

مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۰۶۳۲ - ۲۷۱۷، شاپای الکترونیکی: ۹۸۰۴ - ۲۷۱۶

نقش زیست فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست محیطی فعالیت های معدنی بر اکوسیستم ها

نوع مقاله: مروری

نادیا بابایی

دبیرخانه شورای ملی ایمنی زیستی، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران
nbabaei140404@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

صفحه ۵۵-۴۳

چکیده

گسترش فعالیت های معدنی، علی رغم نقش مهم آن در توسعه اقتصادی، پیامدهای زیست محیطی گسترده ای بر اکوسیستم ها، به ویژه زیستگاه های جانوری، بر جای می گذارد. آلودگی خاک و منابع آبی به فلزات سنگین، تخریب زیستگاه ها و اختلال در زنجیره های غذایی از جمله مهم ترین اثرات منفی معدن کاری به شمار می روند. در سال های اخیر، زیست فناوری و مهندسی ژنتیک، از طریق توسعه میکروارگانیسم ها و گیاهان تراریخته، به عنوان رویکردهایی نوین و پایدار برای کاهش این پیامدها مورد توجه قرار گرفته اند. این مقاله مروری با هدف تبیین نقش زیست فناوری در کاهش اثرات زیست محیطی فعالیت های معدنی، به بررسی پیشرفت های اخیر در حوزه هایی نظیر بیوماینینگ، پالایش زیستی و تثبیت آلاینده ها با استفاده از موجودات تراریخته می پردازد. همچنین، کارکرد این رویکردها در حفاظت از اکوسیستم ها و حیات جانوری، در کنار چالش ها، ملاحظات ایمنی زیستی و چشم اندازهای آینده کاربرد زیست فناوری در مدیریت پایدار مناطق معدنی، مورد بحث و تحلیل قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: اکوسیستم های جانوری، زیست پالایی، زیست فناوری، معدن کاری، موجودات تراریخته

مقدمه

فعالیت‌های معدن‌کاری، اگرچه یکی از منابع اصلی تامین مواد اولیه برای صنایع مدرن و توسعه اقتصادی محسوب می‌شوند، لیکن پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها و به‌ویژه زیستگاه‌های جانوری دارند (Lottermoser, 2023). معدن‌کاری معمولاً با آزادسازی مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین و ترکیبات سمی در آب، خاک و هوا همراه است که اثرات آن می‌تواند فراتر از محدوده محل معدن گسترش یابد و به کیفیت زیستگاه‌ها و عملکرد اکولوژیک کل منطقه زیستی آسیب وارد کند (Islam et al., 2024; Zhakypbek et al., 2024). آلودگی‌های فلزی از طریق تجمع زیستی می‌توانند وارد زنجیره‌های غذایی شوند و موجب اختلالات فیزیولوژیک، کاهش نرخ تولیدمثل و افزایش مرگ‌ومیر در گونه‌های جانوری شوند (Islam et al., 2024; Xu et al., 2024). اثرات تجمع فلزات سنگین بر گونه‌های آبی و زمینی از جمله تهدیدها برای سلامت جمعیت‌های حیاتی است که می‌تواند ساختار و عملکرد اکوسیستم را دچار اختلال کند (Islam et al., 2024).

با توجه به این خطرات گسترده، توسعه و به‌کارگیری راهکارهای زیست‌محیطی پایدار برای کاهش اثرات معدن‌کاری ضروری است. زیست‌فناوری محیط‌زیست، به‌ویژه کاربرد میکروارگانیسم‌ها، گیاهان و زیست‌فرایندهای طبیعی/اصلاح‌شده، در زیست‌پالایی و بهبود کیفیت خاک و آب آلوده نشان داده است که می‌تواند گزینه‌ای مؤثر، اقتصادی و دوستدار محیط برای کاهش بار آلاینده‌ها در اکوسیستم‌ها باشد (Islam et al., 2024; Li et al., 2024; Zhakypbek et al., 2024).

روش‌های زیست‌پالایی می‌توانند با استفاده از سازوکارهایی مانند بیوسوربسیون، بیواکتاومولاسیون و بیوترانسفورماسیون، فلزات

سنگین را از محیط‌های آلوده حذف یا غیرسمی کنند (Aslam et al., 2025). این رویکردها به‌عنوان راهکارهای قابل‌انکسار در برابر روش‌های فیزیکوشیمیایی پرهزینه و دارای عوارض ثانویه مطرح هستند، زیرا هم مقرون‌به‌صرفه‌اند و هم کمترین آسیب جانبی را به اکوسیستم وارد می‌کنند (Zhakypbek et al., 2024; Aslam et al., 2025).

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در حوزه زیست‌فناوری محیط‌زیستی و افزایش تعداد مطالعات مرتبط با زیست‌پالایی و معدن‌کاری، همچنان شکاف دانشی مهمی در زمینه ارزیابی جامع نقش موجودات تراریخته در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی معدن‌کاری، به‌ویژه در ارتباط با اکوسیستم‌های جانوری، وجود دارد. بخش عمده پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر کارایی فنی حذف آلاینده‌ها و بازیابی فلزات متمرکز بوده‌اند، در حالی که ابعاد اکولوژیک، پیامدهای احتمالی برای تنوع زیستی، ملاحظات ایمنی زیستی و پایداری بلندمدت کاربرد موجودات تراریخته در محیط‌های معدنی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، با توجه به اهمیت حفاظت از تنوع زیستی و تداوم خدمات اکوسیستم‌ها، نوآوری اصلی مقاله حاضر در ارائه یک چارچوب تحلیلی و یکپارچه است که ارتباط میان زیست‌معدن‌کاری، زیست‌پالایی مبتنی بر موجودات تراریخته، ایمنی زیستی و حفاظت از اکوسیستم‌های جانوری را به‌صورت همزمان مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین، این مطالعه فراتر از ارزیابی صرف کارایی فناوری‌های زیستی، پیامدهای اکولوژیک و حفاظتی این فناوری‌ها را در بستر مدیریت پایدار مناطق معدنی تحلیل می‌کند. در واقع، ارزش افزوده این مقاله در تلفیق رویکردهای نوین زیست‌فناوری با ملاحظات اکولوژیک، اصول ایمنی زیستی و اهداف حفاظت از تنوع زیستی است؛ رویکردی که می‌تواند به عنوان

"نادیا بابایی، نقش زیست‌فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر ..."

جانوری در معرض فلزات سنگین می‌تواند منجر به اختلالات متابولیکی، آسیب‌های عصبی، کاهش موفقیت تولیدمثلی و افزایش نرخ مرگ‌ومیر شود. (Zhou *et al.*, 2023; Islam *et al.*, 2024).

علاوه بر آلودگی فلزی، زهاب اسیدی معادن (Acid Mine Drainage) یکی از جدی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های معدنی محسوب می‌شود. اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی در حضور آب و اکسیژن موجب کاهش شدید pH و افزایش حلالیت فلزات سنگین می‌شود، که این شرایط زیستی نامناسب به‌ویژه برای اکوسیستم‌های آبی بسیار مخرب است. (Lottermoser, 2023; Hussain *et al.*, 2024). کاهش pH و افزایش غلظت فلزات محلول می‌تواند به نابودی آبزیان حساس، کاهش تنوع زیستی و در موارد شدید، فروپاشی کامل جوامع زیستی منجر شود (Xu *et al.*, 2024).

در مجموع، پیامدهای زیست‌محیطی معدن‌کاری نه تنها موجب تخریب مستقیم زیستگاه‌ها می‌شود، بلکه از طریق اثرات تجمعی و بلندمدت بر زنجیره‌های غذایی و فرآیندهای اکولوژیک، تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم‌ها و بقای حیات جانوری به شمار می‌رود. این واقعیت، ضرورت توسعه و به‌کارگیری راهکارهای پایدار و نوین برای کاهش اثرات معدن‌کاری و حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌دیده را بیش از پیش برجسته می‌سازد.

شکل ۱، تصویری واضح از اثرات تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی فلزات سنگین در زنجیره غذایی و تاثیر آن بر گونه‌های جانوری را نمایش می‌دهد.

مبنایی برای توسعه راهبردهای پایدار و مبتنی بر شواهد در کاهش اثرات معدن‌کاری بر اکوسیستم‌ها و حیات جانوری مورد استفاده قرار گیرد.

پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر اکوسیستم‌ها و حیات جانوری

فعالیت‌های معدنی از طریق مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و هیدرولوژیک می‌توانند ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های طبیعی را به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهند. تخریب فیزیکی زیستگاه‌ها، حذف پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی و برهم‌خوردن رژیم طبیعی آب‌های سطحی و زیرزمینی از جمله پیامدهای مستقیم معدن‌کاری هستند که منجر به کاهش زیستگاه‌های قابل استفاده برای گونه‌های جانوری و افزایش فشارهای اکولوژیک می‌شوند (Lottermoser, 2023; Li *et al.*, 2024). این تغییرات می‌توانند الگوهای پراکنش گونه‌ها، تعاملات زیستی و پایداری جمعیت‌های جانوری را مختل کنند.

یکی از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی معدن‌کاری، آلودگی گسترده خاک و منابع آبی به فلزات سنگین است. عناصر سمی مانند کادمیوم، سرب، جیوه و آرسنیک در اثر استخراج، فرآوری و انباشت باطله‌های معدنی وارد محیط شده و به دلیل پایداری بالا، در خاک و آب تجمع می‌یابند (Islam *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024). این فلزات از طریق فرایندهای تجمع زیستی و تکثیر زیستی (Biomagnification) وارد زنجیره‌های غذایی شده و در سطوح بالاتر تروفیکی، به‌ویژه در گونه‌های جانوری، غلظت‌های خطرناکی ایجاد می‌کنند (Ali *et al.*, 2023). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که قرارگیری طولانی‌مدت گونه‌های



شکل ۱. انتقال، تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی فلزات سنگین در زنجیره غذایی و اثرات سمی آن بر گونه‌های جانوری در سطوح مختلف تروفیکی (Ali et al., 2023)

زیست‌فناوری و موجودات تراریخته: چارچوب نظری

زیست‌فناوری محیط‌زیستی به مجموعه‌ای از رویکردها اطلاق می‌شود که با بهره‌گیری از توانمندی‌های زیستی موجودات زنده، به کاهش آلاینده‌ها، بازسازی اکوسیستم‌های تخریب‌شده و ارتقای پایداری محیط‌زیست می‌پردازد. در دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجه در مهندسی ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی، امکان اصلاح هدفمند ژنوم موجودات زنده و تولید موجودات تراریخته با کارکردهای زیست‌محیطی ویژه را فراهم کرده است (Ali et al., 2023; Chen et al., 2023).

میکروارگانیسم‌های تراریخته می‌توانند مسیرهای متابولیکی اختصاصی برای افزایش تحمل به فلزات سنگین، تسریع واکنش‌های اکسایش-کاهش و تبدیل ترکیبات سمی به اشکال کم‌خطرتر توسعه دهند. مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح ژنتیکی ژن‌های موثر در انتقال فلزات، بیوسوربسیون و بیوترانسفورماسیون می‌تواند کارایی حذف آلاینده‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد

فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های معدنی، پس از ورود به خاک و منابع آبی، از طریق فرآیند تجمع زیستی وارد زنجیره‌های غذایی می‌شوند. این آلاینده‌ها ابتدا در گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و آبزیان تجمع یافته و سپس از طریق تکثیر زیستی به سطوح بالاتر تروفیکی منتقل می‌شوند. فلزات سنگینی نظیر کادمیوم، سرب، جیوه و آرسنیک با اتصال به پروتئین‌ها و آنزیم‌های سلولی، موجب اختلال در مسیرهای متابولیکی، افزایش تنش اکسیداتیو و آسیب به بافت‌های حیاتی در گونه‌های جانوری می‌شوند. افزایش غلظت این عناصر در بدن جانوران می‌تواند منجر به اختلالات فیزیولوژیک و عصبی، کاهش موفقیت تولیدمثلی، تضعیف سیستم ایمنی و افزایش مرگ و میر گردد. گونه‌های شکارچی در رأس هرم غذایی، به دلیل دریافت تجمعی آلاینده‌ها، بیشترین آسیب را متحمل می‌شوند. تداوم این فرآیند در نهایت موجب کاهش تنوع زیستی، اختلال در پایداری اکوسیستم‌ها و تضعیف عملکردهای اکولوژیک خواهد شد (Emon et al., 2023; Nnaji et al., 2023).

"نادیا بابایی، نقش زیست فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست محیطی فعالیت های معدنی بر ..."

Brassica juncea و *thaliana* با بیان ژن های انتقال دهنده فلزات، ظرفیت بیشتری برای جذب و انباشت فلزات سنگین از خاک های آلوده نشان داده اند (Li et al., 2024). این مطالعات نشان می دهد که مهندسی ژنتیک می تواند کارایی زیست فناوری محیط زیستی را در مدیریت آلودگی های ناشی از معدن کاری به طور چشمگیری افزایش دهد.

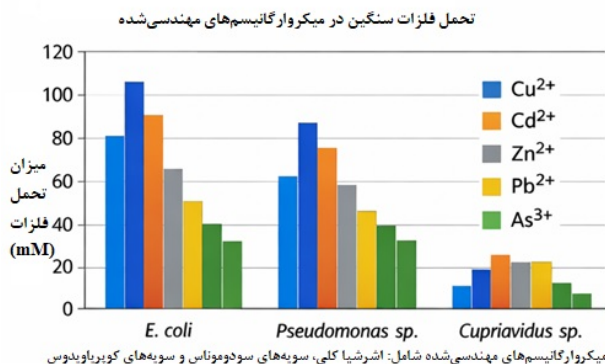
در کنار میکروارگانیسم ها، گیاهان تراریخته با ظرفیت بالاتر برای جذب، انباشت و تثبیت فلزات سنگین، نقش مهمی در پالایش زیستی خاک ها و منابع آبی آلوده ایفا می کنند. اصلاح ژنتیکی مسیرهای جذب و انتقال فلزات در گیاهان موجب افزایش کارایی پالایش زیستی و تسریع بازسازی زیستگاه های تخریب شده می شود (Li et al., 2025; Eltarahony et al., 2024). این توانمندی ها، زیست فناوری را به یکی از ابزارهای کلیدی برای مدیریت پایدار مناطق معدنی تبدیل کرده است. شکل ۲ نشان می دهد میکروارگانیسم های تراریخته نسبت به گونه های طبیعی تحمل بیشتری نسبت به فلزات سنگین دارند و بنابراین کارایی بالاتری در پالایش زیستی دارند.

(Abashina and Vainshtein, 2023; Aslam et al., 2025).

نمونه هایی از میکروارگانیسم های مهندسی شده در پالایش زیستی آلاینده های معدنی

در سال های اخیر، استفاده از میکروارگانیسم های مهندسی شده ژنتیکی برای حذف یا تثبیت فلزات سنگین مورد توجه گسترده قرار گرفته است. برای مثال، سویه های مهندسی شده *Pseudomonas putida* با بیان ژن های مرتبط با بیوسوربسیون فلزات، توانسته اند ظرفیت جذب کادمیوم و سرب را به طور قابل توجهی افزایش دهند (Zhou et al., 2023). همچنین، گونه های مهندسی شده *Escherichia coli* دارای ژن های متالوتیونین (Metallothionein) در حذف یون های جیوه و آرسنیک از محیط های آبی آلوده عملکرد موفق نشان داده اند (Chen et al., 2023).

علاوه بر این، برخی سویه های مهندسی شده *Acidithiobacillus ferrooxidans* با بهینه سازی مسیرهای اکسیداسیون آهن و گوگرد، توانسته اند راندمان بیوماینینگ را افزایش داده و همزمان تولید زهاب اسیدی را کاهش دهند (Abashina and Vainshtein, 2023). در حوزه گیاهان تراریخته نیز، گیاهان اصلاح شده *Arabidopsis*



شکل ۲. مقایسه میزان تحمل فلزات سنگین در میکروارگانیسم های مهندسی شده از طریق مکانیسم هایی نظیر بیوسوربسیون، بیواکومولاسیون و بیان پروتئین های متصل شونده به فلزات (Abashina and Vainshtein, 2023)

انواع موجودات تراریخته مورد استفاده در

پالایش زیستی

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های کاربرد زیست‌فناوری در کاهش آلودگی‌های معدنی، استفاده از انواع مختلف موجودات تراریخته با قابلیت‌های عملکردی متفاوت است. این موجودات شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، گیاهان و جلبک‌های مهندسی‌شده ژنتیکی هستند که هر یک نقش ویژه‌ای در حذف، تثبیت یا تبدیل آلاینده‌های معدنی ایفا می‌کنند.

باکتری‌های تراریخته، به‌ویژه گونه‌هایی مانند *Acidithiobacillus ferrooxidans* و *Pseudomonas putida* از مهم‌ترین ابزارهای زیستی در بیوماینینگ و پالایش زیستی محسوب می‌شوند. اصلاح ژنتیکی این میکروارگانیسم‌ها می‌تواند تحمل آن‌ها را نسبت به فلزات سنگین افزایش داده و مسیرهای متابولیکی موثر در اکسیداسیون سولفیدها یا جذب فلزات را تقویت کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سویه‌های مهندسی‌شده قادرند راندمان حذف فلزات سنگین را نسبت به گونه‌های طبیعی، به‌طور قابل توجهی افزایش دهند (Chen et al., 2022; Jung et al., 2023).

در کنار باکتری‌ها، قارچ‌های تراریخته نیز به دلیل سطح بالای بیوسوربسیون و تولید متابولیت‌های فعال، در تثبیت فلزات سنگین و کاهش سمیت محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخی گونه‌های قارچی مهندسی‌شده توانایی بالایی در جذب سرب، کادمیوم و آرسنیک از محیط‌های آلوده دارند (Micheal et al., 2024; Sen and Shweta, 2024).

گیاهان تراریخته نیز یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های پالایش زیستی محسوب می‌شوند.

گونه‌هایی مانند *Arabidopsis juncea Brassica* و *thaliana* که از طریق مهندسی ژنتیک برای افزایش جذب فلزات اصلاح شده‌اند، توانسته‌اند ظرفیت تجمع فلزات سنگین را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. این گیاهان علاوه بر کاهش آلودگی خاک، در بازسازی زیستگاه‌های تخریب‌شده و تثبیت خاک نیز نقش مهمی دارند (Li et al., 2024).

جلبک‌های تراریخته نیز به‌عنوان گزینه‌ای نوین برای تصفیه پساب‌های معدنی شناخته می‌شوند. این جلبک‌ها می‌توانند فلزات سنگین را از محیط‌های آبی جذب کرده و موجب کاهش سمیت اکوسیستم‌های آبی (Kumar et al., 2023).

بیوماینینگ و نقش آن در کاهش آلودگی‌های معدنی

بیوماینینگ به استفاده هدفمند از میکروارگانیسم‌ها برای استخراج فلزات از سنگ‌های معدنی، باطله‌ها و پسماندهای معدنی اطلاق می‌شود و به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه‌تر و کم‌آسیب‌تر نسبت به روش‌های شیمیایی و فیزیکی سنتی شناخته می‌شود (Hussain et al., 2024). در این فرآیند، باکتری‌های اکسیدکننده آهن و گوگرد، نظیر *Acidithiobacillus* spp. از طریق تسریع واکنش‌های اکسایش کانی‌ها، موجب آزادسازی فلزات می‌شوند.

پیشرفت‌های اخیر در مهندسی ژنتیک امکان توسعه سویه‌های میکروبی مهندسی‌شده با کارایی بالاتر، تحمل بیشتر به شرایط اسیدی و کنترل بهتر واکنش‌های زیستی را فراهم کرده است (Chen et al., 2023). این سویه‌ها می‌توانند ضمن افزایش راندمان استخراج فلزات، میزان تولید زه‌آب اسیدی را کاهش دهند و در نتیجه فشارهای

"نادیا بابایی، نقش زیست‌فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر ..."

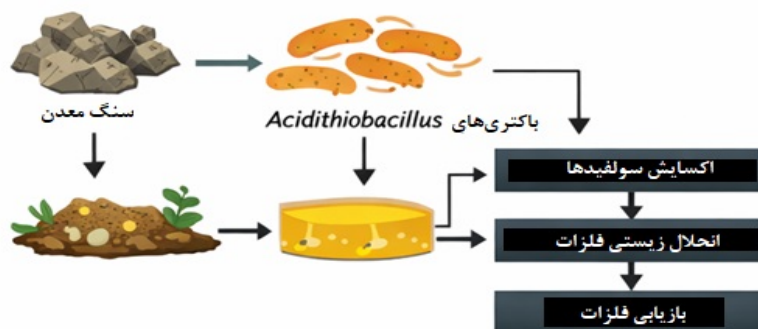
در برخی پروژه‌های آزمایشی، استفاده از *Pseudomonas putida* مهندسی شده برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های معدنی نتایج موفقیت‌آمیزی در کاهش غلظت سرب و کادمیوم نشان داده است. این مطالعات نشان می‌دهند که کاربرد زیست‌فناوری می‌تواند به‌عنوان رویکردی عملی و قابل توسعه در مدیریت زیست‌محیطی معادن مورد استفاده قرار گیرد (Nikel and de Lorenzo, 2023).

کاهش تولید آلاینده‌ها در مرحله استخراج، نه تنها پیامدهای منفی معدن‌کاری را در مبدأ کاهش می‌دهد، بلکه به حفظ کیفیت زیستگاه‌ها و کاهش تهدیدات زیستی برای گونه‌های جانوری کمک می‌کند (Hussain et al., 2024). شکل ۳، روند بیوماینینگ و نحوه عملکرد میکروارگانیسم‌ها را در استخراج فلزات و کاهش تولید زهاب اسیدی، نشان می‌دهد.

زیست‌محیطی بر اکوسیستم‌های اطراف معدن را محدود کنند.

مطالعات موردی در بیوماینینگ

مطالعات موردی متعددی در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از میکروارگانیسم‌ها در فرایند بیوماینینگ می‌تواند ضمن افزایش بازیابی فلزات، فشارهای زیست‌محیطی معدنکاری را نیز کاهش دهد. برای مثال، استفاده از *Acidithiobacillus ferrooxidans* در استخراج زیستی مس و طلا از باطله‌های معدنی، موجب کاهش مصرف مواد شیمیایی و کاهش تولید زهاب اسیدی شده است. همچنین برخی سویه‌های مهندسی شده این باکتری توانسته‌اند در محیط‌های با pH بسیار پایین نیز فعالیت پایداری داشته باشند (Jung et al., 2023; Mahadevan et al., 2023).



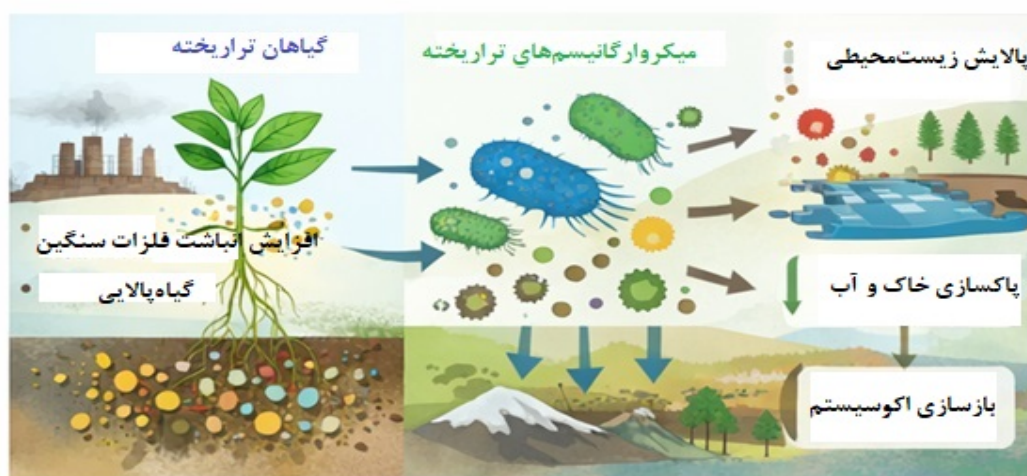
شکل ۳. فرآیند بیوماینینگ توسط باکتری‌های *Acidithiobacillus* و نقش آن‌ها در اکسایش کانی‌های سولفیدی، انحلال فلزات و بازیابی زیستی فلزات (Hussain et al., 2024)

می‌کند. استفاده از موجودات تراریخته در این فرآیند، امکان افزایش سرعت، کارایی و دامنه عملکرد پالایش زیستی را فراهم ساخته است (Eltarahony et al., 2025).

پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته
پالایش زیستی یکی از مهم‌ترین کاربردهای زیست‌فناوری در کاهش آلودگی‌های ناشی از معدن‌کاری است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان، آلاینده‌ها را جذب، تثبیت یا تجزیه

در مجموع، پالایش زیستی مبتنی بر زیست فناوری نه تنها روشی کارآمد برای پاکسازی محیط‌های آلوده است، بلکه به عنوان راهکاری پایدار برای حفاظت از تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌ها نیز مطرح می‌شود. در شکل ۴ نشان داده شده که چگونه میکروارگانیسم‌ها و گیاهان تراریخته می‌توانند ضمن جذب و تثبیت فلزات سنگین، اکوسیستم را بازسازی کنند.

میکروارگانیسم‌های تراریخته قادرند از طریق سازوکارهایی نظیر بیوسوربسیون، بیواکومولاسیون و بیوترانسفورماسیون، فلزات سنگین را به اشکال کم‌خطر تبدیل کنند. این فرآیندها موجب کاهش دسترسی زیستی فلزات و کاهش احتمال انتقال آن‌ها به زنجیره‌های غذایی می‌شود (Ali *et al.*, 2023; Aslam *et al.*, 2025).



شکل ۴. نقش گیاهان و میکروارگانیسم‌های تراریخته در پالایش زیستی، کاهش آلودگی‌های معدنی و بازسازی اکوسیستم‌های آسیب دیده (Chen *et al.*, 2023)

سرعت پایین برخی فرایندهای زیستی، حساسیت میکروارگانیسم‌ها به شرایط محیطی و دشواری کنترل کامل موجودات تراریخته در محیط طبیعی از جمله محدودیت‌های مهم آن محسوب می‌شوند. علاوه بر این، کارایی فرآیندهای زیستی در مقیاس آزمایشگاهی معمولاً بیشتر از شرایط واقعی محیط است و انتقال این فناوری‌ها به مقیاس صنعتی نیازمند مطالعات گسترده‌تر و ارزیابی‌های بلندمدت زیست محیطی است.

تحلیل انتقادی مزایا و محدودیت‌های پالایش زیستی

اگرچه پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته به عنوان یکی از روش‌های پایدار و کم‌هزینه برای کاهش آلودگی‌های معدنی شناخته می‌شود، اما این فناوری همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به کاهش مصرف مواد شیمیایی، هزینه کمتر نسبت به روش‌های فیزیکی و شیمیایی و سازگاری بیشتر با محیط زیست اشاره کرد. با این حال،

"نادیا بابایی، نقش زیست فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست محیطی فعالیت های معدنی بر ..."

نقش زیست فناوری و موجودات تراریخته در حفاظت از اکوسیستم های جانوری

اکوسیستم های جانوری به طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تاثیر آلودگی های ناشی از فعالیت های معدنی قرار می گیرند. تجمع زیستی و بزرگ نمایی زیستی فلزات سنگین در زنجیره های غذایی می تواند منجر به بروز اثرات سمی مزمن، اختلالات رفتاری و کاهش موفقیت تولیدمثلی، به ویژه در شکارچیان راس هرم غذایی شود (Ali *et al.*, 2023; Islam *et al.*, 2024).

در این زمینه، زیست فناوری محیط زیستی با کاهش بار آلاینده ها در خاک و آب، نقش غیرمستقیم اما موثری در کاهش تهدیدات زیستی ایفا می کند. میکروارگانیسم ها و گیاهان تراریخته با کاهش دسترسی زیستی فلزات، از انتقال آن ها به گونه های جانوری جلوگیری کرده و شرایط زیستی زیستگاه ها را بهبود می بخشد (Abashina and Vainshtein, 2023; Eltarahony *et al.*, 2025).

در اکوسیستم های آبی، کنترل زه آب اسیدی معادن از طریق فرآیندهای زیستی می تواند به تثبیت فلزات محلول، افزایش pH و بازگشت تدریجی جوامع آبی منجر شود (Hussain *et al.*, 2024). از این منظر، زیست فناوری نه تنها یک ابزار فناورانه، بلکه رویکردی حفاظتی در راستای صیانت از تنوع زیستی جانوری محسوب می شود.

چالش ها و ملاحظات ایمنی زیستی

علی رغم ظرفیت های بالای زیست فناوری و موجودات تراریخته، کاربرد این فناوری ها با چالش های ایمنی زیستی و نگرانی های اکولوژیک همراه است. مهم ترین چالش، احتمال انتشار کنترل نشده موجودات تراریخته در محیط های طبیعی و انتقال ژن های مهندسی شده به جمعیت های بومی است که می تواند پیامدهای

پیش بینی نشده ای برای اکوسیستم ها داشته باشد (Chen *et al.*, 2023).

همچنین، کارایی فرآیندهای زیستی به شدت تحت تاثیر شرایط محیطی مانند pH، دما و ترکیب شیمیایی محیط قرار دارد، که این موضوع می تواند کاربرد عملی آن ها را در برخی مناطق معدنی محدود کند (Lottermoser, 2023). نبود چارچوب های قانونی و نظارتی شفاف در بسیاری از کشورها نیز مانع مهمی برای استفاده گسترده از این فناوری ها محسوب می شود (Eltarahony *et al.*, 2025).

پیشرفت ابزارهای ویرایش ژن، به ویژه فناوری CRISPR/Cas تحول چشمگیری در توسعه موجودات تراریخته ایجاد کرده است. این فناوری امکان اصلاح دقیق ژن های مرتبط با تحمل فلزات سنگین، بیوسوربسیون و متابولیسم آلاینده ها را فراهم می کند. در مقایسه با روش های سنتی مهندسی ژنتیک، سامانه CRISPR از دقت بالاتر، هزینه کمتر و قابلیت هدفگیری ژنی موثرتری برخوردار است و می تواند نسل جدیدی از میکروارگانیسم ها و گیاهان تراریخته را برای کاربردهای زیست محیطی ایجاد کند (Mahadevan *et al.*, 2023).

چشم انداز آینده پژوهش

پیشرفت های اخیر در زیست فناوری، به ویژه در حوزه زیست شناسی مصنوعی و ابزارهای ویرایش ژن مانند CRISPR/Cas، افق های جدیدی را برای طراحی موجودات تراریخته با کارایی بالاتر و ریسک کمتر فراهم کرده است (Chen *et al.*, 2023). انتظار می رود در آینده، سویه های میکروبی با قابلیت های هدفمندتر برای تثبیت یا حذف آلاینده های خاص توسعه یابند.

همچنین چنین رویکردهای بین رشته ای می توانند نقش مهمی در توسعه راهکارهای پایدار برای

مجموع، زیست فناوری می تواند نقش کلیدی در مدیریت پایدار فعالیت های معدنی و حفاظت از اکوسیستم های جانوری ایفا کند، مشروط بر آنکه با رویکردی علمی، محتاطانه و مبتنی بر شواهد به کار گرفته شود.

نتایج این مطالعه مروری نشان می دهد که زیست فناوری محیط زیستی و موجودات تراریخته ظرفیت بالایی برای کاهش پیامدهای زیست محیطی معدنکاری و حفاظت از اکوسیستم های آسیب دیده دارند. فناوری هایی نظیر بیوماینینگ، پالایش زیستی و استفاده از میکروارگانیسم ها و گیاهان مهندسی شده، می توانند در کاهش غلظت فلزات سنگین، کنترل زهاب اسیدی و بازسازی زیستگاه های تخریب شده نقش موثری ایفا کنند. با این حال، استفاده گسترده از این فناوری ها، مستلزم ارزیابی دقیق ریسک های اکولوژیک، توسعه چارچوب های قانونی مناسب و انجام مطالعات بلندمدت در شرایط واقعی محیط است. همچنین، تلفیق زیست فناوری با فناوری های نوینی مانند زیست شناسی مصنوعی، مدل سازی اکولوژیک و هوش مصنوعی می تواند افق های جدیدی برای مدیریت پایدار مناطق معدنی فراهم سازد.

در مجموع، به کارگیری مسئولانه و علمی موجودات تراریخته می تواند به عنوان بخشی از راهبردهای توسعه پایدار، نقش مهمی در کاهش آلودگی های معدنی، حفاظت از تنوع زیستی و ارتقای سلامت اکوسیستم ها ایفا کند.

حفاظت از اکوسیستم ها و حیات جانوری در برابر پیامدهای معدن کاری ایفا نمایند. پیشرفت های زیست شناسی مصنوعی و ابزارهای ویرایش ژن مانند CRISPR، امکان طراحی موجودات تراریخته با کارایی بالاتر و ریسک کمتر را فراهم کرده است (Chen *et al.*, 2023). ادغام زیست فناوری با هوش مصنوعی و مدل سازی اکولوژیک می تواند به بهینه سازی کاربرد آن ها در مناطق معدنی و حفاظت از اکوسیستم ها کمک کند (Hussain *et al.*, 2024).

نتیجه گیری

بر اساس شواهد علمی مرور شده، فعالیت های معدنی یکی از مهم ترین تهدیدات برای اکوسیستم ها و حیات جانوری به شمار می روند. آلودگی فلزی، زه آب اسیدی و تخریب زیستگاه ها اثرات مخربی در سطوح مختلف زیستی ایجاد می کنند. در این میان، زیست فناوری و موجودات تراریخته به عنوان راهکارهایی نوین و پایدار، ظرفیت بالایی برای کاهش این پیامدها و بازسازی اکوسیستم های آسیب دیده دارند.

بیوماینینگ و پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته می توانند ضمن کاهش آلودگی های زیست محیطی، به حفاظت از تنوع زیستی جانوری کمک کنند. با این حال، بهره گیری مؤثر از این فناوری ها مستلزم توجه جدی به ایمنی زیستی، ارزیابی ریسک و سیاست گذاری علمی است. در

منابع

- Abashina T, Vainshtein M. (2023) Current trends in metal biomining with a focus on genomics aspects and attention to arsenopyrite leaching: A review. *Microorganisms*. 11(1): 186. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010186>.
- Ali H, Khan E, Ilahi I. (2023) Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 11(2): 109556. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- Aslam A, Kanwal F, Javied S, Nisar N, Torriero AAJ. (2025) Microbial biosorption: A sustainable approach for metal removal and environmental remediation. *International Journal of Environmental*

"نادیا بابایی، نقش زیست فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست محیطی فعالیت های معدنی بر ..."

Science and Technology. 22: 13245–13276. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06611-1>.

Chen J, Liu Y, Diep P, Mahadevan R. (2022) Genetic engineering of extremely acidophilic *Acidithiobacillus* species for biomining: Progress and perspectives. *Journal of Hazardous Materials*. 438: 129456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129456>.

Chen J, Liu Y, Diep P, Mahadevan R. (2023) Harnessing synthetic biology for sustainable biomining with iron- and sulfur-oxidizing microbes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 11: 1189203. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.920639>.

Eltarahony M, Jestrzanski D, Hassan MA. (2025) A comprehensive review of recent advancements in microbial-induced mineralization: Biosynthesis and mechanisms with environmental applications. *Science of the Total Environment*. 978: 179426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179426>.

Emon FJ, Rohani MF, Sumaiya N, Jannat MFT, Akter Y, Shahjahan M, Kari ZA, Tahiluddin AB, Goh KW. (2023) Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes—A review. *Toxics*. 11(6): 510. <https://doi.org/10.3390/toxics11060510>.

Hussain A, Bibi T, Alvi W, Ali SA. (2024) Harnessing microorganisms for biomining: Unveiling the power of microbial mining. *Environmental Technology & Innovation*. 33: 103621. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103621>.

Islam MM, Saxena N, Sharma D. (2024) Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: A review. *RSC Sustainability*. 2: 1269–1288. <https://doi.org/10.1039/D3SU00440F>.

Jung H, Inaba Y, West AC, Banta S. (2023) Overexpression of quorum sensing genes in *Acidithiobacillus ferrooxidans* enhances cell attachment and covellite bioleaching. *Biotechnology Reports*. 38: e00789. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00789>.

Kumar V, Pandey A, Singh J. (2023) Microalgae-mediated remediation of heavy metals from wastewater: Recent advances and future perspectives. *Bioresource Technology*. 369: 128353.

Li H, Wang T, Du H, Guo P, Wang S, Ma M. (2024) Research progress in the joint remediation of plants–microbes–soil for heavy metal-contaminated soil in mining areas: A review. *Sustainability*. 16(19): 8464. <https://doi.org/10.3390/su16198464>.

Lottermoser BG. (2023) Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. Springer, Switzerland.

Mahadevan R, Liu Y, Chen J. (2023) Genetic engineering of *Acidithiobacillus ferridurans* using CRISPR systems to mitigate toxic release in biomining. *Environmental Science & Technology*. 57(33): 12315–12324. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02492>.

Micheal HSR, Thyagarajan D, Govindaraj M, Saravanakumar VK, Mohammed NB, Maheswari, KM. (2024). Biosorption of halophilic fungal melanized membrane–PUR/melanin polymer for heavy metal detoxification with electrospinning technology. *Environmental Technology*. 45(27): 5865–5877. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2310034>.

Nikel PI, de Lorenzo V. (2023) *Pseudomonas putida* as a functional chassis for environmental biotechnology. *Metabolic Engineering*. 21: 679–696. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.05.005>.

Nnaji ND, Onyeaka H, Miri T, Ugwa C. (2023) Bioaccumulation for heavy metal removal: A review. *Discover Applied Sciences*. 5: 125. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>.

Sen R, Shweta N. (2024) Fungal biosorption systems for heavy metal detoxification: A review of mechanistic and applied perspectives. *Journal of Computational Analysis and Applications*. 33(8): 6038–6051.

Xu L, Zhao F, Xing X, Peng J, Wang J, Ji M, Li BL. (2024) A review on remediation technology and the remediation evaluation of heavy metal-contaminated soils. *Toxics*. 12(12): 897. <https://doi.org/10.3390/toxics12120897>.

Zhakypbek Y, Kossalbayev BD, Belkozhasayev AM, Murat T, Tursbekov S, Abdalimov E, Pashkovskiy P, Kreslavski V, Kuznetsov V, Allakhverdiev SI. (2024) Reducing heavy metal

contamination in soil and water using phytoremediation. *Plants*. 13(11): 1534.
<https://doi.org/10.3390/plants13111534>.

Zhou B, Zhang T, Wang F. (2023) Microbial-based heavy metal bioremediation: Toxicity and eco-friendly approaches to heavy metal decontamination. *Applied Sciences* 13(14): 8439.
<https://doi.org/10.3390/app13148439>.

"نادیا بابایی، نقش زیست‌فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر ..."

Role of Modern Biotechnology in Mitigating the Environmental Impacts of Mining Activities on Ecosystems

Nadia Babaei

Secretariat of National Biosafety Council of Iran, Department of Environment, Tehran, Iran

nbabaei140404@gmail.com

Abstract

Mining activities play a crucial role in economic development; however, they are also recognized as one of the major sources of environmental degradation, particularly affecting ecosystems and wildlife habitats. Soil and water contamination by heavy metals, habitat destruction, and disruption of food chains are among the most significant environmental consequences of mining activities. In recent years, advances in biotechnology and genetic engineering, including the development of transgenic microorganisms and plants, have provided innovative and sustainable solutions to mitigate these adverse impacts. This comprehensive review examines recent progress in biotechnological applications such as biomining, bioremediation, and microbial-induced mineralization, with a particular focus on the use of transgenic organisms to reduce mining-related environmental pollution. The role of these approaches in decreasing heavy metal bioavailability, improving soil and water quality, and protecting wildlife ecosystems is critically discussed. Additionally, biosafety concerns, ecological risks, and regulatory challenges associated with the environmental release of transgenic organisms are addressed. Overall, biotechnology-based strategies offer promising tools for sustainable environmental management of mining-affected ecosystems. When combined with appropriate risk assessment and regulatory frameworks, these approaches can significantly contribute to biodiversity conservation and the protection of ecosystem health in mining regions.

Keywords: Wildlife ecosystems, Bioremediation, Biotechnology, Mining, Transgenic organisms