، شماره ٥٤، بهار ١٤٠٠

مروری بر کاربرد صنعتی ریز جلبک ها و سیانوباکتری ها در حذف فلزات سنگین و سنتز نانوذرات

بهاره نوروزی[1]

۱. استادیار، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم و فناوری های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

نویسندهٔ مسئول مکاتبات: bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

چکیده

انتشار بی رویه فلزات حاصل از منابع مختلف صنعتی، کشاورزی و انسانی، منجر به آلودگی محیط زیست به فلزات سنگین شده است. فلزات سنگین برای انسانها و حیوانات بسیار سمی هستند. در ان میان ریز جلبکها و سیانوباکتری ها با پتانسیل رشد در شرایط افراطی از جمله مکان های آلوده به فلزات سنگین، استراتژی های دفاعی کارآمدی را برای مبارزه با اثرات سمی ناشی از یون های فلزات سنگین دارند. به این ترتیب که می توانند غلظت بالایی از فلزات سنگین را در اندامک های سلولی خود تجمع دهند. کارایی بالقوه در جذب، انباشت و مقاومت فلزی در ریز جلبکها موجب شده که به عنوان میکروارگانیسم های کارامد در بیوسنتز نانوذرات فلزی و اکسید فلزی، نیز شناخته شوند. در این مقاله مروری هدف این است که استراتژی های مختلف حذف فلزات سنگین و همچنین مکانیسمهای سنتز نانوذرات توسط ریز جلبکها مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است که مطالعه کاربرد وسیع ریز جلبکها در صنعت زیست پالایی، می تواند نقش مهمی در حفظ منابع زیست محیطی ما در آینده داشته باشد.

کلمات کلیدی: ریز جلبکها، سیانوباکتری ها، فلزات سنگین، نانوذرات.

مقدمه

روند رو به رشد صنعتی شدن و دفع نادرست زباله های جامد تولید شده و پساب های حاوی فلزات، تأثیر مخربی بر محیط زیست دارد. به بیان دیگر آلودگی فلزات سنگین امروزه به یکی از تهدیدهای اصلی در سال های اخیر تبدیل شده است. میکروارگانیسم ها بزرگترین و مهمترین گروهی هستند که تحت تأثیر فلزات سنگین انباشته شده در خاک و آب قرار می گیرند. برهمکنش و جذب فلزات سنگین به طور بالقوه برای میکروارگانیسم ها سمی است، البته میزان مسمومیت، به غلظت و همچنین ماهیت فلزات بستگی دارد. فلزاتی مانند آهن، منگنز، مس و نیکل، برای عملکرد بیولوژیکی میکروارگانیسم ها ضروری هستند زیرا انرژی و نیازهای ساختاری سلول را برآورده می کنند. در حالی که فلزات سنگین مانند جیوه، کادمیوم و سرب، حتی در غلظتهای بسیار کم هم سمی هستند (Hu et al., 2021). فلزات غیر ضروری به دلیل قدرت یونی بالا، فلزات ضروری را از محل اتصال خود جابجا می کنند و با گروه های عاملی دیواره سلولی میکروبی تعامل برقرار می کنند. آنها میل ترکیبی بالایی برای اتصال به گروه های تیول و اکسیژن دارند. فلزات سنگین با مهار فعالیت آنزیم ها و ایجاد تغییر در ترکیبات اسید نوکلئیک و پروتئین، بر رشد میکرو ارگانیسمها، تأثیر منفی می گذارند. در حالی که پروکاریوت‌ها دارای استراتژی‌های دفاعی لازم برای دفع فلزات سنگین هستند، استراتژی‌های کافی برای زنده ماندن

در شرایط استرس فلزی محیط را هم دارند (Xie et al., 2021).

در واقع میکروارگانیسم‌ها، مکانیسم‌های دفاعی مختلف خارج سلولی و درون سلولی را توسعه داده‌اند که به آنها کمک می‌کند تا با اثر سمی فلزات مقابله کنند و اغلب منجر به تجمع فلزات در اشکال مختلف نسبتا غیر سمی در داخل سلول می شود. این پدیده ممکن است برای سنتز انواع مختلفی از نانوذرات فلزی نیز مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که نانوذرت کاربردهای بی‌شماری در درمان سرطان داشته باشند، همواره روش های متعددی برای سنتز ساده تر شیمیایی و فیزیکی آن ابداع شده است Chaudhary et al., (2020). اما امروزه به منظور حفظ روشهای سازگار محیط زیست از موجودات بیولوژیکی مانند جلبک ها، قارچ ها، ویروس ها، باکتری ها و گیاهان برای سنتز سبز نانوذرات استفاده می شود. ریز جبلکها از استراتژی های متعددی برای زیست در حضور فلزات استفاده می کنند. برخی از این روش ها شامل اتصال یون‌های فلزی به گروه‌های عاملی با میل ترکیبی بالا، تجمع فلزات در اندامک‌های سلولی، برهمکنش فلزات با بیومولکول‌های مختلف میکروبی و خروج فعال یا حذف فلزات است Gupta and (Diwan, 2017).

در این مقاله مروری در مورد مکانیسم های متنوع مقاومت فلزات توسط جلبک ها در قالب چهار عنوان (جذب زیستی، تجمع زیستی درون سلولی، سم زدایی توسط عوامل شلاته کننده و حذف یونها توسط انتقال فعال) و کاربرد آن در سنتز نانومواد مختلف بحث می شود.

اثر سمی فلزات بر سیستم های بیولوژیکی

فلزات یک جزء جدایی ناپذیر از سیستم های اکولوژیک هستند. مقدار قابل توجهی از فلزات که وارد محیط می شوند از فعالیت های انسانی، مواد معدنی، دباغی، اتومبیل، سوخت‌های فسیلی، صنایع نفت و استفاده از کودهای دامی، لجن فاضلاب و کودهای فسفاته در خاک منشا می گیرند. بسته به عملکرد و اثرات بیولوژیکی، فلزات به دو دسته تقسیم می شوند: (١) فلزات ضروری و (٢) فلزات غیر ضروری. فلزات ضروری (مانند آهن، منگنز، مس، روی، نیکل) برای عملکرد متابولیک طبیعی مورد نیاز هستند و معمولاً به عنوان کوفاکتورهای آنزیم ها و/یا به عنوان یک ماده تشکیل دهنده برای تشکیل ساختار سلولی استفاده می شوند. این فلزات به طور کلی در غلظت بالا قابل تحمل هستند. عناصر غیر ضروری (مانند جیوه، کادمیوم، کروم، سرب) هیچ نوع عملکرد بیولوژیکی ایجاد نمی کنند و حتی در غلظت کم نیز مضر هستند. این عناصر غیر ضروری به طور کلی به عنوان فلزات سنگین گروه بندی می شوند و گزارش شده است که به طور بالقوه برای سیستم اکولوژیکی مضر هستند (Pereira et al., 2011). فلزات عموماً در طبیعت پایدار هستند و دفع نامناسب پسماندهای صنعتی منجر به تجمع فلزات در خاک و آب می شود. میکروارگانیسم ها و موجودات آبزی مستقیماً تحت تأثیر این فلزات انباشته شده قرار می گیرند که سپس وارد زنجیره غذایی می شوند و انسان را تحت تأثیر قرار می دهند. غلظت بالای سرب، کروم، اسانس و کادمیوم با سرطان و آسیب کلیه و کبد مرتبط است و بر سیستم عصبی تأثیر می گذارد. نیکل بیش از حد به عنوان سرطان زا شناخته شده است و عملکرد طبیعی سیستم ایمنی، سلول های خونی، سیستم عصبی و حتی سیستم تولید مثل را مختل می کند (Cui et al., 2021).

اثر سمی فلزات سنگین بر جلبک ها

دیواره سلولی جلبک ها عموما از سلولز تشکیل شده است و بر اساس نوع اکوسیستم، در آبهای شیرین و دریا، با تغییر غلظت یون محلول رشد می کنند و بر اساس نوع زیستگاه یا اکوسیستم، واکنش آنها به فلزات سنگین مختلف ممکن است متفاوت باشد (Nowruzi and Porzani, 2021). یون‌های فلزی موجود در مجاورت ریز جلبک ها با آنزیم‌هایی که توسط آنها آزاد می‌شوند، برهمکنش می‌کنند

یا به صورت درون سلولی جذب می‌شوند. یون های فلزی، تعدادی از واکنش های فیزیکوشیمیایی را القا می کنند که بر روند رشد طبیعی و فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم ها تأثیر می گذارد. غلظت بالای فلزات سنگین بر سیستم سلولی تأثیر منفی می گذارد و حتی باعث تغییر جمعیت سلولی می شود. تأثیر فلزات سنگین بر موجودات هم به ماهیت فلز و هم به غلظت آن بستگی دارد. فلزات سنگین/سمی عموماً فلزات ضروری را از محل اتصال آنها جابجا می کنند و به این ترتیب موجب مسمومیت می شوند.

اثر سمی یون‌های فلزی بر میکروارگانیسم‌ها توسط سه مکانیسم مختلف اعمال می شود، به این ترتیب که ابتدا گروه‌های عملکردی مولکول‌های زیستی (آنزیم‌ها و پروتئین‌ها) بلوکه می شوند، جابجایی یون‌های فلزی ضروری توسط فلزات سمی انجام می شود و در نهایت عملکرد ترکیبات زیستی مختل می گردد (Yadav et al., 2021).

فلزات سنگین در هر دو سطح سلولی و مولکولی بر جلبک ها اثر سمی دارند. رابطه معکوس بین غلظت فلز و سرعت رشد میکروبی به اثبات رسیده است. سطح سمیت فلز بر روی میکروب ها به قدرت برهمکنش کووالانسی بین فلز و گروه های دارای بار منفی روی سطح سلول های جلبکی بستگی دارد که به ترتیب به الکترونگاتیوی فلز مربوطه یا پایداری ترکیب کلات تشکیل شده در طول برهمکنش فلز بستگی دارد. با این وجود، فلزات بر سیستم میکروبی نه تنها در سطح سلولی بلکه در سطح مولکولی نیز تأثیر می‌گذارند (Cui et al., 2021).

غلظت بالای فلزات سمی، ویژگی آنزیم ها را تغییر می دهد، فعالیت آنزیم را مهار می کند و باعث تغییرات ساختاری در اسید نوکلئیک و پروتئین ها می شود که به نوبه خود بر مراحل رونویسی و ترجمه میکروب ها تأثیر می گذارد. علاوه بر این، آنها همچنین رسوبات یا کمپلکس هایی را با متابولیت ها تشکیل می دهند که منجر به از هم گسیختگی اندامک های سلولی و کل غشای سلولی می شود. به عنوان مثال سمیت کادمیوم نسبت به ریزجلبک‌ها به دلیل جایگزینی یون‌های فلزی در متالوآنزیم‌ها است و در نتیجه بر فعالیت سلولی تأثیر می‌گذارد. سرب با مهار فرآیندهای تنفسی و فتوسنتزی برای میکروجلبک‌های کلرلا و دونالیلا در هر دو سطح سلولی و آنزیمی سمی شناخته شده است (Pereira et al., 2011).

مکانیسم های تحمل فلزات سنگین در ریزجلبک

تعامل ریز جلبک ها با فلزات سمی به شدت بر فعالیت فیزیولوژیکی و آنزیمی آنها تأثیر می گذارد و در نهایت منجر به مرگ آنها می شود. جلبک ها به نوبه خود مکانیسم های دفاعی کارآمدی را ایجاد کرده اند که اثرات سمی تولید شده توسط یون های فلزی را کاهش می دهد و بقای آنها را در غلظت های بالا از این فلزات کمک می کند. آنها از هر دو حالت خارج سلولی و درون سلولی برای مبارزه با مسمومیت فلزات استفاده می کنند (Bender and Phillips, 2004).

جذب زیستی

جذب زیستی یکی از مهمترین روش هایی است که جلبک ها برای مقاومت در برابر فلزات سنگین به کار می برند و یک استراتژی دفاعی خارج سلولی است که از جذب یون های فلزی به داخل سلول جلوگیری می کند (Giner-Lamia et al., 2016). محققان، جذب زیستی را به عنوان پتانسیل مواد بیولوژیکی (جلبک ها، باکتری ها، قارچ ها، مخمرها) برای جذب فلزات سمی در ساختار سلول های میکروبی، با کمک روش های متابولیک یا فیزیکوشیمیایی تعریف می کنند (Nowruzi and Lorenzi, 2021). جذب زیستی در دو مرحله انجام می شود، در مرحله اول یون های فلزی ابتدا بر روی سطح سلول جذب می شوند و سپس وارد سلول می شوند (Porzani et al., 2021). در

حالی که مرحله اول یک مکانیسم غیرفعال مستقل از انرژی است، مرحله دوم یک فرآیند فعال وابسته به متابولیسم است و نسبتاً کندتر از مرحله قبلی است.

برهمکنش فلزات با سطح میکروبی به دلیل پیوند الکترواستاتیک، واندروال و کووالانسی یا ترکیبی از اینها اتفاق می‌افتد. سطح سلول میکروب ها به دلیل وجود پلی ساکاریدها، پروتئین ها و اسیدهای فنولیک دارای بار منفی است. اینها غنی از گروه های هیدروکسیل، کربونیل، آمین و فسفوریل هستند که در نتیجه برهمکنش با یون های فلزات سنگین کاتیونی را ترجیح می دهند (جدول یک) (Micheletti et al., 2008).

جدول ۱: خلاصه ای از سه مکان مختلف اتصال فلزات سنگین در سلولهای ریز جلبک ها (Micheletti et al., 2008**).**

	موقعیت
سلولز، پلی ساکاریدها و سایر مواد تشکیل دهنده لایه اسلیم (کربونیل (C=O) و آمین ((NH2–)) آلژینات ها و اسید گولورونیک پلی ساکاریدهای سولفاته گروه های کربوکسیلات آلژینات گروه های اسید سولفونیک	خارج سلولی
واکوئل ها	داخل سلولی
پرولین	سایر شلاتورها/پپتیدها

Chlorella vulgaris و *Chlamydomonas reinhardtii* به دلیل وجود گروه های کربوکسیل، آمینو، تیول، هیدروکسیل و فسفات در سطح سلولی خود به عنوان جاذب زیستی کارآمد برای Cd، Zn و Cu در نظر گرفته می شوند. جلبک قهوه ای *Ascophyllum nodosum* دارای پتانسیل جذب زیستی چند فلزی (مس، روی، کادمیوم) است. جذب بیولوژیکی در جلبک، *Chlamydomonas reinhardtii*، وابسته به pH و غلظت اولیه یون فلزی است (Bender and Phillips, 2004). ریزجلبک دریایی *Dunaliella salina* بسیار متحمل کادمیوم است، علاوه بر این، وجود همبستگی خطی بین غلظت کادمیوم و گروه‌های سولفیدریل، دخالت گروه‌های سولفیدریل را در تجمع درون سلولی آشکار می سازد. جذب زیستی سرب توسط زیست توده مرده جلبک های آب شیرین، *Oedogonium* sp و *Nostoc* sp مورد مطالعه قرار گرفته و کاملا کارآمد است. علاوه بر آن جذب زیستی مس توسط سلول های مرده کلرلا ولگاریس و *Zooglea ramigera* با تشکیل پیوند بین یون های فلزی و گروه های کربوکسیل و آمینو پلی ساکاریدهای دیواره سلولی اتفاق می افتد (Micheletti et al., 2008).

در ریزجلبک ها PH به عنوان یک عامل غالب در جذب فلز گزارش شده است. برخی مطالعات PH 5 را به عنوان pH بهینه شده برای سمیت کمتر فلزات گزارش کردند، زیرا در PH پایین، گروه های عاملی پروتونه می شوند که منجر به دافعه الکترواستاتیکی می شود، در حالی که در pH بالاتر، گروه های عاملی (گروه های آمینه، فسفات و کربوکسیل) دارای بار منفی هستند و به نفع جذب فلز هستند. در واقع در PH اسیدی، یون‌های H_3O^+ از جذب فلز جلوگیری می‌کنند، زیرا محل‌های اتصال روی دیواره‌های سلولی را می‌پوشانند، در حالی که در pH قلیایی، گروه‌های عاملی آزاد هستند و اجازه اتصال یون‌های فلزی را می‌دهند. جذب زیستی توسط ریز جلبک ها، مزایای مقرون به صرفه بودن، راندمان بالا و غیرسمی بودن را در مقایسه با روش‌های معمولی پاکسازی زیستی برای حذف یون‌های فلزی از محیط اطراف دارد (Freire-Nordi et al., 2005).

جذب درون سلولی و تجمع زیستی

استراتژی اصلی که برای مقاومت در برابر استرس فلز به کار می رود، جلوگیری از ورود فلز به داخل سلول است (Giner-Lamia et al., 2016). با این حال، رسوب و تجمع زیستی یون‌های فلزی در اندامک‌های سلولی مختلف (بخش‌بندی) یکی دیگر از مکانیسم‌هایی است که عمدتاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند تجمع زیستی یک فرآیند وابسته به متابولیسم است و از این رو فقط در سلول های زنده امکان پذیر است (Bender and Phillips, 2004).

ریزجلبک‌ها یون‌های فلزی محبوس‌شده را در اندامک‌های سلولی مختلف رسوب داده و برای زنده ماندن از استرس فلزات سنگین درون خود جمع می‌کنند (Ahari et al., 2021). حضور گروه‌های عاملی با میل ترکیبی بالا روی سطح سلولی ریزجلبک‌ها، آنها را مستعد جذب می‌کند و از این رو به عنوان عوامل کارامد برای سیستم‌های ذخیره‌سازی فلز عمل می‌کنند. به عنوان مثال جلبک سبز، *Cladophora aglomerata*، یون های فلزی مانند Pd، Cd، Ni، Cr و V را جمع می کند. حذف فلزات سنگین (Hg، Pb، Cd) در سه سویه ریز جلبک *Phormidium ambiguum*، *Pseudochlorococcum typicum* و *Scenedesmus quadricadavar quadrispina* در واکوئل ها و سیتوپلاسم به صورت رسوب آشکار شده است (Gupta and Diwan, 2017).

سم زدایی فلزات توسط شلاتورها

سم زدایی فلزات، یکی دیگر از مکانیسم های دفاعی استراتژی برای مقاومت در برابر فلزات سنگین است. جلبک ها در پاسخ به یون های فلزی مولکول های کیلیت ترشح می کنند، این عوامل کیلیت می توانند متالوتیونین ها یا سایر مولکول های حاوی تیول باشند. در موارد دیگر، ترشح اسید آلی (به عنوان مثال، اسید اگزالیک) نیز به عنوان یک استراتژی موثر برای مقاومت در برابر استرس بالای فلز در نظر گرفته می شود (Giner-Lamia et al., 2016). ترکیبات کلات کننده مختلف مانند پپتیدها، آنزیم ها، پروتئین ها و مولکول های گروه تیول نیز به سم زدایی فلزات کمک می کنند. علاوه بر آن سنتز آنزیم های پرولین، مالون دی آلدئید و کاتالاز در پاسخ به استرس سرب نیز گزارش شده است (Bender and Phillips, 2004). فیتوکلاتین و متالوتیونین ها دو گروه مهم از پپتیدها را نشان می دهند که توسط ریزجلبک ها برای سم زدایی فلزات استفاده می شوند. ریزجلبک ها از مولکول های پپتیدها برای اتصال به یون های فلزی استفاده می کنند تا آنها را درون اندامکهای سلولی نگهداری کنند (Nowruzi and Lorenzi, 2021). فیتوکلاتین گروهی از پپتیدهای اتصالی به فلزات سنگین هستند که فلزات را توسط گروه های سیستئینیل تیول متصل می کنند و یون های فلزی را غیرسمی می کنند. در جلبک دریایی، *Dunaliella tertiolecta*، روی به شدت سنتز فیتوکلاتین را القا می کند و پیش تیمار جلبک با روی منجر به افزایش تحمل نسبت به سایر فلزات سنگین مانند کادمیوم، جیوه، مس، سرب و نقره می شود. کادمیوم باعث افزایش بیشتر فعالیت سنتاز فیتوکلاتین ها در مقایسه با روی می شود. گاهی ریزجلبک ها به جای فیتوکلاتین، از یک تری پپتید Arg-Arg-Glu استفاده می کنند که به جیوه متصل می شود و یون های فلزات سنگین را از بین می برد. به عنوان مثال جلبک سبز، *Chiamydomonas reinhardtii*، پپتیدهای اتصالی به فلزات سنگین را در پاسخ به فلزات کادمیوم، جیوه و نقره تولید می کند. به این ترتیب که در حضور کادمیوم، آنها الیگوپپتیدهای متشکل از گلوتامیک اسید، سیستئین و گلیسین را انباشته می کنند که مشخص شد حدود ۷۰ درصد کادمیوم را جدا می کند و گلوتاتیون را زمانی که سلول‌ها در معرض استرس جیوه قرار گرفتند، سنتز می کنند، این نشان می دهد که گلوتاتیون نه تنها به عنوان جزئی از متالوتیونین ها عمل می کند، بلکه خود می تواند به عنوان

یک عامل سم زدایی نیز عمل کند (Yadav et al., 2021). در پاسخ به استرس نقره نیز یک جزء حاوی گوگرد مشابه پپتیدهای ناشی از کادمیوم تولید می شود. محققان دیگر در حین کار بر روی تحمل مس در *Oocystis nephrocytioides*، تجمع داخل سلولی مس را در تیلاکوئیدها و پیرنوئیدها همراه با سنتز لیگاندهای کمپلکس مس گزارش کردند. بنابراین آنها به این نتیجه رسیدند که جلبک از تشکیل کمپلکس یون مس با لیگاندها و به دنبال آن قرار دادن آن در اندامکها به عنوان ابزار تحمل مس استفاده می کند (Freire-Nordi et al., 2005).

حذف فلز با انتقال

سیستم‌های انتقال غیراختصاصی مختلفی در میکروارگانیسم‌ها وجود دارند که هم فلزات ضروری و هم غیرضروری را جذب می‌کنند. با این حال، وقتی یون‌های فلزی با غلظت بالا تجمع می‌یابند، به طور بالقوه برای میکروارگانیسم‌ها سمی می‌شوند، بنابر این سیستم‌های خروجی خاصی فعال می‌شوند که فلزات را حذف می‌کنند (Freire-Nordi et al., 2005). مکانیسم انتقال فعال، به شدت در ایجاد مقاومت فلزی در میکروارگانیسم ها نقش دارد، به این ترتیب که یون های فلزی انباشته شده در سیتوپلاسم از داخل سلول به بیرون دفع می شوند (Giner-Lamia et al., 2016).

سنتز نانوذرات توسط ریز جلبک ها، به ذراتی اطلاق می‌شود که ابعاد آنها در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد ذرات، آنها دارای خواص شگفت انگیزی هستند که به موجب آن در زمینه های مختلف علم کاربرد دارند. جلبک ها دارای ظرفیت احیای یون های فلزی به کمک آنزیم های خاص هستند. این فرآیند احیای یون های فلزی می تواند هم به صورت خارج سلولی و هم درون سلولی رخ دهد (Rai et al., 2019).

سنتز نانوذرات توسط ریز جلبک ها

نانوذرات فلزی به طور کلی، محدود به فلزاتی مانند نقره، طلا، روی، آهن، مس، پالادیوم، پلاتین و کادمیوم نیستند. آنها ممکن است به صورت نانوذرات فلزی خالص مانند ذرات طلا و نقره یا به صورت نانوذرات اکسید فلزی مانند اکسید آهن، اکسید روی و اکسید مس نیز تهیه شوند. نانوذرات طلا و نقره به دلیل خواص نوری منحصربه‌فردشان برای کاربرد در سنجش های زیستی، تصویربرداری سلولی و دارو رسانی بیش از هر نانوذرات فلزی دیگری مورد توجه قرار گرفته‌اند (Rai et al., 2019). از سوی دیگر، خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن، آنها را به کاندیدای مناسبی برای کاربردهای زیست پزشکی و تکنیک‌های جداسازی تبدیل می‌کند. با توجه به کاربردهای متنوع این نانوذرات، تلاش زیادی برای سنتز بیوژنیک آنها انجام شده است. در این راستا نقش ریز جلبک ها به اندازه هر موجود زیستی دیگر قابل توجه است (Nowruzi et al., 2020).

چهار تیره اصلی از جلبک ها که تاکنون برای مطالعه ریز جلبک ها مورد مطالعه قرار گرفتند، عبارتند از Cyanophyceae، Chlorophyceae، Phaeophyceae و Rhodophyceae (جدول دو). ریزجلبک‌ها مزیت تکثیر سریع‌تر با رشد اتوتروف و امکان سنتز در مقیاس بزرگ را بدون نیاز به هرگونه مشکلات زیست محیطی دارند. یون های فلزی توسط سلول های دست نخورده جلبک، زیست توده زنده یا مرده یا عصاره جلبک ها در معرض احیا قرار می گیرند. بیومولکول‌های جلبکی مسئول پایداری نانوذرات نیز هستند. بسته به نوع جلبک و روش ترکیب شده، سنتز نانوذرات می تواند درون سلولی یا خارج سلولی باشد. در سنتز درون سلولی، احیای یون های فلزی و متعاقب آن تشکیل نانوذرات به متابولیسم جلبک مربوطه بستگی دارد. تشکیل و تثبیت نانوذرات فلزی مربوطه در اندامک‌های سلولی صورت می‌گیرد (Kulal et al., 2022).

مکانیزم مشابهی برای سنتز داخلی نانوذرات اکسید فلز گزارش شده است. با این حال، آنچه که بر تمایز بین شکل‌گیری زیستی نانوذرات فلزی یا اکسید فلزی در سلول‌ها حاکم است، هنوز در دست مطالعه است. سنتز خارج سلولی نانوذرات در جایی که عصاره آبی جلبک حاوی پلی ساکارید، پروتئین و رنگدانه است که به ترتیب به عنوان عوامل احیا کننده و تثبیت کننده یون های فلزی و نانوذرات فلزی عمل می کنند، نسبتا ساده تر به نظر می رسد. پارامترهایی مانند pH، دما، غلظت یون های فلزی و مدت زمان قرار گرفتن در معرض می توانند به طور قابل توجهی بر شکل، اندازه و پایداری نانوذرات فلزی تأثیر بگذارند. تشکیل نانوذرات در یک مخلوط واکنش را می توان به صورت بصری بررسی کرد. به طور کلی تغییر رنگ با تشکیل نانوذرات فلزی همراه است. رنگ قهوه ای نشان دهنده تشکیل نانوذرات نقره است، در حالی که نانوذرات طلا رنگ قرمز یا صورتی را به محلول می دهند (Husain et al., 2021).

نانو ذرات نقره

بیوسنتز نانوذرات نقره با استفاده از جلبک به طور گسترده تحت فرآیندهای in vitro و in vivo مورد مطالعه قرار گرفته است. در یک مطالعه، عصاره اتانولی سه ریزجلبک مختلف آب شیرین به نام *Dictyosphaerium* sp. سویه HM1، *Dictyosphaerium* sp. سویه HM2 و *Pectinodesmus* sp سویه HM3 برای سنتز نانوذرات نقره مورد مطالعه قرار گرفتند. بررسی مقایسه ای اندازه و شکل نانوذرات سنتز شده توسط سه سویه نشان می دهد که میانگین اندازه نانوذرات نقره توسط HM1، HM2 و HM3 به ترتیب ۲۲/۵ نانومتر، ٤٧/٥ نانومتر و ۵۷/۵ نانومتر بوده است. اگرچه نانوذرات سویه‌های HM1 و HM2 کروی بودند، اما آن‌هایی که توسط HM3 تشکیل شده‌اند، تخم مرغی بودند (Aziz et al. 2021).

در مطالعه دیگری، سنتز نانوذرات نقره با ابعاد ۵ تا ۵۰ نانومتر با استفاده از ریزجلبک عصاره اسپیرولینا گزارش شد. عصاره جلبک در معرض محلول $AgNO_3$ قرار گرفت و در دمای اتاق انکوبه شد تا محلول قهوه ای مایل به زرد به دست آمد. هیچ عامل کاهش دهنده یا تثبیت کننده دیگری استفاده نشد. سنتز نانوذرات نقره با استفاده از ریزجلبک‌های مختلف دریایی از جمله کلروفیت‌های *Tetraselmis gracilis* و *Chlorella salina*، *Chaetoceros calcitrans*، دیاتومه‌ها و *Isochrysis galbanahas* نیز گزارش شده است. نانوذرات سنتز شده بیش از یک ماه پایداری خود را نشان دادند. در مطالعات فوق، نانوذرات سنتز شده خواص ضد میکروبی قابل توجهی از خود نشان دادند که بخشی از آن به دلیل قابلیت ذاتی فلز نقره در فعالیت ضد میکروبی و افزایش بیشتر آن به دلیل تشکیل نانوذرات است (Younis et al., 2022).

در یک مطالعه جامع از مکانیسم سنتز نانوذرات نقره توسط *Chlamydomonas reinhardtii*، سنتزهای in vitro و in vivo مورد مطالعه قرار گرفت. در حالی که سنتز آزمایشگاهی کند بود و حدود ۱۳ روز طول کشید، سنتز in vivo سریعتر بود و تنها ۱۰ ساعت طول کشید و نانوذرات تشکیل شده گرد و مستطیل شکل بودند. سایر گونه‌های ریز جلبکی که قادر به سنتز نانوذرات نقره هستند عبارتند از: *Chlorella*، *Chlorococcum humicola*، *Scenedesmus* sp.، *Oscillatoria willei* و *Arthrospira platensis*. در مطالعه دیگری گونه‌های *Gloeocapsa*، *Microcoleus*، *Synechococcus*، *Oscillatoria*، *Phormidium*، *Aphanotheca* و *Aphanocapsa* مورد آزمایش قرار گرفتند که در این میان تنها عصاره *Microcoleus* منجر به سنتز نانوذرات نقره شد. سلول‌های زنده *Plectonema boryanum* UTEX 485، یک سیانوباکتری رشته‌ای، نانوذرات نقره کروی و هشت‌وجهی را هنگامی که در دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه

سانتی‌گراد در معرض محلول نیترات نقره قرار می‌گیرند، تولید کردند. نانوذراتی با ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر در داخل سلول ها و ذرات بین ۱ تا ۲۰۰ نانومتر در محلول تشکیل شدند. با این حال، زمانی که واکنش مشابهی با سلول‌های مرده سیانوباکتری انجام شد، تشکیل نانوذره نقره در همان محدوده دمایی مشاهده نشد. نتایج نشان داد که احیای زیستی $AgNO_3$ می تواند با فرآیند متابولیک تبدیل نیترات، نیتریت و آمونیاک مرتبط باشد که قبل از مرگ سلولی به صورت گلوتامین تثبیت می شود (Aziz et al. 2021).

دیاتومه هایی مانند ناویکولا و آمفورا نیز برای سنتز نانوذرات نقره مورد بررسی قرار گرفتند. از سلول‌های ناویکولا برای احیای AgNO3 به نانوذرات نقره استفاده شد. رنگدانه حساس به نور، فوکوگزانتین، موجود در سلول های دیاتوم ها به عنوان عامل احیا کننده کشف شد. محققان در مطالعه دیگری دخالت گروه های کربوکسیلیک، آمینی و پلی فنولی را برای سنتز نانوذرات طلا با استفاده از جلبک *Turbinaria conoides* گزارش کردند و فوکوگزانتین را به عنوان عامل احیا کننده شناسایی کردند. نانوذرات مربوطه فعالیت ضد باکتریایی قابل توجهی در برابر باکتری های گرم مثبت و گرم منفی نشان دادند Bhardwaj and Naraian, (2021).

نانو ذرات طلا

نانوذرات طلای بیوسنتز شده به دلیل کاربردهای متنوع در پزشکی، فوتونیک، الکترونیک، اپتیک و کاتالیزور، توجه محققان را به خود جلب کرده است. مانند سنتز نانوذرات نقره، جلبک ها نیز نقش مهمی در سنتز سبز نانوذرات طلا به صورت هم سنتز درون سلولی و هم خارج سلولی دارند. در یک مطالعه، تغییرات بیوشیمیایی مربوط به بیوسنتز نانوذرات طلا با استفاده از جلبک سبز *Rhizoclonium fontinale* مورد ارزیابی قرار گرفت. PHهای مختلف، نانوذرات طلای کروی با اندازه های مختلف را به دست آورد. در pH، ۵ ، ۷ و ۹ نانوذرات به ترتیب با اندازه متوسط ۱۵٦/٦ نانومتر، ۱٤۸ نانومتر و ۱٤۵ نانومتر تشکیل شدند. در طی ۷۲ ساعت از قرار گرفتن در معرض نمک طلا، تغییرات بیوشیمیایی مختلفی در سلول های جلبک مشاهده شد. محتوای کلروفیل همراه با محتوای کربوهیدرات به طور قابل توجهی کاهش یافته بود که نشان دهنده سمیت است. از سوی دیگر، افزایش تدریجی پراکسیداسیون لیپیدی و فعالیت کاتالاز مشاهده شد. تغییرات مورفولوژیکی مانند ضخیم شدن دیواره سلولی، از دست دادن رنگدانه و پیکنوز نیز ثبت شد. رنگ بنفش سلول ها نشان دهنده سنتز داخلی و رسوب نانوذرات طلا بود. سایر ریزجلبک‌های مورد استفاده در سنتز نانوذرات طلا عبارتند از: *Chlorella vulgaris*، *Klebsormidium flaccidum* و *Tetraselmis*. Bhardwaj and Naraian, (2021).

روش سنتز معمولا از مراحل معمول قرار دادن سلول های جلبک یا عصاره جلبک در معرض نمک طلا و مشاهده تغییرات رنگی مخلوط واکنش پیروی می کند. تشکیل نانوذرات طلا با ظهور رنگ قرمز یا بنفش در محلول در دمای اتاق همراه است. حتی دیاتومه هایی مانند *Navicula atomus* CCALA 383 و *Diadesmis gallica* CCALA 766 به ترتیب نانوذرات طلای درون سلولی ۹ نانومتر و ۲۲ نانومتر تولید می کنند. *Sargassum wightii*، جلبک دریایی است که قادر به سنتز خارج سلولی نانوذرات طلای پایدار در محدوده ۸ تا ۱۲ نانومتر است (El-Sheekh et al., 2021).

نانوذرات اکسید فلز

نانوذرات اکسید فلز به طور گسترده در الکترونیک، پوشش‌های سطحی، فناوری سلول‌های سوختی، دستگاه‌های حسگر و کاتالیز استفاده می‌شوند. اکسیدهای فلزی به دلیل اشکال مختلف خود دارای خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی هستند. در نتیجه، نانوذرات اکسید فلزی

دارای خواص نوری، مغناطیسی و الکترونیکی منحصر به فردی هستند (Kulal et al., 2022).

روش های سنتز بیولوژیکی با استفاده از عصاره گیاهان، باکتری ها، قارچ ها و جلبک ها گزارش شده است. با این حال، گزارش‌های بسیار کمی در مورد سنتز نانوذرات اکسید فلزی مبتنی بر جلبک وجود دارد. در این میان، نانوذرات اکسید آهن، اکسید مس و اکسید روی بیشتر برای ماکروجلبک ها گزارش شده‌اند تا ریزجلبک‌ها. در یکی از این مطالعه‌ها، عصاره‌های عاری از سلول ریزجلبک *Chlamydomonas reinhardtii* برای سنتز نانوذرات اکسید روی استفاده شد. علاوه بر آن اگرچه هیچ گزارشی مبنی بر استفاده مستقیم از هیچ دیاتومی برای سنتز نانوذرات اکسید فلزی وجود ندارد، نتایج یک مطالعه نشان داد که دیاتوم‌های محصور در نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان وسیله نقلیه انتقال مولکول‌های درمانی کوچک به سلول‌های تومور طراحی شده‌اند (Chaudhary et al., 2020).

سایر نانوذرات

جالب توجه است که سنتز مبتنی بر ریز جلبک به نانوذرات ذکر شده در بالا محدود نمی شود. بلکه سنتز نانوذرات پالادیوم نیز با استفاده از عصاره کلرلا ولگاریس گزارش شده است. اندازه متوسط نانوذرات پالادیوم، ۱۵ نانومتر گزارش گردید. طیف‌سنجی FTIR نشان داد که گروه‌های پلی‌ال و آمید به ترتیب در احیا و سنتز نانوذرات پالادیوم نقش داشتند. نانوذرات سنتز شده برای جذب آرسنیک (III) از محلول آبی بسیار کارامد بودند، به این ترتیب که ۹۹/۸ درصد آرسنیک با استفاده از ۰/۵ گرم از نانوذرات تنها در ۵ دقیقه پس از قرار گرفتن در معرض گزارش شده است (Bhardwaj and Naraian, 2021). عصاره جلبک سبز آبی *Spirulina platensis* نیز برای سنتز نانوذرات پالادیوم گزارش شده است. قابلیت جذب سرب توسط نانوذرات پالادیم در pH و دوز های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تا ۹۰ درصد حذف سرب در ۰/۵ گرم در لیتر نانوذرات در pH ٦ گزارش گردید. بسیاری از گونه های جلبک به جذب فلزات سنگین و حفظ آنها در داخل سلول های خود به عنوان نانوذرات فلزی شناخته شده هستند. در یک مطالعه، ریز جلبک سبز *Scenedesmus* نشان داد که کادمیوم را جدا کرده و آن را به عنوان نانوذرات سولفید کادمیوم در داخل سلول های خود نگه می دارد. سلول های ریزجلبک می توانند غلظت کادمیوم تا ۳۰ میلی گرم در لیتر و پس از آن رسوب درون سلولی نانوذرات سولفید کادمیوم را تحمل کنند. سایر ریزجلبک‌های گزارش شده برای استفاده در سنتز نانوذرات CdS عبارتند از: *Spirulina platensis*، *Chlamydomonas reinhardtii*، *Phormidium tenue NTDM05*، *Diatom Phaeodactylum tricornutum*. (Kulal et al., 2022). نانوذرات کادمیوم سنتز شده با استفاده از *C. reinhardtii* کروی با اندازه تقریبی ۵ نانومتر بودند و فوتوکاتالیست موثری در تخریب رنگ متیلن بلو در زیر نور فرابنفش بودند. در مطالعه دیگری از رنگدانه C-phycoerythrin برای سنتز نانوذرات سولفید کادمیوم استفاده شد. گزارش شده است که رنگدانه یک عامل تثبیت کننده برای نانوذرات است. در مطالعه جالب دیگری، نانوذرات سولفید کادمیوم پوشیده شده با فیتوکلاتین از سلول‌های دیاتوم *Phaeodactylum tricornutum*، که قبلا در معرض Cd قرار گرفته بودند، جدا شدند. این فرآیند شامل دو مرحله بود که در آن ابتدا فیتوکلاتین‌ها، کادمیوم را جدا کردند و سپس سولفید ناپایدار درون کلاسترهای فلز-تیولات گنجانیده شد (Kulal et al., 2022).

جدول ۲: نانوذرات مختلف سنتز شده توسط ریزجلبک ها و کاربردهای آنها (Rai et al., 2019).

نانو ذرات	دسته جلبک ها	جلبک ها	کاربرد
نقره	Chlorophyte	*Dictyosphaerum, Pectinodesmus*	فعالیت ضد باکتری، ضد ویروسی و سیتوتوکسیک
		Tetraselmis gracilis	فعالیت ضد باکتریایی
		Chlorella salina	فعالیت ضد باکتریایی و فوتوکاتالیستی
		Chlorella vulgaris	فعالیت ضد باکتریایی
		Chlamydomonas reinhardtii	
		Chlorococcum humicola	فعالیت ضد باکتریایی
		Scenedesmus sp.	فعالیت ضد باکتریایی
	Haptophyte	*Isochrysis galbana*	فعالیت ضد باکتریایی
	Ochrophyte	*Nannochloropsis oculata*	
	Cyanobacteria	*Spirulina*	فعالیت ضد باکتریایی
		Arthrospira platensis	
		Microcoleus	فعالیت ضد باکتریایی
		Plectonema boryanum	
		Oscillatoria willei NTDM01	
	Diatom	*Navicula*	فعالیت ضد باکتریایی
		Amphora	فعالیت ضد باکتریایی
		Chaetoceros calcitrans	فعالیت ضد باکتریایی
طلا	Chlorophyte	*Rhizoclonium fontinale*	پراکسیداسیون لیپیدی و فعالیت کاتالازی
		Chlorella vulgaris	
		Klebsormidium flaccidum	
		Tetraselmis	
	Cyanobacteria	*Plectonema boryanum*	
	Diatom	*Navicula atomus, Diadesmis gallica*	بیونانو کامپوزیت بر پایه سیلیس
اکسید روی	Chlorophyte	*Chlamydomonas reinhardtii*	تجزیه متیل اورنج
پالادیوم	Chlorophyte	*Chlorella vulgaris*	جذب آرسنیک
	Cyanobacteria	*Spirulina platensis*	جذب سرب
سولفید کادمیوم	Chlorophyte	*Scenedesmus*	جذب کادمیوم
		Chlamydomonas reinhardtii	تجزیه متیلن بلو
	Cyanobacteria	*Spirulina platensis*	تخریب سبز مالاکیت
		Phormidium tenue NTDM05	برچسب گذاری زیستی
	Diatom	*Phaeodactylum tricornutum*, Bohlin	جذب کادمیوم

نتیجه گیری

برهمکنش جلبک ها با غلظت بالای فلزات باعث ایجاد تغییرات مورفولوژیکی و فیزیکوشیمیایی در آنها می شود. برای غلبه بر این اثرات سمی، آنها مکانیسم های دفاعی فعالی مانند جذب زیستی، تجمع زیستی، جداسازی، کلاته سازی و انتقال فعال از سلول را ایجاد کرده اند. با اینکه تاکنون مطالعات گسترده ای برای شناسایی اقدامات دفاعی جلبک ها انجام شده است، با این حال، هنوز چیزهای زیادی است که باید بررسی گردید. در واقع درک مکانیسم کامل سمیت فلزات سنگین منجر به توسعه استراتژی‌های بیوتکنولوژیکی جدید برای پاکسازی زیستی نمونه‌های خاک و آب های آلوده خواهد شد. علاوه بر آن شناخت کامل مکانیسم مقاومت به ما کمک می کند تا اثر سمی فلزات را به حداقل برسانیم و اینگونه به تعادل محیط زیست کمک کنیم. در این راستا انتخاب و دستکاری ژنتیکی سویه های جلبکی با مقاومت بالا در برابر فلزات سنگین می تواند چاره ساز باشد. از طرف دیگر از آنجاییکه متابولیتهایی مانند پروتئین ها، شلاتورها و متالوتیونین ها، خود به عنوان عوامل ترکیبی با فلزات سنگین و تبدیل آنها به ترکیبات غیر سمی شناخته شدند، می توان با القای سنتز آنها به بهبود پتانسیل بردباری کمک کرد. در واقع پیشرفت بیوتکنولوژی سنتز سبز نانوذرات برای حذف فلزات سمی به پاکسازی زیستی فلزات سمی از مکان‌های آلوده و پساب‌های صنعتی و زباله‌های الکترونیکی، کمک به سزایی خواهد کرد.

منابع:

Ahari, H., Nowruzi, B., Anvar, A. A., & Porzani, S. J. (2021). The Toxicity Testing of Cyanobacterial Toxins In Vivo and In Vitro by Mouse Bioassay: A Review. *Mini reviews in medicinal chemistry*.

Aziz M, Zaki A, Ahamad I, Fatma T. Silver Nanoparticle Synthesis from Cyanobacteria: Environmental and Biomedical Applications. InEmerging Technologies for Nanoparticle Manufacturing 2021 (pp. 461-472). Springer, Cham.

Bender, J and Phillips, P. 2004. Microbial mats for multiple applications in aquaculture and bioremediation. BIORESOUR. TECHNOL, 94: 229–238.

Bhardwaj AK, Naraian R. Cyanobacteria as biochemical energy source for the synthesis of inorganic nanoparticles, mechanism and potential applications: a review. 3 Biotech. 2021 Oct;11(10):1-6.

Chaudhary R, Nawaz K, Khan AK, Hano C, Abbasi BH, Anjum S. An overview of the algae-mediated biosynthesis of nanoparticles and their biomedical applications. Biomolecules. 2020 Nov;10(11):1498.

Cui J, Xie Y, Sun T, Chen L, Zhang W. Deciphering and engineering photosynthetic cyanobacteria for heavy metal bioremediation. Science of The Total Environment. 2021 Mar 20;761:144111.

El-Sheekh MM, Hassan LH, Morsi HH. Assessment of the in vitro anticancer activities of cyanobacteria mediated silver oxide and gold nanoparticles in human colon CaCo-2 and cervical HeLa cells. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2021 Dec 1;16:100556.

Freire-Nordi, C. S., Vieira, A. A. H and Nascimento, O. R. 2005. The metal binding capacity of *Anabaena spiroides* extracellular polysaccharide: an EPR study. PROCESS BIOCHEM, 40: 2215– 2224.

Giner-Lamia, J., Pereira, S.B., Bovea-Marco, M., Futschik, M.E., Tamagnini, P. and Oliveira, P., 2016. Extracellular proteins: novel key components of metal resistance in cyanobacteria?. *Frontiers in microbiology*, *7*, p.878.

Nowruzi, B., Sarvari, G., & Blanco, S. (2020). Applications of cyanobacteria in biomedicine. In *Handbook of Algal Science, Technology and Medicine* (pp. 441-453). Academic Press.

Pereira, S., Micheletti, E., Zille, A., Santos, A., Moradas-Ferreira, P., Tamagnini, P and DE Philippis, R. 2011. Using extracellular polymeric substances (EPS)-producing cyanobacteria for the bioremediation of heavy metals: do cations compete for the EPS functional groups and also accumulate inside the cell?. MICROBIOLOGY, 157: 451–458.

Porzani, S. J., Lima, S. T., Metcalf, J. S., & Nowruzi, B. (2021). In Vivo and In Vitro Toxicity Testing of Cyanobacterial Toxins: A Mini-Review. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 258*, 109-150.

Rai S, Wenjing W, Shrivastava AK, Singh PK. Cyanobacteria as a source of nanoparticles and their applications. InRole of plant growth promoting microorganisms in sustainable agriculture and nanotechnology 2019 Jan 1 (pp. 183-198). Woodhead Publishing.

Xie Y, Bu H, Feng Q, Wassie M, Amee M, Jiang Y, Bi Y, Hu L, Chen L. Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass. Environmental Research. 2021 Sep 1;200:111730.

Yadav AP, Dwivedi V, Kumar S, Kushwaha A, Goswami L, Reddy BS. Cyanobacterial extracellular polymeric substances for heavy metal removal: a mini review. Journal of Composites Science. 2021 Jan;5(1):1.

Younis NS, Mohamed ME, El Semary NA. Green Synthesis of Silver Nanoparticles by the Cyanobacteria Synechocystis sp.: Characterization, Antimicrobial and Diabetic Wound-Healing Actions. Marine Drugs. 2022 Jan;20(1):56.

Gupta, P. and Diwan, B., 2017. Bacterial exopolysaccharide mediated heavy metal removal: a review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies. *Biotechnology Reports*, *13*, pp.58-71.

Husain S, Verma SK, Azam M, Sardar M, Haq QM, Fatma T. Antibacterial efficacy of facile cyanobacterial silver nanoparticles inferred by antioxidant mechanism. Materials Science and Engineering: C. 2021 Mar 1;122:111888.

Hu X, Liu X, Qiao L, Zhang S, Su K, Qiu Z, Li X, Zhao Q, Yu C. Study on the spatial distribution of ureolytic microorganisms in farmland soil around tailings with different heavy metal pollution. Science of The Total Environment. 2021 Jun 25;775:144946.

Kulal DK, Navale DN, Zote SW, Ranade PB, Kalambate PK. Cyanobacteria: As a promising candidate for nanoparticles synthesis. InCyanobacterial Lifestyle and its Applications in Biotechnology 2022 Jan 1 (pp. 351-360). Academic Press.

Micheletti, E., Colica, G., Viti, C., Tamagnini, P and De Philippis, R. 2008. Selectivity in the heavy metal removal by exopolysaccharide-producing cyanobacteria. J. APPL. MICROBIOL, 105: 88–94.

Nowruzi, B., & Lorenzi, A. S. (2021). Production of the neurotoxin homoanatoxin-a and detection of a biosynthetic gene cluster sequence (anaC) from an Iranian isolate of Anabaena. *South African Journal of Botany*, *139*, 300-305.

Nowruzi, B., & Porzani, S. J. (2021). Toxic compounds produced by cyanobacteria belonging to several species of the order Nostocales: A review. *Journal of Applied Toxicology*, *41*(4), 510-548.

Nowruzi, B., & Lorenzi, A. S. (2021). Characterization of a potentially microcystin-producing Fischerella sp. isolated from Ajigol wetland of Iran. *South African Journal of Botany*, *137*, 423-433.

A review of the industrial application of microalgae and cyanobacteria in the removal of heavy metals and the synthesis of nanoparticles

Bahareh Nowruzi[1]

1.Department of Biology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
*Corresponding author Bahareh Nowruzi (bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir)

Abstract
Irregular emissions of metals from various industrial, agricultural and human sources have led to environmental pollution of heavy metals. Heavy metals are highly toxic to humans and animals. Among them, microalgae and cyanobacteria with the potential to grow in extreme conditions, including places contaminated with heavy metals, have effective defense strategies to combat the toxic effects of heavy metal ions. In this way, they can accumulate high concentrations of heavy metals in their cellular organs. Potential efficiency in metal adsorption, accumulation and resistance in microalgae has led to their recognition as efficient microorganisms in the biosynthesis of metal nanoparticles and metal oxides. In this review article, the aim is to investigate different strategies for the removal of heavy metals as well as the mechanisms of nanoparticle synthesis by microalgae. Obviously, studying the widespread use of microalgae in the bioremediation industry can play an important role in conserving our environmental resources in the future.

Key words: Microalgae, Cyanobacteria, Heavy metals, Nanoparticles