مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

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

نقش زیست‌فناوری مدرن در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر اکوسیستم‌ها

نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1

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 فعالیت‌های معدنی، علی‌رغم نقش مهم آن در توسعه اقتصادی، پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها، به‌ویژه زیستگاه‌های جانوری، بر جای می‌گذارد. آلودگی خاک و منابع آبی به فلزات سنگین، تخریب زیستگاه‌ها و اختلال در زنجیره‌های غذایی از جمله مهم‌ترین اثرات منفی معدن‌کاری به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، زیست‌فناوری و مهندسی ژنتیک، از طریق توسعه میکروارگانیسم‌ها و گیاهان تراریخته، به‌عنوان رویکردهایی نوین و پایدار برای کاهش این پیامدها مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاله مروری با هدف تبیین نقش زیست‌فناوری در کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی، به بررسی پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌هایی نظیر بیوماینینگ، پالایش زیستی و تثبیت آلاینده‌ها با استفاده از موجودات تراریخته می‌پردازد. همچنین، کارکرد این رویکردها در حفاظت از اکوسیستم‌ها و حیات جانوری، در کنار چالش‌ها، ملاحظات ایمنی‌زیستی و چشم‌اندازهای آینده کاربرد زیست‌فناوری در مدیریت پایدار مناطق معدنی، مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم‌های جانوری، زیست‌پالایی، زیست‌فناوری، معدن‌کاری، موجودات تراریخته

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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, 2010). معدن‌کاری معمولا با آزادسازی مقادیر قابل‌توجهی 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 آبزی 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 زیست‌فرآیندهای 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 قابل‌اتکا 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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 قابل‌توجهی 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 قابل‌استفاده برای گونه‌های جانوری و افزایش فشارهای اکولوژیک می‌شوند (Lottermoser, 2010; 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 تکثر زیستی (Biomagnification) وارد زنجیره‌های غذایی شده و در سطوح بالاتر تروفیکی، به‌ویژه در گونه‌های جانوری، غلظت‌های خطرناکی ایجاد می‌کنند (Ali *et al*., 2019). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که قرارگیری طولانی‌مدت گونه‌های 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).

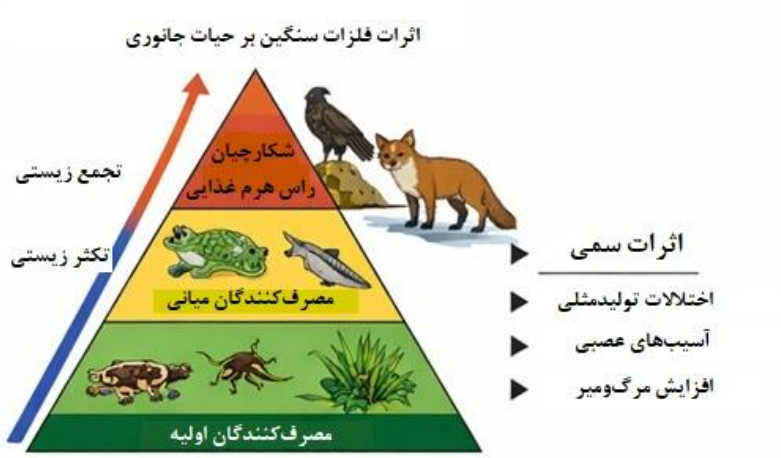
علاوه بر آلودگی فلزی، زهاب اسیدی معادن (Acid Mine Drainage) یکی از جدی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های معدنی محسوب می‌شود. اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی در حضور آب و اکسیژن موجب کاهش شدید pH و افزایش حلالیت فلزات سنگین می‌شود، که این شرایط زیستی نامناسب به‌ویژه برای اکوسیستم‌های آبی بسیار مخرب است (Lottermoser, 2010; 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 نه‌تنها 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]



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*., 2019)

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 تکثر 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 مرگ‌ومیر 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).

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 قابل‌توجه 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*., 2019; 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

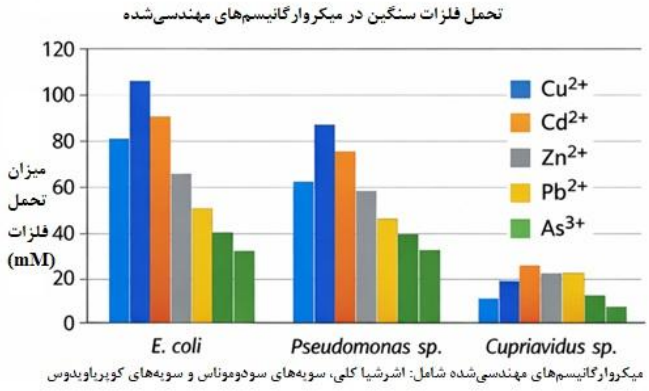
Abashina and Vainshtein, 2023; Aslam *et al.*, 2025).

نمونه‌هایی از میکروارگانیسم‌های مهندسی‌شده در پالایش زیستی آلاینده‌های معدنی

در سال‌های اخیر، استفاده از میکروارگانیسم‌های مهندسی‌شده ژنتیکی برای حذف یا تثبیت فلزات سنگین مورد توجه گسترده قرار گرفته است. برای مثال، سویه‌های مهندسی‌شده *Pseudomonas putida* با بیان ژن‌های مرتبط با بیوسوربسیون فلزات، توانسته‌اند ظرفیت جذب کادمیوم و سرب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (Zhou *et al.*, 2023). همچنین، گونه‌های مهندسی شده *Escherichia coli* دارای ژن‌های متالوتیونین (Metallothionein) در حذف یون‌های جیوه و آرسنیک از محیط‌های آبی آلوده عملکرد موفقی نشان داده‌اند (Chen *et al.*, 2023).

علاوه بر این، برخی سویه‌های مهندسی‌شده *Acidithiobacillus ferrooxidans* با بهینه‌سازی مسیرهای اکسیداسیون آهن و گوگرد، توانسته‌اند راندمان بیومایننگ را افزایش داده و همزمان تولید زهاب اسیدی را کاهش دهند (Abashina and Vainshtein, 2023). در حوزه گیاهان تراریخته نیز، گیاهان اصلاح‌شده *Arabidopsis thaliana* و *Brassica juncea* با بیان ژن‌های انتقال‌دهنده فلزات، ظرفیت بیشتری برای جذب و انباشت فلزات سنگین از خاک‌های آلوده نشان داده‌اند (Li *et al.*, 2024). این مطالعات نشان می‌دهد که مهندسی ژنتیک می‌تواند کارایی زیست‌فناوری محیط‌زیستی را در مدیریت آلودگی‌های ناشی از معدن‌کاری به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

در کنار میکروارگانیسم‌ها، گیاهان تراریخته با ظرفیت بالاتر برای جذب، انباشت و تثبیت فلزات سنگین، نقش مهمی در پالایش زیستی خاک‌ها و منابع آبی آلوده ایفا می‌کنند. اصلاح ژنتیکی مسیرهای جذب و انتقال فلزات در گیاهان موجب افزایش کارایی پالایش زیستی و تسریع بازسازی زیستگاه‌های تخریب‌شده می‌شود (Li *et al.*, 2024; Eltarahony *et al.*, 2025). این توانمندی‌ها، زیست‌فناوری را به یکی از ابزارهای کلیدی برای مدیریت پایدار مناطق معدنی تبدیل کرده است. شکل ۲ نشان می‌دهد میکروارگانیسم‌های تراریخته نسبت به گونه‌های طبیعی تحمل بیشتری نسبت به فلزات سنگین دارند و بنابراین کارایی بالاتری در پالایش زیستی دارند.



شکل ۲. مقایسه میزان تحمل فلزات سنگین در میکروارگانیسم‌های مهندسی‌شده از طریق مکانیسم‌هایی نظیر بیوسوربسیون، بیواکومولاسیون و بیان پروتئین‌های متصل‌شونده به فلزات (Abashina and Vainshtein, 2023)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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 بیومایننگ 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 سویه‌های‌مهندسی‌شده 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 *Brassica juncea* و *Arabidopsis 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).

بیومایننگ و نقش آن در کاهش آلودگی‌های معدنی

بیومایننگ 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

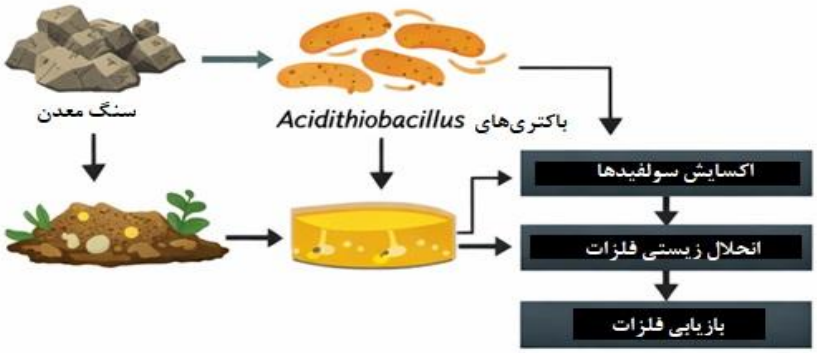
زیست‌محیطی بر اکوسیستم‌های اطراف معدن را محدود کنند.

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 مهندسی‌شده این باکتری توانسته‌اند در محیط‌های با pH بسیار پایین نیز فعالیت پایداری داشته باشند (Jung *et al.*, 2023; Mahadevan *et al.*, 2023).

در برخی پروژه‌هایآزمایشی، استفاده از *Pseudomonas putida* مهندسی‌شده 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, 2018).

کاهش تولید آلاینده‌ها در مرحله استخراج، نه‌تنها 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.



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

پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته

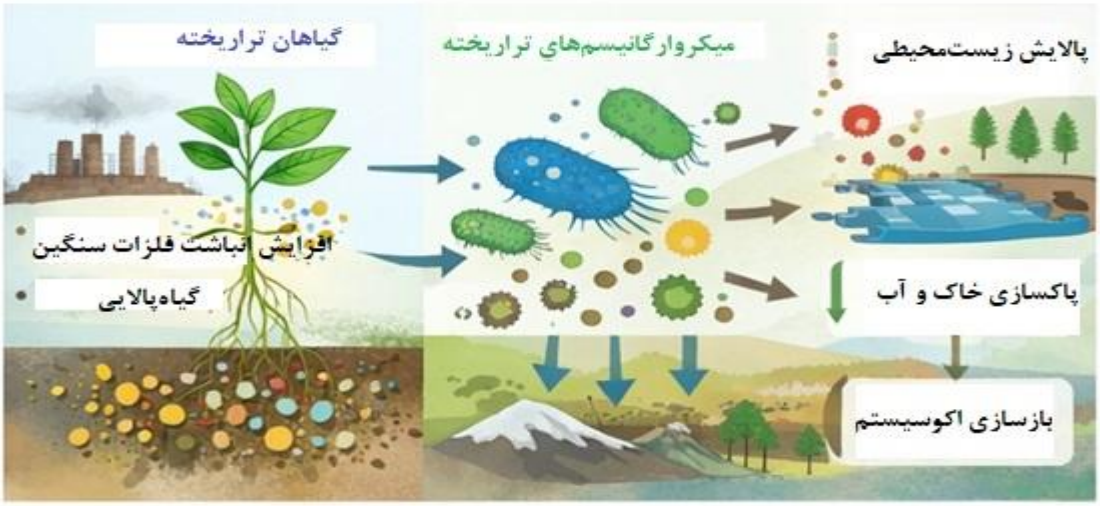
پالایش زیستی یکی از مهم‌ترین کاربردهای زیست‌فناوری در کاهش آلودگی‌های ناشی از معدن‌کاری است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان، آلاینده‌ها را جذب، تثبیت یا تجزیه می‌کند. استفاده از موجودات تراریخته در این فرآیند، امکان افزایش سرعت، کارایی و دامنه عملکرد پالایش زیستی را فراهم ساخته است (Eltarahony *et al.*, 2025).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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.*, 2019; Aslam *et al.*, 2025).

در مجموع، پالایش زیستی مبتنی بر زیست‌فناوری نه‌تنها روشی کارآمد برای پاکسازی محیط‌های آلوده است، بلکه به‌عنوان 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.



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

تحلیل انتقادی مزایا و محدودیت‌های پالایش زیستی

اگرچه پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته به‌عنوان 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 فیزیکوشیمیایی و سازگاری بیشتر با محیط زیست اشاره کرد. با این حال، 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 معمولا بیشتر از شرایط واقعی محیط است و انتقال این فناوری‌ها به مقیاس صنعتی نیازمند مطالعات گسترده‌تر و ارزیابی‌های بلندمدت زیست‌محیطی است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

نقش زیست‌فناوری و موجودات تراریخته در حفاظت از اکوسیستم‌های جانوری

اکوسیستم‌های جانوری به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تاثیر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی قرار می‌گیرند. تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی فلزات سنگین در زنجیره‌های غذایی می‌تواند منجر به بروز اثرات سمی مزمن، اختلالات رفتاری و کاهش موفقیت تولیدمثلی، به‌ویژه در شکارچیان راس هرم غذایی شود (Ali *et al*., 2019; Islam *et al*., 2024).

در این زمینه، زیست‌فناوری محیط‌زیستی با کاهش بار آلاینده‌ها در خاک و آب، نقش غیرمستقیم اما موثری در کاهش تهدیدات زیستی ایفا می‌کند. میکروارگانیسم‌ها و گیاهان تراریخته با کاهش دسترسی زیستی فلزات، از انتقال آن‌ها به گونه‌های جانوری جلوگیری کرده و شرایط زیستی زیستگاه‌ها را بهبود می‌بخشند (Abashina and Vainshtein, 2023; Eltarahony *et al*., 2025).

در اکوسیستم‌های آبی، کنترل زه‌آب اسیدی معادن از طریق فرآیندهای زیستی می‌تواند به تثبیت فلزات محلول، افزایش pH و بازگشت تدریجی جوامع آبزی منجر شود (Hussain *et al*., 2024). از این منظر، زیست‌فناوری نه‌تنها یک ابزار فناورانه، بلکه رویکردی حفاظتی در راستای صیانت از تنوع زیستی جانوری محسوب می‌شود.

چالش‌ها و ملاحظات ایمنی زیستی

علی‌رغم ظرفیت‌های بالای زیست‌فناوری و موجودات تراریخته، کاربرد این فناوری‌ها با چالش‌های ایمنی زیستی و نگرانی‌های اکولوژیک همراه است. مهم‌ترین چالش، احتمال انتشار کنترل‌نشده موجودات تراریخته در محیط‌های طبیعی و انتقال ژن‌های مهندسی‌شده به جمعیت‌های بومی است که می‌تواند پیامدهای پیش‌بینی‌نشده‌ای برای اکوسیستم‌ها داشته باشد (Chen *et al*., 2023).

همچنین، کارایی فرآیندهای زیستی به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی مانند pH، دما و ترکیب شیمیایی محیط قرار دارد، که این موضوع می‌تواند کاربرد عملی آن‌ها را در برخی مناطق معدنی محدود کند (Lottermoser, 2010). نبود چارچوب‌های قانونی و نظارتی شفاف در بسیاری از کشورها نیز مانع مهمی برای استفاده گسترده از این فناوری‌ها محسوب می‌شود (Eltarahony *et al*., 2025).

پیشرفت ابزارهای ویرایش ژن، به‌ویژه فناوری CRISPR/Cas تحول چشمگیری در توسعه موجودات تراریخته ایجاد کرده است. این فناوری امکان اصلاح دقیق ژن‌های مرتبط با تحمل فلزات سنگین، بیوسوربسیون و متابولیسم آلاینده‌ها را فراهم می‌کند. در مقایسه با روش‌های سنتی مهندسی ژنتیک، سامانه CRISPR از دقت بالاتر، هزینه کمتر و قابلیت هدفگیری ژنی موثرتری برخوردار است و می‌تواند نسل جدیدی از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان تراریخته را برای کاربردهای زیست‌محیطی ایجاد کند (Mahadevan *et al*., 2023).

چشم‌انداز آینده پژوهش

پیشرفت‌های اخیر در زیست‌فناوری، به‌ویژه در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی و ابزارهای ویرایش ژن مانند CRISPR/Cas، افق‌های جدیدی را برای طراحی موجودات تراریخته با کارایی بالاتر و ریسک کمتر فراهم کرده است (Chen *et al*., 2023). انتظار می‌رود در آینده، سویه‌های میکروبی با قابلیت‌های هدفمندتر برای تثبیت یا حذف آلاینده‌های خاص توسعه یابند.

همچنین چنین رویکردهای بین‌رشته‌ای می‌توانند نقش مهمی در توسعه راهکارهای پایدار برای

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

حفاظت از اکوسیستم‌ها و حیات جانوری در برابر پیامدهای معدن‌کاری ایفا نمایند. پیشرفت‌های زیست‌شناسی 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 زیست‌فناوری با هوش مصنوعی و مدل‌سازی اکولوژیک می‌تواند به بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها در مناطق معدنی و حفاظت از اکوسیستم‌ها کمک کند (Hussain *et al*., 2024).

نتیجه‌گیری

بر اساس شواهد علمی مرورشده، فعالیت‌های معدنی یکی از مهم‌ترین تهدیدات برای اکوسیستم‌ها و حیات جانوری به شمار می‌روند. آلودگی فلزی، زه‌آب اسیدی و تخریب زیستگاه‌ها اثرات مخربی در سطوح مختلف زیستی ایجاد می‌کنند. در این میان، زیست‌فناوری و موجودات تراریخته به‌عنوان راهکارهایی نوین و پایدار، ظرفیت بالایی برای کاهش این پیامدها و بازسازی اکوسیستم‌های آسیب‌دیده دارند.

بیوماینینگ و پالایش زیستی مبتنی بر موجودات تراریخته می‌توانند ضمن کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، به حفاظت از تنوع زیستی جانوری کمک کنند. با این حال، بهره‌گیری مؤثر از این فناوری‌ها مستلزم توجه جدی به ایمنی زیستی، ارزیابی ریسک و سیاست‌گذاری علمی است. در مجموع، زیست‌فناوری می‌تواند نقش کلیدی در مدیریت پایدار فعالیت‌های معدنی و حفاظت از اکوسیستم‌های جانوری ایفا کند، مشروط بر آنکه با رویکردی علمی، محتاطانه و مبتنی بر شواهد به‌کار گرفته شود.

نتایج این مطالعه مروری نشان می‌دهد که زیست‌فناوری محیط زیستی و موجودات تراریخته ظرفیت بالایی برای کاهش پیامدهای زیست محیطی معدنکاری و حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌دیده دارند. فناوری‌هایی نظیر بیوماینینگ، پالایش زیستی و استفاده از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان مهندسی‌شده، می‌توانند در کاهش غلظت فلزات سنگین، کنترل زهاب اسیدی و بازسازی زیستگاه‌های تخریب‌شده نقش موثری ایفا کنند. با این حال، استفاده گسترده از این فناوری‌ها، مستلزم ارزیابی دقیق ریسک‌های اکولوژیک، توسعه چارچوب‌های قانونی مناسب و انجام مطالعات بلندمدت در شرایط واقعی محیط است. همچنین، تلفیق زیست‌فناوری با فناوری‌های نوینی مانند زیست‌شناسی مصنوعی، مدلسازی اکولوژیک و هوش مصنوعی می‌تواند افق‌های جدیدی برای مدیریت پایدار مناطق معدنی فراهم سازد.

در مجموع، به‌کارگیری مسئولانه و علمی موجودات تراریخته می‌تواند به‌عنوان بخشی از راهبردهای توسعه پایدار، نقش مهمی در کاهش آلودگی‌های معدنی، حفاظت از تنوع زیستی و ارتقای سلامت اکوسیستم‌ها ایفا کند.

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. (2019) Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. ***Journal of Chemistry***. *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***

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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, Jestrzemski 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. (2010) 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. (2018) Pseudomonas putida as a functional chassis for environmental biotechnology. ***Metabolic Engineering***. *50*: 142-155. 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, Belkozhayev AM, Murat T, Tursbekov S, Abdalimov E, Pashkovskiy P, Kreslavski V, Kuznetsov V, Allakhverdiev SI. (2024) Reducing heavy metal

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]

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

Nadia Babaei

Secretariat of National Biosafety Council of Iran, Depatment 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1404.18.2.4.1]