

مروری بر گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در معادن (مقاله پژوهشی)

- ۱- خدیجه خرمن‌دار، دانشجوی دکتری گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- ۲- محسن حسینعلی‌زاده*، دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
alizadeh_m2001@yahoo.com
- ۳- علی مهدوی، استاد گروه علوم جنگل، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
- ۴- علی محمد بهیجانی، استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- ۵- حسن یگانه، دانشیار گروه علوم مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

چکیده

فعالیت معادن به‌منظور استخراج عناصر با ارزش اقتصادی صورت می‌گیرد که این امر به تخریب اراضی طبیعی و دست‌نخورده منجر می‌شود. به‌دنبال این مسئله بقایای استخراج مواد معدنی به‌دلیل وجود عناصر سمی آلی و غیر آلی بر روی خاک منطقه تأثیر گذاشته و خطرات بالقوه‌ای برای زیست‌بوم‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک پدید می‌آورد که علت این امر انتشار آلودگی از طریق فرسایش بادی و آبی و محدودیت استقرار گیاه به‌علت تنش‌های محیطی و بادهای پرسرعت است. به‌منظور پاک‌سازی اراضی آلوده به فلزات سنگین، فناوری‌های مختلف از جمله روش‌های فیزیکی‌وشیمیایی نتایج مطلوبی به‌دنبال دارند. اما این روش‌ها؛ غیراقتصادی بوده و تولید آلاینده‌های جانبی را به‌دنبال دارند. در این بین گیاه‌پالایی روشی طبیعی، اقتصادی، سازگار با محیط‌زیست، کاهش پراکندگی و بازگرداندن بستر به شرایط زیستی قابل‌قبول را دارا هستند که با استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین روش جهت پالایش آلاینده‌ها در اطراف معادن انجام می‌گیرد. از طرفی با توجه به اینکه بقایای معدن حاوی غلظت بالایی از فلزات هستند که غیرقابل تجزیه زیستی است، فناوری گیاه‌پالایی به‌عنوان راه‌حل مناسب به‌منظور رفع آلودگی این اراضی به‌شمار می‌آید. در نوشتار موجود، پیشینه و مفاهیم، کاربردها و فرایندهای گیاه‌پالایی، فلزات سنگین و ویژگی‌ها و اثرات آن‌ها بر گیاهان، واکنش گیاهان مختلف به فلزات گوناگون و فرایندهای جذب و انتقال آن‌ها، ویژگی‌های گیاهان مقاوم و نقش آن‌ها در گیاه‌پالایی و گیاهان فرارتابشت‌کننده به‌طور جامع موردبحث قرار گرفتند. نتایج تحقیقات انجام‌شده، نشان‌دهنده است که بیشتر فلزات، اثرات نامطلوب بر گیاهان داشته و ریخت‌شناسی آن‌ها را تغییر می‌دهند و گیاهان بومی پتانسیل بهتری در گیاه‌پالایی خاک معادن دارند. لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده به‌منظور پاک‌سازی اراضی آلوده به فلزات سنگین در اطراف معادن، گیاهان بومی، سازگار و مقاوم با شرایط مناطق موردتوجه قرار گیرند.

واژگان کلیدی: آلاینده‌ها، پاک‌سازی اراضی، فرارتابشت‌کننده‌ها، گیاهان بومی، مناطق خشک و نیمه‌خشک.

مقدمه

فعالیت معدن

مسئله به رقابت‌های شدید بین فعالیت‌های صنعتی و به‌دنبال آن تخریب زیست‌بوم منجر می‌گردد. به‌طوری‌که فعالیت معادن به ورود مقادیر قابل‌توجهی از عناصر سمی از جمله فلزات سنگین به زیست‌بوم منجر می‌شود که میزان بیش‌از حد آستانه این فلزات، اثرات مضر را به‌دنبال خواهد داشت [۵۳].

توسعه و پیشرفت صنایع به‌دنبال افزایش جمعیت در جهان منجر به بروز خطرات محیط‌زیستی می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش فعالیت‌های انسانی، مقادیر بالایی از آلاینده‌ها به محیط وارد شده و اثرات نامطلوبی بر گیاهان و سایر موجودات زنده به‌دنبال دارد [۷۸]. در این راستا تلاش‌های جهانی در جهت رفع نیازهای روزافزون جوامع بوده که این

طولانی مدت به منظور محدود کردن پتانسیل آلودگی آن‌ها الزامی است [۲۹].

در این راستا اقداماتی باهدف احیای این اراضی و کاهش اثرات محیط‌زیستی آن‌ها صورت گرفته است که برخی از این اقدامات به علت عدم مدیریت صحیح و بدون احیا رها شدند، که نیازمند توجه هستند [۸۵]. به طوری که یکی از اهداف توسعه پایدار در دستور کار ۲۰۳۰، بازسازی و احیای اراضی تخریب یافته از جمله معادن است [۲۹].

چون فعالیت معادن به عنوان یکی از منابع مهم آلودگی به خصوص در اراضی بدون پوشش گیاهی محسوب می‌شود، لذا با استقرار پوشش گیاهی در این اراضی کمک چشمگیری به کاهش انتشار آلودگی از طریق فرسایش آبی و بادی صورت می‌گیرد [۵۸].

یکی از نگرانی‌های عمده جهانی، افزایش ورود فلزات در محیط است. با توجه به اینکه این فلزات به طور طبیعی در محیط یافت می‌شوند اما فعالیت معادن یکی از عوامل مهم در افزایش این فلزات تا سطح سمیت است و از طرف دیگر استخراج و فرآوری سنگ‌های فلزی در معادن نیز منجر به از بین رفتن پوشش گیاهی و حیات وحش منطقه، نابودی اراضی اطراف معادن و تغییرات گسترده در چشم‌انداز منطقه می‌شوند [۸۰].

همچنین خرد کردن سنگ‌های استخراجی در معادن به تولید مقادیر بالایی از گردوغبار منجر می‌شود که آلوده به فلزات می‌شوند. بنابراین استخراج سنگ معادن اثرات نامطلوب زیستی، فیزیکی، هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی را به دنبال دارد [۶].

فلزات سنگین

فلزات سنگین^۱ به عناصری اطلاق می‌گردد که دارای وزن اتمی $63/54 \text{ gr/mol}$ تا $200/59$ ، چگالی بیش از gr/cm^3 و وزن مخصوص بیش از ۴ هستند که توزیع فلزات مذکور در محیط به علت وجود گسترده آن‌ها در خاک، آب‌وهوا تهدیدی جدی برای زیست‌بوم‌ها به شمار می‌آید [۳۱]. از خواص این فلزات، چکش‌خواری، پایداری کاتیونی و شکل‌پذیری است که در این بین فلزاتی از قبیل، آرسنیک^۲،

در این بین خاک به عنوان یکی از منابع طبیعی تجدیدنپذیر پس از تخریب غیرقابل بازیابی است و در اثر عواملی همچون آلودگی خاک ناشی از فعالیت انسانی از جمله معادن در معرض تهدید بوده و زوال سلامتی موجودات زنده را به دنبال دارد [۳۰]. به گونه‌ای که در سال‌های اخیر در کشورهای توسعه یافته نیز انتشار آلودگی خاک‌های ناشی از فلزات سنگین پسماند معادن، آثار نامطلوبی بر زیست‌بوم‌ها را رقم زده است [۹۴]. بنابراین ماندگاری طولانی مدت فلزات سنگین در خاک‌ها از نگرانی‌های اساسی در راستای محیط‌زیست محسوب می‌شود [۳۵].

لذا فعالیت معادن به بروز مشکلات محیط‌زیستی و آلودگی در نزدیکی معادن منجر شده و به دلیل وجود مقادیر بالای فلزات سنگین در این محل‌ها، محدودیت رشد گیاهان وجود دارد [۱۰۵ و ۱۱۰].

از طرفی این مراکز در صورت توقف فعالیت نیز نقش مؤثری در بروز بلایای محیط‌زیستی دارند. به گونه‌ای که اراضی آلوده به فلزات و تجمع ریزگردهای حامل این فلزات اثر نامطلوبی بر سلامتی و کیفیت زندگی موجودات زنده موجود در مجاور این مکان‌ها و اثر قابل توجه بر روی اقتصاد منطقه دارد [۱۱۰].

بنابراین فعالیت استخراجی در معادن یکی از علل مهم در چرخه بیوژئوشیمیایی عناصر سنگین در محیط‌زیست به حساب می‌آید [۷۲] که این فعالیت‌ها به آلودگی خاک، تقلیل پوشش گیاهی، از بین رفتن اراضی، کاهش فعالیت‌های زیستی و بهره‌وری خاک، فرسایش، سیل و فرونشست زمین منجر می‌شوند [۳].

از دیگر اثرات مهم محیط‌زیستی فعالیت معادن می‌توان به ممانعت از رشد گیاهان و توسعه جوامع آسیب‌پذیر اشاره کرد [۳۱].

در واقع فعالیت معادن به صورت مستقیم و غیرمستقیم به رسوب مقادیر بالایی از فلزات در خاک آن محدوده منجر می‌شود که این مسئله به علت تجزیه‌ناپذیری طبیعی فلزات و سمیت بالای آن‌ها پیامدهای منفی بسیاری را به همراه خواهد داشت [۹۴]؛ بنابراین اجرای راه حل‌های

^۲ As

^۱ Heavy metals

نیکل^۱، کروم^۲، سرب^۳، مس^۴، جیوه^۵ و کادمیوم^۶ در فهرست WHO^۷ قرار گرفتند که نگرانی‌های عمومی را در پی دارند. در واقع قسمت قابل‌توجهی از این فلزات از طریق فعالیت‌های انسانی به خاک وارد می‌شوند که قابلیت تجزیه از طریق فرایندهای شیمیایی و میکروبی را ندارند و به مدت طولانی در خاک باقی می‌مانند [۶۴]. به‌طور کلی فلزات سنگین از طریق منابع طبیعی از جمله فوران آتشفشان و هوازدگی سنگ‌های حاوی فلزات و منابع انسانی مانند فعالیت معادن و صنایع حاصل می‌شوند [۶].

در این بین برخی از فلزات عموماً در سازندهایی یافت می‌شوند و شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع نیز نقش مؤثری در گسترش آن‌ها دارند که، آرسنیک، نیکل، کروم، سرب، کادمیوم، مس، کبالت^۸، منگنز^۹، آهن^{۱۰}، روی^{۱۱}، نقره^{۱۲} و پلاتین^{۱۳} از جمله این فلزات هستند [۱۸]. از طرفی عناصر مذکور به‌عنوان عناصر مضر در محیط هستند که فعالیت‌های مختلف معادن از جمله، استخراج، پالایش، تصفیه و فرآوری نقش بسزایی در افزایش دسترس‌پذیری آن‌ها در محیط دارند [۵].

در دهه‌های اخیر فعالیت چشمگیر استخراج معادن و پساب‌های حاصل از فعالیت‌های صنعتی، به‌عنوان منبع آلودگی در ایجاد سمیت برای گیاهان و سایر موجودات زنده محسوب می‌شوند [۷۸]. در واقع فلزات در بین انواع آلاینده‌های مختلف نقش بسزایی در آلودگی مداوم در محیط دارند [۷۹].

یکی از عوامل اساسی در محیط که امروزه بسیار موردتوجه است، آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌باشد که دلیل این مسئله آثار زیان‌بار بسیاری از فلزات در غلظت پایین (۱-۱۰ mg/L) است و حتی برخی فلزات از جمله جیوه در غلظت‌های کمتر (۰/۰۱-۱/۰۰۱ mg/L) نیز سمیت داشته و با توجه به متحرک بودن، آثار منفی بسیاری را به‌همراه دارد [۹۴].

با اینکه بسیاری از فلزات دارای آثار سمیت و مضر برای گیاهان و سایر موجودات زنده هستند اما تعدادی از این فلزات همچون، کروم، کبالت، وانادیوم^{۱۴} و سelenium^{۱۵} در غلظت‌های پایین به‌عنوان عنصرهای حیاتی گیاه محسوب می‌شوند که در تقویت فیزیولوژی گیاهان نقش دارند [۵۳]. اصولاً فلزات سنگین به دو گروه ضروری و غیرضروری تقسیم می‌شوند که نیکل، آهن، مس و روی در غلظت‌های پایین عناصر ضروری و در عملکردهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی موردنیاز هستند [۸۵]. وانادیوم، کبالت، منگنز و مولیبدین^{۱۶} نیز به‌طور طبیعی یافت شده و به‌میزان کم برای موجودات زنده ضروری هستند [۶۴]. اما در صورتی که غلظت این فلزات بیش از حد مجاز باشد، منجر به سمیت و عملکرد منفی در گیاهان و انتقال مواد مغذی ضروری می‌شوند [۹۰]. همچنین آرسنیک، کروم، جیوه، کادمیوم، سرب و آنتیموان^{۱۷} نیز از فلزات غیرضروری در محیط محسوب می‌شوند [۸۵] که این فلزات به‌دلیل وزن اتمی و چگالی بالا برای گیاهان و سایر موجودات زنده سودمند نیستند و تهدیدی برای زیست‌بوم‌ها محسوب می‌شوند [۶۴]. در صورتی یک فلز، سمی تلقی می‌شود که نسبتاً متراکم بوده و به‌دلیل سمیت بالا در زمینه محیط‌زیستی موردتوجه باشد. دلیل سمیت بالای فلزات، اصولاً فعالیت‌های انسانی ذکر شده است [۱۸].

عناصری که در اثر فعالیت معادن ایجاد می‌شوند از عوامل آلودگی خاک منطقه‌اند که این عناصر جزء عناصر معدنی و غیرقابل تجزیه هستند. لذا این عناصر به‌مدت طولانی در محیط باقی‌مانده و در صورت انتقال به گیاهان و سایر موجودات مشکلاتی را برای آن‌ها به‌همراه دارد [۳۰]. بنابراین یک مشکل جهانی، بحث آلودگی خاک به فلزات است که خطری جدی برای سلامتی زیست‌بوم‌ها به‌شمار می‌آید. دلیل این امر را می‌توان به تجمع بسیاری از این عناصر در بافت‌های گیاهان و سایر موجودات زنده (حتی در

¹⁰ Fe

¹¹ Zn

¹² Ag

¹³ Pt

¹⁴ V

¹⁵ Se

¹⁶ Mo

¹⁷ Sb

¹ Ni

² Cr

³ Pb

⁴ Cu

⁵ Hg

⁶ Cd

⁷ World Health Organization

⁸ Co

⁹ Mn

غلظت‌های کم، نیمه‌عمر طولانی و ماهیت غیرقابل‌زیستی) تعمیم داد [۶۰]. لازم به ذکر است که میزان سمیت فلزات در گیاهان به نوع و غلظت فلز، اسیدیته خاک و شکل شیمیایی آن‌ها بستگی داشته [۱۸] و مقدار دسترسی فلزات در خاک با واکنش‌های تبادلی، خصوصیات خاک و ماهیت فلزات تعیین می‌شود [۷۸]. برخی از ویژگی‌های فلزات در جدول ۱ ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فلزات سنگین مختلف

نوع فلز	ویژگی
آرسنیک	با عدد اتمی ۳۳، جرم اتمی ۷۵، چگالی 5.7 g/cm^3 ، دمای ذوب و جوش 814°C و 615°C است که بیستمین عنصر فراوان در زمین به دو شکل آرسنات و آرسنیت می‌باشد و برای موجودات زنده کشنده است. زباله‌های صنعتی یکی از منابع حاصل از این فلز هستند [۴۹]. در نتیجه فعالیت‌های معدنی، آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها وارد زیست‌بوم‌های مختلف می‌شوند [۹۴]. منشأ ادغام‌کننده آرسنیک صنایع رنگ، کاغذ، نساجی، شیشه، دباغی، داروسازی و مهمات هستند [۵۷]. به‌عنوان پادشاه سموم است که به اشکال متالوئید، معدنی، آلی و آرسین موجود می‌باشد و بیش‌ترین سمیت در آرسین و کمترین سمیت در آلی است [۲۱].
نیکل	با عدد اتمی ۲۸، وزن اتمی ۵۹، چگالی 8.9 g/cm^3 ، نقطه ذوب و جوش 1455°C و 2730°C است که در دوزهای بسیار کم مهم بوده اما چنان‌چه به حداکثر قابل‌تحمل برسد مضر است. منابع آلودگی فلز شامل صنایع معدن‌کاری و آب‌کاری فلز هستند [۴۹]. منبع انسانی انتشار این فلز در محیط پساب‌های صنعتی، باتری خودروها و آلیاژهای فولادی هستند [۸].
کبالت	در مقادیر کم ($0.30 - 0.13 \text{ mg/kg}$) برای موجودات زنده ضروری است و مقادیر بالای آن دارای اثرات جهش‌زایی و سرطان‌زایی می‌باشد [۷۷].
کروم	با وزن اتمی ۲۴، جرم اتمی ۵۲، چگالی 7.2 g/cm^3 ، دمای ذوب و جوش 175°C و 2665°C است که به‌طور طبیعی به‌صورت ترکیبات اکسید کروم، ۳ و ۴ ظرفیتی، کرومات و دی کرومات موجود بوده و ازطریق فرآیندهای صنعتی و انسانی ازجمله صنایع نفت، فولاد، کودها، حفاری چاه نفت، دباغی و آب‌کاری فلزات وارد زیست‌بوم می‌شود [۴۹]. در طبیعت به‌صورت سنگ معدن یافت شده و یکی از سنگ معدن‌های اصلی آن کرومیت است و این عنصر ابتدا در کروکویت سنگ سرب قرمز سیبری در سال ۱۷۹۷ کشف شد که در طبیعت به‌وفور به شکل کریستالی در آب، خاک، هوا موجود بوده و در صنایع متالوژی، شیمیایی، آجرسوزی کاربرد دارد. از اشکال بسیار سمی کروم در طبیعت کرومات و دی کرومات است [۲۳]. شامل سنگ کرومیت $\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{O}_4$ و اکسید کرومات Cr_2O_3 که بیش‌تر حاصل از ضایعات صنعتی فلزات، منسوجات، کاغذ و تصفیه پشم است [۱۹]. شکل کرومات آن بسیار سمی و خطرناک است و ترکیبات کروم در هوا به‌صورت ذرات ریز گردوغبار روی سطوح خشکی و آب وجود دارد و به‌شدت جذب ذرات خاک می‌شوند. میزان بسیار کمی قابلیت انحلال در آب را دارد که منجر به انتقال آن به آب‌های زیرزمینی و خاک‌های عمیق می‌شود [۷۷]. از عناصر ضروری در رشد و نمو موجودات است، اما نوع ۶ ظرفیتی آن به‌عنوان سمی‌ترین عنصر در پوسته زمین شناخته شده است. در زباله‌های تولیدشده ناشی از صنایع، معادن، کشاورزی و حمل‌ونقل که برای منابع طبیعی سمی هستند، وجود دارد که پرمصرف‌ترین ترکیب در صنایع فلزی، سیمان و رنگ است و منجر به ایجاد مشکلات محیط‌زیستی متعدد می‌گردد. جهت اصلاح و افزایش کارایی بازیافت کروم از روش‌های تبادل یونی، جذب سطحی، فیلتراسیون غشایی، نانو فیلتراسیون و اسمز معکوس انجام می‌شود [۵۷].

مس	فلزی با چگالی 8960 kg/m^3، جرم اتمی $63/55$ و گرمای ذوب $13/26 \text{ kJ/mol}$ است [۸۸]. عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان و جانوران در غلظت‌های پایین می‌باشد که به اشکال مختلف فلز، یون، مواد معدنی و شیمیایی وجود دارد و از طریق معادن، فاضلاب‌ها و کود در محیط رها گردد [۵۶]. آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا میزان غلظت این فلز در صنعت را $1/3 \text{ mg/l}$ تعیین کرده است و فناوری‌های اصلاحی حذف یون مس شامل الکترودیالیز، فیلتراسیون، انعقاد الکتریکی، شناورسازی الکتریکی، چسبندگی فیزیکی، تبادل یونی، نانوفیلتراسیون و جذب می‌باشد [۵۷].
کادمیوم	فلزی با چگالی 8650 kg/m^3، جرم اتمی $112/41$ و گرمای ذوب $6/21 \text{ kJ/mol}$ است [۸۸]. عنصر طبیعی در محیط که غلظت بالای آن منجر به سمیت می‌گردد. منبع اصلی آن نیروگاه‌های هسته‌ای، صنایع رنگ و زباله‌های الکتریکی است و طبق نظر آژانس حفاظت محیط‌زیست حداکثر مجاز آن در آب $0/03 \text{ mg/l}$ است [۵۷]. میانگین این فلز در پوسته زمین و خاک‌های جهان به ترتیب $0/1$ و $0/41 \text{ mg/kg}$ و در خاک‌های غیرآلوده شنی، لومی و آلی به ترتیب $0/1$ تا $0/3$، $0/2$ تا $0/8$ و $0/2$ تا $2/5 \text{ mg/kg}$ می‌باشد [۸۱].
جیوه	فلزی با چگالی 13530 kg/m^3، جرم اتمی $200/59$ و گرمای ذوب $2/29 \text{ kJ/mol}$ است [۸۸]. طبق نظر آژانس حفاظت محیط‌زیست، میزان سمیت آن برای موجودات زنده به غلظت، ترکیب شیمیایی، زمان و حساسیت بستگی دارد و سومین ماده سمی است که منشأ آن صنعت کاغذ، رنگ و تجهیزات الکتریکی می‌باشد [۵۷]. منبع انسانی انتشار آن در محیط رها کردن بقایای استخراج معادن، احتراق زغال سنگ و زباله‌های پزشکی است [۹].
روی	فلزی با چگالی 7140 kg/m^3، جرم اتمی $65/38$ و گرمای ذوب $7/32 \text{ kJ/mol}$ می‌باشد [۸۸]. فلزی با چگالی 11340 kg/m^3، جرم اتمی $207/2$ و گرمای ذوب $4/77 \text{ kJ/mol}$ می‌باشد [۸۸]. منبع انسانی انتشار این فلز در محیط حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، ساخت باتری و احتراق بنزین می‌باشد [۹].
سرب	

تأثیر فلزات سنگین در گیاهان

عملکرد گیاهان مختلف و به‌دنبال آن خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژی گیاهان، نقش بسزایی در رشد آن‌ها دارد. لذا آثار ناشی از تنش‌های محیطی از جمله فلزات سنگین در گیاهان باید مورد بررسی قرار گیرد. علت این مسئله برهم‌کنش این فلزات با مولکول‌های زیستی داخل سلول است که با عکس‌العمل‌های گوناگون منجر به آسیب گیاهان می‌شود [۴۷].

بنابراین گیاهانی که در اراضی آلوده به فلزات سنگین رشد می‌کنند، دچار آسیب‌های بسیاری می‌شوند که علت این امر وجود فلزات مذکور در خاک و به‌دنبال آن کاهش ریزمغذی‌های مفید خاک و خروج مواد مغذی از خاک است که این مسئله منجر به اختلال در رشد، میزان کلروفیل، فعالیت آنزیم‌ها و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود

[۴۹]. بنابراین ورود و تجمع فلزات در گیاهان به تغییرات

مختلفی در فعالیت‌های ریخت‌شناسی، فیزیولوژی و متابولیکی و اختلال در عملکرد گیاهان منجر می‌شود [۵۶]. در واقع به‌علت ورود فلزات به ساختار گیاهان در آن‌ها تغییراتی ایجاد و به‌دنبال آن به بروز تنش اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانسی منجر می‌شود که این مسئله به‌عواملی از جمله، نوع و سن گیاه، نوع فلز، محیط رشد و مدت زمان قرارگیری در معرض فلزات بستگی دارد [۲۳].

آثار سمیت فلزات در گیاهان مختلف از طریق علائم بصری متعددی قابل شناسایی است. این علائم شامل کلروز و نکروز، پژمردگی، پیچ‌خوردگی، کاهش تعداد برگ‌ها و کاهش رشد می‌باشد [۳۸]. از دیگر نشانه‌های سمیت فلزات می‌توان به قهوه‌ای شدن نوک برگ‌ها، تغییر رنگ برگ‌ها به بنفش، تغییر در ضخامت، تعداد، سطح و رنگدانه‌های برگ‌ها، اختلال در روابط آب و گیاه، و فرآیندهایی مانند

کاهش عناصر ضروری مس، منیزیم، کلسیم و پتاسیم در گیاه [۸۷] و جایگزینی آن‌ها با یون‌های منیزیم و آهن است [۳۰]. در واقع فلزات منجر به آسیب غشا کلروپلاست و کاهش کلروفیل در گیاه شده که این مسئله باعث تخریب ساختار، اختلال در عملکرد کلروپلاست و جلوگیری از جذب عناصر ضروری به‌منظور سنتز رنگدانه‌ها در گیاهان می‌شود [۲۸].

کاهش فتوسنتز نیز در اثر کاهش میزان کلروفیل در گیاهان است که به‌علت کاهش و یا اکسیداسیون مولکول‌های کلروفیل توسط گونه‌های فعال اکسیژن و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل با جایگزینی فلزات با عنصر منیزیم و بالا رفتن فعالیت آنزیم کلروفیل‌از رخ می‌دهد [۹۲]. بنابراین تنش فلزات در گیاهان منجر به تجمع متابولیت‌های ثانویه^۱ و سنتز شده که نقش دفاعی دارند، می‌شود.

در واقع گیاه در دوره رشد جهت سازگاری با محیط شروع به تولید متابولیت‌های ثانویه می‌کند که این امر در افزایش مقاومت و بقای گیاه الزامی است [۱۱۳] که یکی از راهکارهای گونه‌های مقاوم، فعال شدن آنزیم‌ها است [۳۷]. افزایش فعالیت آنزیم‌ها تحت تأثیر سمیت فلزات، نشان‌دهنده نقش محوری آن‌ها در تحمل تنش ناشی از فلزات است [۹۲]. لازم به ذکر است که مؤثر بودن واکنش‌های دفاعی به نوع گیاه، فلز و غلظت فلز بستگی دارد [۹۲].

در این بین گیاهانی که در معادن رشد یافتند نسبت به گونه‌های رشد یافته در سایر اراضی دارای مقاومت بالاتری هستند، که این مهم به علت ضخیم‌شدن دیواره سلولی، اپیدرم ساقه و دیواره لوله آوند چوبی است که افزایش مقاومت را در بر دارد. برخی از آثار فلزات سنگین و محدوده مجاز آنها در گیاهان در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است (جداول ۲ و ۳).

تعرق و فتوسنتز، توقف رشد و قهوه‌ای شدن ریشه‌ها، کاهش فعالیت تقسیم میتوزی، از بین رفتن تورژسانس، کاهش طول ریشه و افزایش ریشه‌های جانبی اشاره کرد [۹۲]. همچنین کاهش هدایت روزنه‌ای نیز از دیگر عوامل سمیت فلزات در گیاهان محسوب می‌شود [۱۱۱].

منابع دیگر به کاهش جذب ریزمغذی‌ها، کاهش زیست‌توده و عملکرد گیاه، اختلال در متابولیسم و فتوسنتز، ممانعت از فتوسنتز و جذب آب، تغییر رنگ و توقف رشد ریشه، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش دی‌اکسیدکربن [۱۲]، [۱۶] و همچنین کاهش بهره‌وری و مرگ گیاه اشاره کرده‌اند [۴۰]. علائم ذکر شده بر روی ساختار، تغییرات مولکولی و بیوشیمیایی در بافت‌های گیاهان تأثیرگذار است [۲۳]. همچنین باعث ایجاد اختلال در جذب منگنز، آهن، کلسیم، فسفر، پتاسیم و منیزیم و به‌دنبال آن کاهش غلظت سلولی می‌شوند [۶۲].

کاهش رشد در گیاهان تحت تأثیر فلزات ناشی از ممانعت گسترش و تقسیم‌سلولی است که تأثیر این فلزات بر روی دیواره سلولی باعث اختلال در فعالیت‌های گیاه، کاهش در رشد، ارتفاع گیاه، رشد ریشه و انتقال آب و مواد مغذی به اندام‌های هوایی می‌گردد. لذا این امر به کاهش فتوسنتز، ایجاد کلروز و اختلال در جذب عناصر غذایی در گیاه [۵۶] و همچنین کاهش تولید ماده خشک منجر می‌گردد [۱۱۱]. بنابراین فرآیند جذب آب و مواد مغذی در گیاهان محدود شده که به کاهش رشد ساقه در آن‌ها منجر می‌شود [۶۲].

از طرفی فلزات سنگین باعث ایجاد اختلال در دسترسی و جذب ریزمغذی‌ها از طریق گیاه و به‌دنبال آن کاهش رشد و تغییرات در رشد ریشه نسبت به اندام‌های هوایی می‌شوند [۲۳]. با ایجاد و رشد ریشه‌های جانبی، رشد ریشه عمودی گیاه و به‌دنبال آن زیست‌توده‌تر کاهش می‌یابد. در واقع رشد ریشه گیاه در طول تنش با فلزات سنگین کاهش یافته و یا متوقف می‌شود.

از طرفی انتقال فلزات سنگین به اندام‌های هوایی باعث اختلال در متابولیسم سلولی و کاهش ارتفاع اندام‌هوائی می‌گردد [۹۲]. کاهش کلروفیل تحت تأثیر فلزات نیز در اثر

¹ Secondary Metabolite

جدول ۲- برخی از آثار فلزات سنگین در گیاهان مختلف

فلز	آثار
آرسنیک	کاهش کلروفیل a, b و کل در گونه <i>Nicotiana tabacum</i> [۳۲]
نیکل	کاهش رشد و کاهش میزان کلروفیل در گونه <i>Spinacia oleracea</i> [۱۰۰] کاهش کلروفیل a, b و کل در گونه <i>Nicotiana tabacum</i> [۳۲] کاهش طول ریشه و ساقه، وزن تر و خشک ساقه و ریشه و کاهش کلروفیل a, b و کل در گونه <i>Cicer arietinum</i> [۸۹]
کبالت	کاهش طول ریشه و ساقه، وزن تر و خشک ساقه و ریشه و کاهش کلروفیل a, b و کل در گونه <i>Cicer arietinum</i> [۸۹] کاهش وزن خشک هوایی و ریشه و کاهش کلروفیل در گونه <i>Mentha spicata</i> [۱۲]
کروم	کاهش ارتفاع ساقه، ارتفاع ریشه، وزن تر، کلروفیل در گونه <i>radiate Vigna</i> [۸۶] کاهش ارتفاع گیاه، وزن خشک هوایی و زیرزمینی، قطر یقه و کلروفیل در گونه <i>Hordeum vulgare</i> [۸] کاهش ارتفاع گیاه، کاهش وزن تر اندام هوایی و زیرزمینی، کاهش کلروفیل a, b در گونه <i>Broussonetia papyrifera</i> [۱۱۶]
کادمیوم	کاهش ارتفاع ساقه و ریشه، کاهش وزن تر و خشک هوایی در گونه <i>Sorghum bicolor</i> [۵۵] کاهش ارتفاع ساقه و ریشه در گونه <i>Oryza sativa</i> [۴۶]
سرب	کاهش کلروفیل a, b، افزایش آنزیم کاتالاز و پراکسیداز در گونه <i>Lemnatisulcal</i> [۴] کاهش ارتفاع ساقه و ریشه در گونه <i>Oryza sativa</i> [۴۶ و ۹۱]
آلومینیوم	کاهش ارتفاع گیاه، وزن خشک هوایی و زیرزمینی، قطر یقه و کلروفیل در گونه <i>Hordeum vulgare</i> [۸]
مس	کاهش کلروفیل a, b، افزایش آنزیم کاتالاز و پراکسیداز در گونه <i>Lemnatisulca</i> [۴]

جدول ۳- محدوده مجاز برخی از فلزات سنگین در گیاهان [۱۸]

فلزات سنگین	محدوده (μg/g)	فلزات سنگین	محدوده (μg/g)
آرسنیک	۰/۰۲ - ۷	آنتیموان	۰/۰۲ - ۰/۰۶
کبالت	۰/۰۵ - ۰/۵	مس	۴ - ۱۵
نیکل	۱	منگنز	۱۵ - ۱۰۰
کروم	۰/۲ - ۱	مولیبدین	۱ - ۱۰
کادمیوم	۰/۱ - ۲/۴	استرانسیوم	۰ - ۳۰
جیوه	۰/۰۰۵ - ۰/۰۲	روی	۸ - ۱۰۰
سرب	۱ - ۱۳	آهن	۱۴۰

گیاه‌پالایی^۱

امروزه به‌منظور رفع نیازهای جوامع و توسعه فناوری، بهره‌برداری از منابع معدنی امری اجتناب‌ناپذیر است که در این راستا حدود 40000 km^2 از معادن تحت‌تأثیر قرار گرفتند. اراضی اطراف معادن به‌دلیل کمبود مواد آلی و ریزمغذی‌ها، میزان بالای فلزات و اسیدیته خاک باعث

پراکندگی فلزات سنگین از طریق باد، آب و زنجیره غذایی موجودات زنده می‌گردند و این مسئله منجر به در معرض خطر بودن این اراضی می‌شود. بنابراین یک فناوری مناسب احیایی و اصلاحی همچون گیاه‌پالایی در این مورد ضروری است [۷۹]. واژه گیاه‌پالایی از دو کلمه با پیش‌وندی، با مفهوم گیاه^۲ و ریشه کلمه‌ای، با

^۲ phyto

^۱ Phytoremediatio

راستای اصلاح و احیای خاک‌های آلوده به فلزات است که روشی زمان‌بر و تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی و زمین‌شناسی منطقه می‌باشد [۶۴].

در گیاه‌پالایی از گیاهان سبز با توجه به پتانسیل آن‌ها به‌منظور جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها به مناطق مجاور از طریق پدیده‌های آب‌وهوایی استفاده می‌شود [۳۰] که یکی از بهترین راهکارها در راستای پاک‌سازی اراضی است و علیرغم مزیت‌های فراوان، اعمال آن در بسیاری از کشورهای پیشرفته هنوز گزارش نشده است.

علت این مسئله می‌تواند به‌دلیل عدم اطلاع کافی از مزیت‌های محیط‌زیستی و اصول اجرای این فناوری باشد. اما امروزه به‌علت کمبود بودجه در برنامه‌های احیای محیط‌زیست، بسیاری از پژوهشگران در این حوزه به‌دنبال فناوری‌های به‌صرفه و سازگار با محیط در راستای احیای اراضی آلوده به فلزات هستند [۶۴].

انتخاب روش اصلاحی مناسب به‌عوامل مختلف ازجمله نوع خاک آلوده به فلزات، شکل شیمیایی و فیزیکی آن‌ها وابسته است که در این بین راهکارهای احیا یا اکسیداسیون، اسمز معکوس و تبادل یونی قابل استفاده هستند. از طرفی این راهکارها برای غلظت‌های پایین فلزات مؤثر نبوده و هزینه بسیاری را به‌همراه دارند. بنابراین روش‌های شیمیایی و فیزیکی برای پاک‌سازی فلزات از محیط، به‌عنوان راهکارهای زیستی مناسب محسوب می‌شوند که در این راستا کاربرد ریزمغذی‌ها و گیاهان سبز جهت احیای خاک‌های آلوده و برگرداندن آن به حالت طبیعی گزینه اصلاحی مناسبی است [۶۴].

از روش‌های دیگر اصلاح خاک‌های آلوده می‌توان به جداسازی مکانیکی، پاک‌سازی زیستی و شستن خاک در محل اشاره کرد که این راهکارها نیز دارای معایبی هستند و آثار ثانویه بر خاک باقی می‌گذارند. اما فناوری گیاه‌پالایی به‌منظور پایداری محیط مناسب بوده و آثار مضر کمتری را نیز به‌همراه دارد [۵۳].

در روش گیاه‌پالایی، گیاهانی که پتانسیل تجمع بالای فلزات را دارند در اراضی آلوده کشت می‌شوند. اما این گونه‌ها در برابر انواع آلاینده‌ها به‌صورت یکسان مقاومت ندارند و مقاومت گیاه به سینوژنتیک ماده سمی بستگی دارد. از

مفهوم حذف^۱ تشکیل شده است که این فناوری جهت حذف آلاینده‌های آلی و معدنی در محیط از ازجمله، خاک، هوا و آب کاربرد دارد [۱۰۸].

ایده استفاده از گیاهان چوبی، درختچه‌ای و علفی به‌منظور پاک‌سازی محیط اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط محققان مطرح و کاربردی شدن این مفهوم در حدود ۳۰ سال زمان برد [۶۹]. در این روش با استفاده از گیاهان و ریزمغذی‌ها، آلاینده‌های موجود در محیط ازجمله فلزات سنگین و رادیونوکلوئیدها به‌صورت کامل یا جزئی حذف می‌شوند [۶۴].

کاربرد روش‌های اصلاحی که اغلب دارای ماهیت فیزیکی و شیمیایی هستند به‌عنوان راهکاری جهت کاهش اثرات محیطی اراضی آلوده به فلزات سنگین هستند، اما این روش‌ها همیشه پاسخگو و مفید نیستند. در این بین راهکارهای زیستی ازجمله گیاه‌پالایی به‌عنوان یک روش محیط‌زیستی مناسب به‌شمار می‌آید [۹۴].

در روش گیاه‌پالایی از گیاهان در حال رشد به‌منظور انتقال و یا ثبات آلودگی در منطقه هدف استفاده می‌گردد که مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌های اصلاحی (تثبیت فیزیکی، شستشوی شیمیایی و...) اقتصادی، اجرای ساده، بدون آثار ثانویه آلودگی و کمک در پدید آوردن مجدد جوامع بندپایان و گیاهان موجود در منطقه است [۵۹].

فلزات منجر به آلودگی شدید در زیست‌بوم‌ها می‌شوند که این مسئله برای سلامتی موجودات زنده خطرناک بوده و نیازمند پاک‌سازی هستند. اما روش‌های خروج فلزات از این محیط‌ها مستلزم هزینه سنگینی است که در نهایت به تخریب خاک نیز منجر می‌گردند. لذا گیاه‌پالایی به‌عنوان گزینه مناسب در راستای سازگاری با محیط و مقرون به صرفه تلقی می‌شود [۵۸].

روش گیاه‌پالایی از فناوری‌های پاک‌سازی اراضی آلوده به فلزات سنگین است که در آن با تجمع فلزات در بخش‌های مختلف گیاه عصاره‌کشی انجام می‌گردد. این روش بسیار ساده بوده و امکان اجرا در سطح وسیع را دارد و نکته قابل توجه انتخاب گونه مناسب است که باید آن گونه قابلیت رشد و سازگاری با محیط را دارا بوده و نیاز آبی و غذایی کمی داشته باشد [۸۴]. این فناوری غیرمخرب در

^۱ remedium

طرفی گیاه‌پالایی به دلیل تولیدات گیاهی قابل بازیافت و حداقل آثار محیط‌زیستی بسیار مورد توجه است. از مزیت‌های دیگر گیاه‌پالایی، تبدیل اراضی بایر به مشجر و بازدهی اقتصادی طولانی‌مدت آن است که این پتانسیل به مقاومت و توانایی گیاه جهت زنده ماندن در شرایط نامناسب محیطی وابسته است [۶۸].

طبق بررسی‌ها، هزینه فناوری گیاه‌پالایی جهت پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین حدود ۵ درصد از سایر روش‌های اصلاح خاک است [۹]. برخی دیگر نیز هزینه روش گیاه‌پالایی در مقایسه با سایر روش‌ها را ۱۰ برابر کمتر اعلام کردند. اما این کارایی به نوع فلز و گیاه، شرایط محیط و اقلیم منطقه وابسته است [۱۱]. به‌طوری‌که براساس محاسبات انجام شده، پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با فناوری‌های گیاه‌پالایی، شیمیایی و فیزیکی به‌ترتیب ۶۰-۷، ۴۲۰-۹۰ و ۷۲۰-۱۴۰ \$/ton (دلار در هر تن)، برآورد شده است که در این بین عواملی از قبیل حفاری، حمل و نقل، نظارت، بازیافت و پایش آن‌ها نیز باید مدنظر قرار گیرد [۹۸].

از مزیت‌های دیگر فناوری گیاه‌پالایی، کاربرد مجدد فلزات استخراج یافته از گیاهان، کاهش فرسایش خاک، انتشار کمتر دی‌اکسید کربن، تصفیه و تنوع زیستی محیط و بالا بردن کیفیت آب و هوای منطقه بوده که به‌صورت وسیع جهت پالایش خاک‌های آلوده به فلزات کاربرد دارند و در این راستا از گونه‌های گیاهی که پتانسیل تجمع مقادیر بالایی از فلزات در بافت‌های خود را دارند، جهت پاک‌سازی اراضی آلوده به این فلزات استفاده می‌شود [۳۹]. فناوری گیاه‌پالایی به‌منظور اجرای برنامه‌های طولانی‌مدت، زیباشناختی، تولید انرژی با سوختن زیست‌توده گیاهان کاربرد دارد و گونه‌هایی که پتانسیل جذب میزان بالایی از فلزات سنگین در بخش‌های هوایی خود را دارند، مورد توجه پژوهشگران هستند [۷۹].

انتخاب گونه گیاهی مناسب به‌منظور احیای اراضی اطراف معادن ضروری است و گیاه انتخاب شده باید مقاومت بالایی به فلزات سنگین در خاک منطقه، تحمل شرایط آب‌وهوایی و زیستگاه منطقه مذکور را دارا باشد [۸۵]. از ویژگی‌های گونه‌های مناسب جهت گیاه‌پالایی می‌توان به رشد سریع، زیست‌توده بالا، پتانسیل تجمع مقادیر بالای

فلزات در بخش‌های هوایی و سیستم ریشه عمیق که اصولاً گیاهانی با این ویژگی در طبیعت کم هستند، اشاره کرد [۷۸].

چنانچه گیاهی پتانسیل رشد و زیست‌توده بالا داشته باشد و بدون بروز آثار سمیت توانایی تجمع میزان بالایی از فلزات را در بخش‌های هوایی خود داشته باشد، جهت اصلاح اراضی آلوده به فلزات سنگین سودمند است [۷۸]. بنابراین گونه‌هایی که دارای رشد و نمو کم، زیست‌توده پایین و سیستم ریشه‌ای سطحی باشند، مناسب اجرا در فناوری گیاه‌پالایی نمی‌باشند [۱].

مدت زمان لازم برای اجرای روش گیاه‌پالایی به‌عوامل مختلفی از جمله، طول فصل رشد و کارایی گونه گیاهی، نوع فلز سنگین و میزان آلودگی آن بستگی دارد [۷۷]. در فناوری گیاه‌پالایی چنانچه از گیاهان بومی منطقه استفاده شود، در گام اول این امر به ایجاد زیستگاه برای حیات‌وحش منطقه منجر خواهد شد [۷۰]. در این راستا تعداد کمی گونه گیاهی مناسب به‌منظور گیاه‌پالایی شناخته شدند که علت این مسئله عدم دقت کافی در راستای بررسی این گونه‌هاست [۷۰].

ذکر این نکته ضروری است که خاک در مناطق آلوده شرایط مناسبی نداشته و استقرار و رشد گیاهان موجود در منطقه با مشکلاتی همراه خواهد شد. بنابراین نیاز به شناسایی گونه‌های گیاهی است که پتانسیل مقابله با شرایط سخت و توانایی تجمع فلزات سنگین را دارا باشند و این مسئله در بالا بردن کارایی گیاه‌پالایی تأثیرگذار است. لذا بررسی و مطالعه پوشش اطراف معادن و آنالیز مقدار غلظت فلزات در آن‌ها، به شناخت بهتر گونه‌های انباشت‌کننده فلزات کمک شایانی خواهد کرد [۵۸]. تعداد زیادی از گیاهان به‌علت واکنش‌های تطبیقی نسبت به فلزات سنگین مقاوم شدند که علت این مسئله رشد و نمو طولانی‌مدت این گیاهان در خاک‌های آلوده به این فلزات است.

لذا گیاهان بومی به‌منظور گیاه‌پالایی در این مناطق ارجحیت دارند که علت این امر رشد، بقا و تولیدمثل آن‌ها تحت تأثیر تنش‌های محیطی است. بنابراین به‌منظور اجرای فناوری گیاه‌پالایی در مناطق آلوده به فلزات باید گونه‌های سازگار با خاک و آب‌وهوای مناطق هدف شناسایی شوند [۱].

برداشت شده گیاه دارای فلز است، به عنوان یک تهدیدکننده آلودگی ثانویه محسوب می شود و بیشتر پژوهشگران پیشنهاد سوزاندن آن را می دهند تا میزان قابل توجهی از حجم موادی که نیاز به تخلیه از محدوده دارند، کاهش یابد. در این بین از خاکستر حاصل از آن ها که سرشار از فلزات است، فلزاتی که ارزش اقتصادی دارند، استخراج می شود. لذا هزینه های اصلاح خاک های آلوده جبران خواهد شد. علاوه بر این می توان از زیست توده برداشت شده به منظور تولید سوخت های زیستی در راستای تولید انرژی زیستی بهره برد. البته استخراج گیاهی یک روش اصلاحی بلندمدت است که نیازمند تعدد چرخه کشت در راستای کاهش سطح قابل قبول فلزات می باشد [۷۷].

در این راستا جهت ممانعت از پراکنده شدن خاکستر حاصل از احتراق بخش هوایی گیاهان، از نظیف کننده، رسوب دهنده الکترواستاتیکی و فیلتر استفاده می شود [۸۵]. استخراج گیاهی با توجه به برداشت بخش های هوایی گیاهان و تبدیل آن ها به فلزات با ارزش و سنگ معدن زیستی، روشی مقرون به صرفه در گیاه پالایی است [۸۵]. این فناوری مانع از هدررفت خاک سطحی از طریق حفاری و جایگزین مناسب برای فناوری های قدیمی است [۶۰]. در استخراج گیاهی، گیاهان بیش از ۰/۰۱ وزن خشک خود، پتانسیل تجمع فلزات در بخش های هوایی را دارند.

در این بخش معیار انتخاب گیاهان، مقدار انتقال فلزات از اندام زیرزمینی به هوایی است که شامل دو روش القایی و پیوسته است. در روش پیوسته از گیاهان بومی منطقه که پتانسیل تجمع مقادیر زیادی از فلزات را دارند، استفاده می شود و در روش القایی با استفاده از مواد شیمیایی، مقدار تجمع فلزات در گونه های گیاهی را بالا می برند [۷۸].

استخراج گیاهی به منظور اصلاح خاک هایی با عمق کم و با سطوح آلودگی متوسط تا کم، مناسب می باشد و در این بین عواملی از قبیل، توپوگرافی قابل قبول اراضی به منظور کشت، عدم وجود موانع در اراضی، دسترسی زیستی به فلزات، پتانسیل تجمع میزان بالای فلزات در بخش های هوایی، مقاومت گیاه به فلزات و زیست توده بالا، مقاومت در برابر تنش های وارد شده به خاک، سیستم ریشه ای متراکم،

از طرفی گونه های مذکور باید ویژگی های دیگری از جمله مقبولیت اقتصادی، توانایی استخراج و یا بی حرکت کردن فلزات، ممانعت از آسیب رساندن به خاک و کمک به حاصلخیزی و افزایش کیفیت خاک را دارا باشند [۸۵]. در فرآیند گیاه پالایی گونه های گیاهی سبز که توانایی تجمع فلزات سنگین به منظور انتقال، تثبیت و یا تخریب آن ها را دارند، با توجه به نوع گونه گیاهی، خاک و آلاینده ها به چند نوع مختلف از جمله، استخراج گیاهی^۱، تثبیت گیاهی^۲، تبخیر گیاهی^۳ و فیلتراسیون گیاهی^۴ تقسیم می شوند [۷۸]. تقسیم بندی مذکور بر مبنای عملکرد گیاه پالایی گونه ها است و کاربرد تقسیم بندی مذکور به اهداف اصلاحی خاک منطقه بستگی دارد که علت این امر، ویژگی های خاص هر گونه گیاهی است [۵۳].

بنابراین از موارد ذکر شده در راستای پاک سازی اراضی آلوده استفاده می گردد که در این زمینه شناخت فرآیند مورد نظر، به جهت مقاومت گیاه در طراحی راهبرد مذکور ضروری است و در این بین تحقیقات بیشتری در راستای کاربرد گیاهان بومی منطقه به منظور احیای بوم سازگان آن مهم می باشد [۸۵]. برخی از گونه های گیاهی دارای پتانسیل گیاه پالایی در جدول ۴ ارائه شده اند.

برداشت گیاه

به علت اینکه گونه های انباشت کننده فلزات سنگین که پتانسیل رویش در اراضی آلوده به فلزات را دارند، در گروه استخراج گیاهی قرار گرفته اند، از رایج ترین و مهم ترین تقسیم بندی های ذکر شده در فناوری گیاه پالایی محسوب می شود.

در این فرآیند اندام زیرزمینی گیاه، فلز را از خاک جذب و به بخش های هوایی انتقال می دهد و اگر میزان دسترسی فلزات برای جذب در گیاهان کافی نباشد، اصولاً از عوامل اسیدی به منظور رها کردن آن ها در محلول خاک استفاده می شود [۷۷].

زمانی که گیاهان به رشد کافی رسیدند و فلزات را در اندام های هوایی خود تجمع دادند، بخش های هوایی برداشت و از محدوده خارج می شوند. با توجه به اینکه زیست توده

³ Phytovolatilization

⁴ Phytofiltration

¹ Phytoextraction

² Phytostabilization

استقرار آسان و مقاومت در برابر بیماری و آفات در انتخاب نوع گونه گیاهی دخیل می‌باشند.

تاکنون تعداد زیادی از گونه‌هایی که پتانسیل استخراج گیاهی دارند، شناسایی شده‌اند، اما گونه‌ای که تمام ویژگی‌های مذکور را دارا باشند، شناخته و معرفی نشده است [۷۷]. استخراج گیاهی به‌عنوان کاربردی‌ترین و مفیدترین فناوری در فرآیند گیاه‌پالایی است، اما یافتن گیاه مناسب جهت استخراج گیاهی دشوار است.

بنابراین شناسایی گیاه مناسب که دارای پتانسیل رشد در اراضی آلوده به فلزات و توانایی تجمع مقادیر بالای این

فلزات در بخش‌های هوایی را داشته باشد، بسیار اهمیت دارد [۸۵].

میزان مؤثر بودن استخراج گیاهی به مکان و نوع فلز بستگی دارد و چنانچه میزان آلودگی فلزات در خاک‌ها شدت داشته باشد، رشد گیاهان را مختل می‌کند [۶۰]. برخی از گونه‌های دارای پتانسیل استخراج گیاهی فلزات در جدول ۵ ارائه شده است (جدول ۵).

جدول ۴- گونه‌های گیاهی دارای پتانسیل گیاه‌پالایی [۷۸]

فلزات سنگین	گیاهان دارای پتانسیل گیاه‌پالایی	نام فارسی	ملاحظات
	<i>Acacia nilotica</i>	چش (کرت)	چندساله، دارویی-زینتی
	<i>Atriplex lentiformis</i>	سلمکی، دانه عدسی	چندساله، علوفه ای
	<i>Atriplex halimus</i>	سلمکی بوته‌ای	چندساله، علوفه ای
	<i>Boehmeria nivea</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Canna indica</i>	گل اختر	چندساله، زینتی
	<i>Lagerstroemia indica</i>	توری	چندساله، زینتی
کادمیوم	<i>Lathyrus sativus</i>	خلر	یکساله، علوفه ای
	<i>Sedum alfredii</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Solanum nigrum</i>	تاجریزی سیاه	یکساله، دارویی
	<i>Suaeda fruticosa</i>	سیاه شور	چندساله، دارویی-علوفه ای
	<i>Thlaspi caerulescens</i>	-	یکساله، زینتی
	<i>Vetiveria zizanioides</i>	علف وتیور	چندساله، دارویی
	<i>Youngia japonica</i>	-	یکساله، دارویی
کروم	<i>Genipa americana</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Pistia</i> sp	-	یکساله، زینتی
کبالت	<i>Haumaniastrum robertii</i>	-	یکساله
	<i>Helianthus annuus</i>	گل آفتابگردان	یکساله، زینتی
	<i>Lathyrus sativus</i>	خلر	یکساله، علوفه ای
سرب	<i>Ludwigia peploides</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Luzula campestris</i>	-	چندساله، علوفه ای
	<i>Medicago sativa</i>	یونجه	چندساله، دارویی-علوفه ای
نقره	<i>Pistia stratiotes</i>	کاهوی آبی	یکساله، زینتی
جیوه	<i>Spartina</i> sp.	-	چندساله، علوفه ای
	<i>Dalbergia sissoo</i>	جگ یا شیشم	چندساله، دارویی
مس	<i>Lactuca sativa</i>	کاهو	چندساله، علوفه ای
	<i>Helianthus annuus</i>	آفتاب گردان	یکساله، زینتی

یکساله،	لادن آبی/آب بشقاب	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	
چندساله، دارویی-علوفه‌ای	توتون	<i>Nicotiana tabacum</i>	
چندساله، دارویی	سیاه شور / شوران	<i>Suaeda fruticosa</i>	
	علف وتیور	<i>Vetiveria zizanioides</i>	
چندساله، علوفه‌ای، زینتی	-	<i>Berkheya coddii</i>	
چندساله، دارویی	جگ یا شیشم	<i>Dalbergia sissoo</i>	نیکل
چندساله، زینتی	-	<i>Noccaea caerulescens</i>	
چندساله، دارویی-زینتی	بید سبیدی	<i>Salix viminalis</i>	
چندساله، علوفه‌ای	سلمکی بوته‌ای	<i>Atriplex halimus</i>	
چندساله، زینتی	لادن آبی/آب بشقاب	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	
چندساله، زینتی	-	<i>Ludwigia peploides</i>	روی
چندساله، زینتی	-	<i>Noccaea caerulescens</i>	
یکساله، زینتی	-	<i>Thlaspi caerulescens</i>	
یکساله، دارویی	خردل هندی	<i>Brassica juncea</i>	آرسنیک
چندساله، زینتی	سرخس	<i>Pteris vittata</i>	

جدول ۵- برخی از گونه‌های دارای پتانسیل استخراج گیاهی فلزات سنگین [۸۵ و ۷۸]

فلزات سنگین	گونه‌های استخراج‌کننده	نام فارسی	ملاحظات
نیکل	<i>Alyssum</i> sp	قدومه	یکساله، زینتی
	<i>Berkheya coddii</i>	-	چندساله، علوفه‌ای، زینتی
	<i>Thlaspi</i> sp.	-	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Sesuvium portulacastrum</i>	-	چندساله، علوفه‌ای، دارویی
	<i>Cannabis sativa</i>	شاهدانه	یکساله، دارویی
کادمیوم	<i>Pennisetum purpureum</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Arabidopsis halleri</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Arabis gemmifera</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Atriplex halimus</i>	سلمکی بوته‌ای	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Bidens pilosa</i>	-	یکساله، دارویی
	<i>Atriplex lentiformis</i>	سلمکی، دانه عدسی	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Salix alba</i>	بید سفید	چندساله، زینتی
	<i>Quercus robur</i>	بلوط چوب پنبه‌ای	چندساله، زینتی، دارویی
	<i>Carpobrotus rossi</i>	دم عقربی	چندساله، زینتی
	<i>Lantana camara</i>	شاهپسند درختی	چندساله، زینتی
	<i>Lonicera japonica</i>	پیچ امین‌الدوله ژاپنی	چندساله، زینتی
	<i>Sedum alfredii</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Solanum</i> sp.	بادمجان، تاجریزی	یکساله، دارویی
	<i>Thlaspi</i> sp.	-	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Sesuvium portulacastrum</i>	-	چندساله، علوفه‌ای، دارویی
	<i>Atriplex nummularia</i>	-	چندساله، علوفه‌ای

رو	<i>Arabidopsis halleri</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Arabis gemmifera</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Sedum alfredii</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Halimione portulacoides</i>	خرفه دریایی	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Armeria arenaria</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Cannabis sativa</i>	شاهدانه	یکساله، دارویی
	<i>Thlaspi sp</i>	-	یکساله، علوفه‌ای
تیتانیوم	<i>Biscutella laevigata</i>	-	چندساله، زینتی، علوفه‌ای
سرب	<i>Brassica pekinensis</i>	کلم چینی	یکساله، خوراکی
	<i>Sesbania drummondii</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Tamarix smyrnensis</i>	گز	چندساله، زینتی
	<i>Armeria arenaria</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Pelargonium hortorum</i>	شمعدانی معمولی	یکساله، زینتی
کروم	<i>Leersia hexand</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
منگنز	<i>Phytolacca acinosa</i>	سرخ‌بر، سرخاب کولی	چندساله، دارویی
	<i>Polygonum lapathifolium</i>	elf هفت بند آبی	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Schima superba</i>	-	چندساله، زینتی
آرسنیک	<i>Pteris vittata</i>	سرخس	چندساله، زینتی
مس	<i>Alternanthera bettzickiana</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Boehmeria nivea</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Sedum alfredii</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Salix alba</i>	بید سفید	چندساله، زینتی

تثبیت گیاهی^۱

در فناوری تثبیت گیاهی، فلزات سنگین از طریق اندام زیرزمینی در گیاهان ذخیره و یا از طریق ترشحات اندام زیرزمینی رسوب می‌کنند که این مسئله به کم شدن تحرک آلاینده‌ها و ممانعت از انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی منجر می‌شود. از طرفی دفع ترشحات از طریق اندام زیرزمینی به تغییر تحرک فلزات و یا حلالیت آن‌ها در برخی گیاهان منجر می‌شود.

از خصوصیات مهم گونه‌های مناسب جهت تثبیت گیاهی، ریخت‌شناسی و عمق ریشه آن‌هاست که علت این امر حداکثر تماس سیستم ریشه با ماتریکس خاک است. لازم به ذکر است که عمق ریشه در گیاهان بر اساس نوع

گونه، بافت و رطوبت خاک، وجود شرایط خشک و لایه آهکی خاک به‌میزان بسیاری تأثیرگذار است [۷۸].

تثبیت گیاهی از روش‌های کاهش سمیت فلزات از طریق غیرفعال‌سازی آن‌هاست که با استفاده از این روش فلزات در خاک تثبیت می‌شوند. در این فناوری امکان به‌حداقل رساندن جابه‌جایی فلزات از خاک به بخش‌های هوایی گیاهان، ممانعت از قرارگیری در معرض فرسایش بادی و آبی، فراهم کردن کنترل هیدرولیکی و ممانعت از انتقال عمودی آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی، محدود شدن فلزات در اندام زیرزمینی و در پی آن ممانعت از فرسایش‌پذیری خاک و پراکندگی فلزات به مناطق دیگر، عدم ارتباط مستقیم بین خاک آلوده به فلزات و حیوانات، کاهش مقدار آب در ماتریکس خاک، جلوگیری از شستشوی فلزات در

^۱ Phytostabilization

سیستم آبخوان‌ها، جداسازی مقادیر بالای فلزات از ریشه و کاهش زیست فراهمی آن‌ها می‌گردد.

گونه‌های به‌کارگرفته شده در این فناوری باید دارای مقاومت بالا به فلزات، توانایی تجمع و جذب فلزات در ریشه‌ها، زیست‌توده بالا و عمر طولانی باشند [۸۵]. از ویژگی‌های دیگر گیاهان مناسب تثبیت گیاهی می‌توان به، توانایی استقرار و نگهداری آسان، سریع‌الرشد بودن، سیستم ریشه‌ای و تاج پوشش متراکم، پتانسیل ضعیف در جابه‌جایی فلزات به بخش‌های هوایی و مقاومت به مکانی که در آن استقرار می‌یابند، اشاره کرد [۷۷].

هدف از فرآیند تثبیت گیاهی، غیرفعال‌سازی درجای فلزات سنگین است که با این عمل علاوه بر تثبیت، احتمال خطرات ناشی از فلزات در زیست‌بوم و سلامتی موجودات کاهش می‌یابد. جهت آماده‌سازی بستر کشت بذر در این فناوری، بهتر است که اراضی آلوده قبل از کشت شخم زده شوند و به‌منظور غیرفعال‌سازی فلزات، به خاک کود، آهک و

یا سایر مواد اصلاحی اضافه شوند. این مواد اصلاحی به‌منظور تسریع در تثبیت فلزات بعد از ادغام و تغییرات شیمیایی نیاز هستند [۷۷]. تثبیت گیاهی در اراضی با ماده آلی بالا و بافت سنگین خاک، مؤثرترند.

بنابراین اراضی که مانع از رشد و نمو گیاه شوند، منجر به جابه‌جایی بقایای گیاهان به مکان آلوده می‌شوند. در این راستا به‌عواملی از قبیل وجود حشرات و بیماری‌هایی که باعث کاهش طول عمر گیاهان می‌شوند، نیز باید توجه داشت [۷۷].

از مزیت‌های تثبیت گیاهی: اجرای ساده، اقتصادی بودن، زیبایی محیط و تأثیر کم بر محیط‌زیست می‌باشد که به‌علت بودجه کم و وسعت اراضی آلوده، تثبیت گیاهی به‌عنوان یک روش موقت برای کاهش خطرات آلودگی فلزات است [۷۷]. برخی از گونه‌های دارای پتانسیل تثبیت گیاهی فلزات در جدول ۶ ارائه شده است (جدول ۶).

جدول ۶- برخی از گونه‌های دارای پتانسیل تثبیت گیاهی فلزات سنگین [۸۵ و ۷۸]

فلزات سنگین	گونه‌های تثبیت‌کننده	نام فارسی	ملاحظات
کادمیوم	<i>Acanthus ilicifolius</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Atriplex halimus</i>	سلمکی بوته‌ای	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Biscutella auriculata</i>	-	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
	<i>Dactylis glomerata</i>	علف باغ	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Casdaminiopsis arenosa</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Lupinus albus</i>	ترمس، باقلا مصری	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Miscanthus sinensis x giganteus</i>	-	چندساله، زینتی، دارویی
	<i>Pteridium aquilinum</i>	سرخس عقابی	چندساله، زینتی
نیکل	<i>Quercus ilex</i>	بلوط همیشه سبز	چندساله، زینتی
	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی
	<i>Arundo donax</i>	قمیش	چندساله، زینتی
	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی
مس	<i>Biscutella auriculata</i>	-	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
	<i>Imperata condensata</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Jatropha curcas</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Lolium perenne</i>	چچم دائمی	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Pteridium aquilinum</i>	سرخس عقابی	چندساله، زینتی

آلومینیوم	<i>Jatropha curcas</i>	-	چندساله، دارویی
کبالت	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی
منگنز	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی
کروم	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی
	<i>Agrostis capillaris</i>	علف نیزار	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Arundo donax</i>	قمیش	چندساله، زینتی
	<i>Atriplex halimus</i>	سلمکی بوته‌ای	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Biscutella auriculata</i>	-	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
سرب	<i>Dactylis glomerata</i>	علف باغ	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Casdaminiopsis arenosa</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Lupinus albus</i>	ترمس، باقلا مصری	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Miscanthus sinensis x giganteus</i>	-	چندساله، زینتی، دارویی
	<i>Pistacia lentiscus</i>	مصطکی	چندساله، دارویی
	<i>Pteridium aquilinum</i>	سرخس عقابی	چندساله، زینتی
	<i>Ricinus communis</i>	کرچک	یکساله، دارویی
جیوه	<i>Arundo donax</i>	قمیش	چندساله، زینتی
	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
	<i>Casdaminiopsis arenosa</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Jatropha curcas</i>	-	چندساله، دارویی
روی	<i>Miscanthus sinensis x giganteus</i>	-	چندساله، زینتی، دارویی
	<i>Pteridium aquilinum</i>	سرخس عقابی	چندساله، زینتی
	<i>Pistacia lentiscus</i>	مصطکی	چندساله، دارویی
آرسنیک	<i>Conocarpus erectus</i>	-	چندساله، زینتی
	<i>Populus deltoides</i>	صنوبر	چندساله، زینتی
	<i>Dahlia pinnata</i>	کوکب	چندساله، زینتی
	<i>Lupinus albus</i>	ترمس، باقلا مصری	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Salix purpurea</i>	بید بنفش	چندساله، زینتی
	<i>Typha latifolia</i>	لویی، گرز	چندساله، زینتی

تبخیر گیاهی^۱

برخی از فلزات سنگین از جمله، آرسنیک، سلیوم و جیوه به صورت گاز در محیط موجود می‌باشند و امروزه محققان در پی گونه‌هایی هستند که پتانسیل جذب این فلزات از خاک، تبدیل کردن زیستی و رهاسازی آن‌ها در جو را داشته باشند که به آن تبخیرسازی نیز می‌گویند. فناوری تبخیر گیاهی از بحث برانگیزترین موضوعات در گیاه‌پالایی است. به عبارتی این روش در خصوص فلزات

خاصی است که سمی بوده و از طرفی دیگر تردیدهای بسیاری درباره بی‌خطر بودن این فلزات در جو وجود دارد [۷۷]. از مزایای این فناوری می‌توان به فرسایش کم، حداقل اختلال در مکان و عدم نیاز به دفع مواد گیاهی آلوده، اشاره کرد. از طرفی در این روش آلاینده‌ها جذب و به اشکال فرار با ضرر کمتر تبدیل می‌شوند. در واقع در این روش فلزات از طریق اندام زیرزمینی جذب و سپس به اندام‌های هوایی انتقال و در نهایت از طریق روزنه برگ‌ها به اتمسفر تبخیر

^۱ Phytovolatilization

می‌گردد [۷۸]. ذکر این نکته ضروری است که از این روش نباید در اراضی نزدیک به مراکز جمعیتی و یا اراضی که امکان رسوب‌گذاری این ترکیبات فرار را افزایش می‌دهد، استفاده کرد [۷۷].

با توجه به اینکه فلزاتی مانند سلیوم و جیوه توسط گیاهان به شکل فرار تبدیل شده و در جو رها خواهند شد، در اراضی آلوده، فناوری تبخیرسازی مفید به شمار می‌آید. عیب روش تبخیرسازی، عدم حذف کامل فلزات مذکور و جابه‌جایی آن‌ها از مکان‌های آلوده به جو می‌باشد [۶۴].

بحث تبخیر گیاهی در خصوص سلیوم به دلیل اهمیت این فلز در جهان بسیار مورد توجه پژوهشگران است و تحقیقات

بسیاری با استفاده از مهندسی ژنتیک گیاهی برای فلز مذکور انجام شده است. تبخیر گیاهی در خصوص فلزات سلیوم و جیوه راهکاری دائمی در محل است، چون شکل‌های غیرآلی این فلزات حذف شده و به احتمال بسیار گازها در محل یا در نزدیکی آن‌ها رسوب نخواهند کرد [۷۷].

برخی از گونه‌های دارای پتانسیل تبخیر گیاهی فلزات در جدول ۷ ارائه شده است (جدول ۷).

جدول ۷- برخی از گونه‌های دارای پتانسیل تبخیر گیاهی فلزات سنگین [۸۵ و ۷۸]

فلزات سنگین	گونه‌های تبخیر گیاهی	نام فارسی	ملاحظات
آرسنیک	<i>Pteris vittata</i>	سرخس	چندساله، زینتی
	<i>Arundo donax</i>	قمیش	چندساله، زینتی
	Transgenic <i>Arabidopsis thaliana</i>	گوش موش	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Oryza sativa</i>	برنج	یکساله، دارویی، خوراکی
	<i>Dittrichia viscosa</i>	کک زرد	چندساله، دارویی
جیوه	<i>Zea mays</i>	ذرت	یکساله، دارویی، علوفه‌ای
	Transgenic <i>Nicotiana tabacum</i>	توتون	یکساله، دارویی
	<i>Halimolobos portulacoides</i>	-	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Arabidopsis thaliana</i>	گوش موش	یکساله، علوفه‌ای
	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
سلیوم	<i>Brassica juncea</i>	خردل هندی	یکساله، دارویی
	<i>Oryza sativa</i>	برنج	یکساله، دارویی، خوراکی
	<i>Brassica oleracea</i>	گل کلم	یکساله، دارویی، خوراکی
	<i>Daucus carota</i>	هویج	دوساله، خوراکی، دارویی
	<i>Hordeum vulgare</i>	جو	یکساله، دارویی، علوفه‌ای
	<i>Medicago sativa</i>	یونجه	چندساله، دارویی، علوفه‌ای
	<i>Lycopersicon esculentum</i>	گوچه فرنگی	یکساله، دارویی، خوراکی
	<i>Cucumis sativus</i>	خیار	یکساله، خوراکی
	<i>Gossypium hirsutum</i>	پنبه	یکساله، دارویی
	<i>Solanum melongena</i>	بادمجان	یکساله، دارویی، خوراکی
	<i>Zea mays</i>	ذرت	یکساله، علوفه‌ای، دارویی
	<i>Populus tremula x alba</i>	صنوبر	چندساله، زینتی
	<i>Stanleya pinnata</i>	-	چندساله، دارویی
	<i>Agrostis tenuis</i>	چمن	چندساله، علوفه‌ای
	<i>Hordeum vulgare</i>	جو	یکساله، علوفه‌ای، دارویی

فیلتراسیون^۱ گیاهی

فناوری فیلتراسیون ریشه به منظور از بین بردن آلاینده‌های موجود در آب و رسوب از طریق ریشه‌های سطحی و یا جذب آلاینده‌های محلول در اندام زیرزمینی است.

در این روش طول ریشه‌ها و سیستم فیبری نقش مهمی را ایفا می‌کنند و گیاهانی که پتانسیل جذب میزان بالای آب از خاک را دارند، برای این هدف قابل کاربرد هستند [۷۸].

در این روش گونه‌های گیاهی به شکل هیدروپونیک و در آب‌های آلوده به فلزاتی کشت می‌شوند که جذب فلزات از طریق اندام‌های زیرزمینی و هوایی گیاه صورت می‌گیرد. تغییر در اسیدیته و ترشحات اندام زیرزمینی باعث رسوب بر سطح ریشه‌ها می‌گردد که با تجمع این آلاینده‌ها، ریشه گونه‌ها و یا خود گیاه به صورت کامل خارج می‌شوند.

پژوهشگران معتقدند که در فناوری فیلتراسیون ریشه، فلزات در ریشه‌ها تجمع می‌یابند و اگر به اندام‌های هوایی جابه‌جا شوند، کارایی این روش کاهش خواهد یافت. اما برخی بر این باورند که کاربرد گونه‌هایی که پتانسیل جذب و جابه‌جایی فلزات در گیاهان را دارند، در تأثیرگذاری این روش مؤثرتر هستند. بنابراین گزینش گیاه مناسب در موفقیت این روش در راستای پالایش آب مهم است [۷۷].

از خصوصیات گیاهان مناسب در فیلتراسیون ریشه، می‌توان به زیست‌توده و سطح ریشه بالا، پتانسیل انباشت میزان بالای فلزات، انتقال آسان، هزینه نگهداری پایین و ایجاد زباله ثانویه کم اشاره کرد، که در این راستا گونه‌های سنبل آبی^۲، سنبل^۳ و علف اردکی^۴ جهت این روش مناسب هستند.

برخی دریافتند که به دلیل میزان بالای آب در گونه‌های آبزی، خشک و کمپوست کردن و سوزاندن آن‌ها با معضلاتی همراه خواهد شد. بنابراین استفاده از گیاهان خشکی‌زی به دلیل سیستم ریشه گسترده و فیبری، جهت تجمع فلزات مناسب هستند، که در این راستا گیاهان آفتابگردان^۵ و خردل هندی^۶ جهت کاربرد در فیلتراسیون ریشه مناسب می‌باشند [۷۷].

فیلتراسیون ریشه، روشی اقتصادی به منظور تصفیه آب‌های سطحی و زیرزمینی، امکان کاربرد برای بیشتر فلزات، پتانسیل تصفیه با حجم بالا، نیاز کم به مواد شیمیایی، کاهش میزان زباله‌های ثانویه و امکان بازیافت آن‌ها را امکان‌پذیر می‌کند [۷۷]. برخی از گونه‌های دارای پتانسیل فیلتراسیون ریشه در جدول ۸ ارائه شده است (جدول ۸).

جدول ۸- برخی از گونه‌های دارای پتانسیل فیلتراسیون ریشه گیاهان [۷۸]

فلزات سنگین	گونه‌های فیلتراسیون ریشه گیاهی	نام فارسی
کروم	<i>Genipa americana</i>	-
آرسنیک	<i>Salvinia molesta</i>	سرخس آبی بزرگ جثه
روی	<i>Salvinia molesta</i>	سرخس آبی بزرگ جثه
اورانیوم	<i>Phragmites australis</i>	سرخس آبی بزرگ جثه
		نی

مرور منابع

در جداول ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی برخی گیاهان در اطراف معادن و کارخانجات در کشورهای

مختلف جهان و شهرهای مختلف ایران ارائه شده است که در آن‌ها پتانسیل گیاه‌پالایی گونه‌های درختی، درختچه‌ای، بوته‌ای و ... به منظور میزان جذب فلزات سنگین مختلف مورد تحقیق قرار گرفتند (جدول ۹ و ۱۰).

⁴ Duckweed⁵ Sunflower⁶ Indian mustard¹ filtration² Water hyacinth³ Pennwort

جدول ۹- بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی برخی گیاهان در اطراف معادن و کارخانجات (کشورهای مختلف جهان)

کشور	فلزات سنگین	گونه‌ها	نتایج
اسپانیا	آرسنیک، نیکل، کبالت، وانادیوم، منگنز، مس، مولیبدین و کادمیوم	<i>Artemisia herba-alba</i> <i>Salsola oppositifolia</i> <i>Stipa tenacissima</i> <i>Piptatherum miliaceum</i>	<i>S. oppositifolia</i> دارای پتانسیل تثبیت گیاهی و <i>P. Miliaceum</i> دارای پتانسیل استخراج گیاهی است [۲۰].
چین	آرسنیک، نیکل، کروم، منگنز، مس، سرب، کادمیوم و روی	<i>Polygonum aviculare</i> <i>Salsola ruthenica</i> <i>Halogeton arachnoideus</i> <i>Atriplex patens</i> <i>Limonium sinense</i> <i>Ammophila breviligulata</i> <i>Phragmites australis</i> <i>Klasea centauroides</i> <i>Sphaerophysa salsula</i>	<i>A. breviligulata</i> مناسب جهت پاک‌سازی اراضی است و بیش‌ترین میزان تجمع نیکل، آرسنیک، کروم و مس در اندام‌های هوایی و بیش‌ترین میزان سرب، روی و منگنز در ریشه‌ها اندازه‌گیری شدند [۱۰۲].
آفریقای جنوبی	نیکل، کبالت، منگنز، کادمیوم و روی	<i>Aloe burgersfortensis</i> <i>Aloe castanea</i>	<i>A. castanea</i> دارای پتانسیل استخراج گیاهی است [۶۵].
عربستان	نیکل، کبالت، کروم، مس، سرب، آهن، کادمیوم و منگنز	<i>Chenopodium album</i> <i>Sisymbrium irio</i> <i>Phragmites australis</i> <i>Lactuca serriola</i> <i>Malva parviflora</i> <i>Rumex vesicarius</i>	گونه‌های مذکور توانایی بالایی در تجمع آهن و منگنز دارند و مناسب تثبیت گیاهی هستند [۱۱].
مراکش	سرب	<i>Atriplex nummularia</i>	تجمع حداکثر و حداقل سرب در گونه در نزدیک‌ترین نقطه به معدن و منطقه شاهد بود [۶۷].
ایران	نیکل، منگنز، سرب، گوگرد، مس و مولیبدین	<i>Artemisia sp</i> <i>Launaea acanthodes</i> <i>Stipa sp</i> <i>Cousinia congesta</i>	<i>L. acanthodes</i> و <i>C. congesta</i> دارای پتانسیل تثبیت گیاهی و <i>A. sp</i> دارای پتانسیل استخراج گیاهی می‌باشند [۱۰۵].
مراکش	مس، روی و سرب	<i>Atriplex nummularia</i>	<i>A. nummularia</i> دارای پتانسیل تثبیت گیاهی است [۵۸].
مراکش	آرسنیک، کبالت، کروم، نیکل، مس، کادمیوم، روی و سرب	<i>Scolymus hispanicus</i> <i>Festuca ovina</i> <i>Cleome brachycarpa</i> <i>Peganum harmata</i>	گونه‌های مذکور دارای فاکتور تجمع زیستی بزرگتر از یک و فاکتور انتقال کمتر از یک بودند [۲۹].
اندونزی	سرب و کروم	<i>Avicennia marina</i>	میزان تجمع سرب بیش‌از کروم و گونه دارای توانایی تثبیت سرب و استخراج کروم است [۱۹].
مراکش	روی، کادمیوم، مس و سرب	<i>Lolium multiflorum</i>	این گونه دارای توانایی تحمل بستر آلوده و انباشت بیش‌از حد فلزات و انتقال آن‌ها را دارد [۳۰].
غنا	آرسنیک، جیوه، سرب، کادمیوم و روی	<i>Jatropha curcas</i> <i>Vigna unguiculata</i> <i>Manihot esculenta</i>	بیش‌ترین تجمع فلزات مذکور در ریشه‌های گونه‌ها و به‌ترتیب ۸۰، ۵۰ و ۲۷ درصد برآورد شد [۵۳].

عربستان	کروم، کبالت، نیکل، سرب، روی، کادمیوم و باریم	<i>Ziziphus spinachristi</i> <i>Cordia sebestena</i> <i>Azadirachta indica</i> <i>Tecoma stans</i> <i>Bougainvillea spectabilis</i> <i>Conocarpus lancifolius</i> <i>Ixora coccinea</i> <i>Senna sulfurea</i>	در بین گونه‌های مذکور ریشه‌های <i>C. lancifolius</i> به‌عنوان انباشت‌کننده قوی فلزات کبالت، نیکل و روی معرفی شدند [۷].
ایران	آرسنیک، کروم، کبالت و نیکل	<i>Achillea vermicularis</i> <i>Trifolium fragiferum</i>	گونه‌های مذکور توانایی بیشتری در تجمع فلزات هدف در ریشه‌ها دارند و مناسب تثبیت گیاهی در اطراف معادن هستند [۱۰].
اسپانیا	مس، منگنز، روی، سرب و آهن	<i>Dittrichia viscosa</i> <i>Cistus salviifolius</i> <i>Euphorbia pithyusa subsp</i>	تجمع غالب فلزات مذکور در ریشه‌ها است و گونه‌ها دارای پتانسیل تثبیت گیاهی می‌باشند [۴۸].
عربستان	آرسنیک، نیکل و مس	<i>Amaranthus spinosus</i>	گونه دارای توانایی بالایی در انتقال فلزات به اندام‌های هوایی و بیش‌اندوز عناصر مذکور است [۱۰۳].
ایران	کادمیوم، سرب، روی، مولیبدین و اسکاندیم	<i>Alhagi maurorum</i> <i>Stachys inflata</i> <i>Cirsium vulgare</i>	<i>S. inflata</i> و <i>A. maurorum</i> پتانسیل خوبی در تجمع کادمیوم، مولیبدین و اسکاندیم و گونه <i>C. vulgare</i> پتانسیل تجمع فلزات روی و سرب دارند [۴۴].
چین	آرسنیک و اورانیوم	<i>Rumex nepalensis</i> <i>Polygonum viviparum</i>	<i>P. viviparum</i> قابلیت تجمع آرسنیک و اورانیوم با فاکتور انتقال و تجمع زیستی بزرگتر از یک و <i>R. nepalensis</i> توانایی تجمع مقادیر بالایی از اورانیوم با فاکتور تجمع زیستی و انتقال بزرگتر از یک است [۵۹].
مکزیک	مس، سرب، آرسنیک، نیکل، آهن، کروم، کادمیوم، منگنز و آلومینیوم	<i>Rumex nepalensis</i>	<i>R. nepalensis</i> دارای پتانسیل استخراج گیاهی است و بیش‌ترین میزان انتقال مربوط به فلزات آلومینیوم و سرب بود [۴۱].
ترکیه	کادمیوم	<i>Carduus nutans</i> <i>Phlomis fruticosa</i>	تجمع کادمیوم در ریشه بیشتر از ساقه بود و دو گونه مذکور تجمع‌کننده کادمیوم بودند [۸۱].
زیمبawe	سرب، کادمیوم و آرسنیک	<i>Brassica juncea</i> <i>Chicken droppings</i>	گونه‌ها مناسب گیاه‌پالایی کادمیوم و آرسنیک هستند و بیش‌ترین تجمع آرسنیک و کادمیوم به‌ترتیب در ریشه، ساقه و برگ‌های در <i>B. juncea</i> بودند [۶۳].
اسپانیا	سرب و کادمیوم	<i>Atriplex halimus</i>	گونه مذکور مناسب تثبیت گیاهی فلزات هدف در گیاه‌پالایی اراضی آلوده است [۲].
کلمبیا	آرسنیک، نیکل، کروم، سرب و کادمیوم	<i>Baccharis latifolia</i>	بیش‌ترین و کمترین تجمع فلزات در برگ‌ها، ساقه و ریشه آرسنیک و کبالت بود و گونه

مناسب گیاه پالایی فلزات هدف در مناطق نیمه خشک می باشد [۳۴].	<i>Glebionis coronaria</i> <i>Chenopodium ambrosioides</i> <i>Amaranthus</i> sp <i>Anagallis bavaria</i> <i>Malva parviflora</i> <i>Lactuca serriola</i>	سرب، مس، کروم و نیکل	مصر
بالاترین میزان سرب و مس در <i>G. coronaria</i> و سایر گونه ها بالاترین میزان کروم و نیکل دارند و گونه ها مناسب تثبیت گیاهی اراضی صنعتی هستند [۱].	<i>Cistus salviifolius</i> <i>Echium amoenum</i> <i>Scariola orientalis</i> <i>Scolymus hispanicus</i> <i>Achillea millefolium</i> <i>Stipa hohenackeriana</i> <i>Hulthemia persica</i> <i>Taeniatherum crinitum</i> <i>Astragalus effesus</i> <i>Centaurea virgata</i> <i>Stachys lavandulifolia</i> <i>Tragopogon collinus</i> <i>Descurainia sophia</i>	نیکل	ایران
شناسایی <i>C. salviifolius</i> و <i>E. amoenum</i> به عنوان بیش اندوز فلز نیکل و شناسایی سایر گونه ها به عنوان تجمع کننده خوب نیکل بودند [۷۱].			
این گونه مقاومت بالایی نسبت به فلزات مذکور دارد و پتانسیل گیاه پالایی جهت حذف فلزات مذکور امکان پذیر است [۱۴].	<i>Lolium multiflorum</i>	منیزیم، مس، سرب و روی	مکزیک
بیشترین میزان آرسنیک و نیکل در <i>S. kali</i> و <i>C. monspeliensis</i> و کمترین میزان آرسنیک و نیکل در گونه های <i>P. lentiscus</i> و <i>Z. fabago</i> ارزیابی شد [۸۳].	<i>Salsola kali</i> <i>Zygophyllum fabago</i> <i>Limonium cossonianum</i> <i>Tamarix canariensis</i> <i>Atriplex halimus</i> <i>Dittrichia viscosa</i> <i>Helichrysum decumbens</i> <i>Pistacia lentiscus</i> <i>Cistus monspeliensis</i>	آرسنیک و نیکل	اسپانیا
بیشترین تجمع فلزات در ریشه گونه بود که بیشترین میزان تجمع مربوط به فلز وانادیوم است [۳۹].	<i>Phragmitis australis</i>	کادمیوم، سرب و وانادیوم	ایران
بیشترین میزان کروم و کبالت در ریشه گیاهان مذکور بود که بیشترین میزان فلزات در ریشه گونه <i>H. annuus</i> و کمترین میزان در ریشه <i>C. Pepo</i> برآورد شد [۶۰].	<i>Panicum antidotal</i> <i>Helianthus annuus</i> <i>Pennisetum purpureum</i> <i>Cucurbita pepo</i> <i>Gossypium hirsutum</i>	کروم و کبالت	مصر
بیشترین تجمع سرب در ریشه دو گونه بود و عدم تفاوت غلظت سرب در ساقه گونه ها در داخل و خارج معدن مشاهده شد [۶۱].	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i>	سرب	ایران
گونه های مورد بررسی به عنوان بیش اندوز جیوه نیستند اما سه گونه <i>L. crustacea</i> ، <i>P. conjugatum</i> و <i>C. kyllingia</i> مناسب فرآیند گیاه استخراجی جیوه می باشند [۷۵].	<i>Lindernia crustacea</i> <i>Paspalum conjugatum</i> <i>Zingiber purpurium roxb</i> <i>Caladium bicolor</i> <i>Cyperus kyllingia endl</i>	جیوه	اندونزی
گونه های <i>A. gossypinus</i> و <i>A. brachystachyum</i>	<i>Astragalus gossypinus</i> <i>Acantholimon brachystachyum</i>	آرسنیک	ایران

<i>Stipa barbata</i> <i>Ephedra major</i> <i>Bromus tomentellus</i> <i>Elymus sp</i> <i>Phragmitis australis</i> <i>Juncus inflexus</i>	<i>S. barbata</i> و <i>E. Major</i> جهت استخراج گیاهی و گونه‌های <i>B. tomentellus</i> و <i>E. sp</i> و <i>P. australis</i> جهت تثبیت گیاهی مناسب هستند [۱۰۱].
<i>Lepidium bipinnatifidum</i> <i>Sonchus oleraceus</i> <i>Plantago orbignyanan</i> <i>Baccharis latifolia</i>	آرسنیک، آهن، منگنز، تیتانیوم، سرب و روی
<i>Flaveria pubescens</i> <i>Tecoma stans</i> <i>Prosopis Sp</i> <i>Casuarina Sp</i> <i>Maurandia antirrhiniflora</i> <i>Cenchrus ciliaris</i> <i>Opuntia lasiacantha</i> <i>Nicotina glauca</i>	آرسنیک، سرب، مس، روی و کادمیوم
<i>Limonium carthaginens</i> <i>Arthrocnemum macrostachyum</i> <i>Dittrichia viscosa</i> <i>Glaucium flavum</i> <i>Zygophyllum fabago</i>	آرسنیک، آهن و منگنز
<i>Plectranthus rugosus</i> <i>Rumex hastatus</i> <i>Fimbristylis dichotoma</i> <i>Olea ferruginea</i> <i>Heteropogon conturtus</i> <i>Myrsine africana</i> <i>Indigofera gerardiana</i> <i>Daphne mucronata</i> <i>Debregeasia salicifolia</i> <i>Berberis lycium</i>	نیکل، کبالت، کروم، سرب، روی، مس و کادمیوم
<i>Viguiera dentata</i> <i>Flaveria angustifolia</i> <i>Flaveria trinervia</i> <i>Parthenium bipinnatifidum</i>	آرسنیک، مس، سرب و روی
<i>Acia raddiena</i> <i>Aerva javanica</i>	آرسنیک، جیوه، کادمیوم و سرب

جدول ۱۰- بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی برخی گیاهان در اطراف معادن و کارخانجات (شهرهای مختلف ایران)

استان	فلزات سنگین	گونه‌ها	نتایج
خراسان	آرسنیک، نیکل، کروم،	<i>Haloxylon aphyllum</i>	هر دو گونه دارای فاکتور انتقال بزرگتر از یک و فاکتور تجمع
شمالی- جاجرم	کبالت و وانادیوم	<i>Seidlitzia rosmarinus</i>	زیستی کوچکتر از یک و مناسب استخراج گیاهی هستند [۵۱].

گلستان- آق قلا	آرسنیک، نیکل، کروم، کبالت و وانادیوم	<i>Lycium depressum</i>	توانایی بیشتر گونه در تجمع نیکل و فاکتور انتقال با فاصله از کارخانه کاهش یافت [۴۳].
خراسان شمالی- جاجرم	آرسنیک، نیکل، کروم، کبالت و وانادیوم	<i>Artemisia sieberi</i> <i>Zygophyllum</i> <i>atriplicoides</i>	<i>A. sieberi</i> دارای پتانسیل استخراج و <i>Z. atriplicoides</i> دارای پتانسیل تثبیت گیاهی است و میزان جذب نیکل و کبالت بیشتر از سایر فلزات بود [۵۰].
خراسان شمالی- جاجرم	آرسنیک، نیکل، کروم، کبالت و وانادیوم	<i>Lycium depressum</i> <i>Aelenia subaphylla</i> <i>Tamarix ramosissima</i>	<i>L. depressum</i> و <i>A. subaphylla</i> دارای پتانسیل استخراج گیاهی و <i>T. ramosissima</i> دارای پتانسیل تثبیت گیاهی است و بیشترین میزان تجمع فلزات مذکور (به استثنا وانادیوم (در گونه <i>T. ramosissima</i> و بیشترین میزان تجمع وانادیوم در گونه <i>A. subaphylla</i> ارزیابی شد [۴۲].
یاسوج	نیکل، کادمیوم و سرب	<i>Gundelia tournefortii</i>	فاکتور انتقال فلزات بزرگتر از یک بود و گونه دارای پتانسیل استخراج گیاهی است [۴۵].
تهران- شهرری	مس و منگنز	<i>Heliotropium europaeum</i> <i>ritro Echinops</i> <i>Bromus tectorum</i> <i>propinquus Astragalus</i> <i>Alhagi camelorum</i> <i>absinthium Artemisia</i> <i>millefolium Achillea</i> <i>Prosopis farcta</i> <i>Lactuca orientalis</i> <i>Cousinia</i> <i>gallica Tamarix</i> <i>Aristida plumosa</i> <i>Salsola rigida</i> <i>Peganum harmala</i> <i>Stipa barbata</i>	غلظت مس در اندامهای هوایی گیاهان هدف در دو جهت باد غالب و خلاف آن بیشتر از اندام زیرزمینی بود و فاکتور انتقال آن‌ها بزرگتر از یک شد. لذا گونه‌های مذکور به عنوان گونه‌های فراانباشت‌کننده فلز مس معرفی شدند [۹۶].
همدان- نهاوند	نیکل، منگنز، کادمیوم و روی	<i>Robinia pseudoacacia</i> <i>nigra Populus</i> <i>Elaeagnus angustifolia</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Thuja orientalis</i>	تجمع بیشتری از فلزات در گونه <i>E. angustifolia</i> بود که مناسب کنترل آلودگی در این منطقه و مناطق مشابه آلوده به چند فلز می‌باشد [۱۰۵].
قزوین	سرب و نیکل	<i>Artemisia sieberi</i>	فاکتور انتقال هردو فلز کمتر از یک و فاکتور تجمع زیستی سرب بزرگتر از یک بود و گونه مناسب تثبیت گیاهی سرب است [۵۲].
کرمان	نیکل، کروم، مس، روی و سرب	<i>Artemisia sp</i>	بیشترین و کمترین میزان تجمع فلزات در ریشه و اندامهای هوایی این گونه به ترتیب مس و روی بود و بیشترین میزان تجمع زیستی مربوط به فلز مس بود [۱۷].
همدان	سرب و روی	<i>Acantholimon olivieri</i> <i>Astragalus</i> <i>glaucacanthus</i> <i>Ebenus stellata</i> <i>Scariola orientalis</i> <i>Stipa barbata</i>	بالاترین مقدار سرب و روی در اندامهای هوایی گونه <i>A.</i> <i>glaucacanthus</i> و بالاترین مقدار سرب و روی در ریشه <i>S. orientalis</i> بود و فاکتور انتقال سرب و روی در گونه‌ها بالاتر از یک است [۵۴].
کرمان	آرسنیک، نیکل، کروم، سرب، مولیبدین، مس،	<i>Astragalus sp</i>	بیشترین میزان آهن و منیزیم در اندامهای هوایی بود و میانگین آرسنیک و کروم در ریشه بیشتر از ساقه و میانگین

منگنز، آلومینیوم، روی و گوگرد		غلظت نیکل در ساقه بیشتر از ریشه بود. فاکتور انتقال نیکل، منیزیم، آهن، روی و سرب نیز بالاتر از یک شدند [۱۱۴].
تهران-فیروزکوه	کادمیوم، سرب، مس، روی و کروم	<i>Acantholimon olivieri</i> <i>Astragalus sp</i>
مازندران-کیاسر	سرب، مس و روی	<i>Asteragal</i> <i>Artemisia</i> <i>Convolvulus</i>
یزد	مس، روی و سرب	<i>Artemisia herbaalba</i> <i>Artemisia sieberi</i>
اهواز	روی	<i>Malva parviflora</i>
سمنان	نیکل، سرب، منگنز، روی و مس	<i>Artemisia sieberi</i> <i>Peganum harmala</i> <i>Ephedra strybilacea</i> <i>Zygophyllum eurypterum</i> <i>Atraphaxis espinosa</i>
کرمان	مس، آهن، روی و سرب	<i>Artemisia herbaalba</i> <i>Artemisia sieberi</i> <i>Amygdalus horrid</i> <i>Zataria multiflora</i> <i>Glycyrrhiza glabra</i> <i>Ziziphora persica</i> <i>Hyssopus angustifolius</i> <i>Salsola kali</i> <i>Gundelia tournefortii</i> <i>Alhagi maurorum</i> <i>Astragalus sp</i>
زنجان	سرب و روی	<i>millefolium Achillea</i> <i>Scariola orientalis</i> <i>Tragopogon collinus</i> <i>Taeniatherum crinitum</i> <i>Hulthemia persica</i> <i>Stipa hohenackeriana</i> <i>Astragalus effesus</i> <i>Brassica juncea</i> <i>Descurainia sophia</i> <i>Centaurea virgata</i> <i>Stachys lavandulifolia</i> <i>Echium amoenum</i> <i>Gundelia tournefortii</i>
اصفهان	سرب، روی و کادمیوم	<i>Thlaspi caerulescens</i> <i>Zea mays</i> <i>Eruca sativa</i> <i>Brassica napus</i> <i>Solanum nigrum</i>

	<i>Matthiola chenopodiifolia Alyssum sp</i>		
تهران-رباط کریم	سرب، مس و منگنز	<i>Ephedra procera</i>	بیشترین میزان سرب در ساقه و ریشه، مس در ریشه بیشتر از ساقه بود. اما تجمع منگنز در این گونه مشاهده نشد [۱۰۷].
یزد	مس، روی، سرب و منگنز	<i>Artemisia sp</i>	میانگین غلظت منگنز بیش از سایر عناصر بود و غلظت فلزات (به جز سرب) در محدوده طبیعی قرار داشتند [۲۵].
کرمان	آرسنیک، کبالت، کروم، آلومینیوم، مس، سرب، آهن، مولیبدین، سلنیوم، نقره، کادمیوم و فسفر	<i>Astragalus Artemisia Acanthophyllum</i>	بیشترین و کمترین فاکتور انتقال در سه جنس در کادمیوم و کروم بود و غلظت آرسنیک، مس و سرب در گیاهان در نزدیکی معدن بالاتر از حد استاندارد اندازه گیری شد [۷۴].
اصفهان	کادمیوم	<i>Tucrium polium Alyssum bracteatum Acantholimon sp Hypecum pendulum Stachys inflata Ebenus stellata Astragalus glaucacanthus Bromus tectorum Stipa barbata Scariola orientalis Artemisia sieberi</i>	بیشترین غلظت کادمیوم در اندام هوایی و بالاترین ضریب انتقال از ریشه به اندام هوایی به ترتیب در گونه های <i>A. sp</i> <i>E. stellata</i> و <i>A. glaucacanthus</i> که به دلیل زیست توده و تجمع در اندام هوایی مناسب گیاه پالایی هستند [۸۲].
همدان	نیکل	<i>Euphorbia cheiradenia Euphorbia macroclada Cardaria droba Centaurea virgata Scariola orientalis Gundelia tournefortii</i>	بیشترین و کمترین میزان تجمع نیکل به ترتیب در گونه های <i>E. macroclada</i> و <i>C. virgata</i> بود [۱۵].

گونه های گیاهی مناسب گیاه پالایی معادن و فراانباشت کننده ها

به دلیل کمبود و یا عدم وجود پوشش گیاهی مناسب در مناطق خشک و نیمه خشک، این مناطق به عنوان منبع آلودگی محیطی محسوب می شوند که ناشی از فرسایش بادی و آبی موجود در این مناطق است. بنابراین در راستای کاهش خطرات ناشی از فعالیت معادن در این مناطق، فناوری گیاه پالایی به عنوان روشی دوام پذیر، مقرون به صرفه، سازگار با محیط زیست و مناسب جهت بهبود شرایط زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک در مقایسه با سایر روش ها، قابل اجراست [۵۸].

از طرف دیگر خاک در مناطق مذکور به دلیل انباشت فلزات، میزان پایین مواد آلی و ظرفیت پایین نگهداری آب در خاک، شرایط مناسبی جهت رشد گیاهان نداشته که این مسائل به مرگ گیاهان منجر می گردد. لذا انتخاب گیاهان

مناسب و استقرار آنها در این مناطق در راستای دستیابی به اهداف این روش بسیار مهم و ضروری است و در این بین گیاهانی که سازگار با شرایط خشک و مقاوم به آلودگی باشند، در اولویت قرار دارند [۵۸]. بنابراین گزینش گیاه مناسب دارای مقاومت بالا در برابر تنش هایی از جمله فلزات سنگین در راستای موفقیت طرح های مدیریت استقرار گیاهان جهت احیای اراضی تخریب شده، امری ضروری است. لذا گیاهانی که پتانسیل سازگاری با آلودگی محیطی را دارند، مناسب هستند.

از طرفی با توجه به اینکه اراضی آلوده اصولاً دارای تنوع زیستی کمی هستند و به دلیل ورود عوامل غیرزیستی امکان ایجاد خطر برای طرح های طولانی مدت وجود دارد، لذا باید از چند گیاه با عملکرد زیستی مختلف در اطراف معادن استفاده کرد [۸۳].

با توجه به اینکه فعالیت معادن در گذر زمان باعث ایجاد مشکلات زیستی بسیاری می‌شوند، لذا به‌کارگیری گیاهان بومی در مناطق مذکور نقش مؤثری در تثبیت آلودگی حاصل از صنایع از جمله معادن، ممانعت از فرسایش خاک و تجمع عناصر کمیاب در آن‌ها را دارد [۱۳]. بنابراین طبق پژوهش‌های صورت گرفته نیاز به شناخت گیاهانی است که دارای پتانسیل سازش و مقاومت در برابر شرایط نامساعد و اثر مؤثر در بالا بردن پتانسیل پالایش اراضی آلوده به فلزات سنگین را داشته باشند. لذا تحقیق روی گیاهان گوناگون و اندازه‌گیری مقدار تجمع فلزات در آن‌ها در اطراف معادن به شناخت گیاهان تجمع‌کننده فلزات کمک بسیاری خواهد کرد.

از طرف دیگر طی سال‌های اخیر استفاده از گیاهان مختلف به‌عنوان پوششی مناسب در راستای پالایش آلودگی فلزات مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه گیاه‌پالایی به‌دلیل اقتصادی بودن، مقاومت و پایداری در اصلاح اراضی آلوده به فلزات واقع شده است. بنابراین با توجه به اینکه ایران از مراکز غنی ذخایر معدنی محسوب می‌گردد و به‌دلیل فعالیت معادن، خاک این اراضی به‌علت تجمع مواد حاصل از این فعالیت‌ها، آلوده به فلزات بوده لذا کاربرد گیاهان بومی به‌عنوان راه‌حلی جهت حل معضل محیط‌زیستی ناشی از فعالیت معادن پیشنهاد می‌گردد [۴۴].

در این بین برخی گونه‌ها توانایی رویش و تجمع فلزات در اراضی آلوده را داشته و به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها از این گونه‌ها در پالایش اراضی آلوده استفاده می‌شود. گونه‌های گیاهی در اصل سه واکنش در برابر فلزات سنگین از خود نشان می‌دهند که گروه اول به‌عنوان گیاهان اجتناب‌کننده^۱ شناخته شدند که این گیاهان حتی در غلظت‌های بالای فلزات سنگین در خاک، میزان تجمع آن‌ها در بخش‌های هوایی پایین است، گروه دوم گیاهان شاخص^۲ می‌باشند که میزان غلظت فلزات در خاک با میزان آن در بخش‌های هوایی گیاه یکسان است و گروه سوم گیاهان تجمع‌کننده^۳ هستند که میزان غلظت فلزات در بخش‌های هوایی گیاه بیشتر از خاک است [۱۱۱].

در بین گیاهان مناسب گیاه‌پالایی، گونه‌های ویژه‌ای در محیط وجود دارند که به آن‌ها گونه‌های فرآینبشت‌کننده^۴ اطلاق می‌گردد که بالغ بر ۵۰۰ گونه و اغلب از خانواده‌های فرفیون^۵، شب‌بو^۶، نعنائیان^۷، گندمیان^۸، جگنیان^۹، تاج خروس^{۱۰}، باقلاییان^{۱۱} و کاسنی‌ها^{۱۲} می‌باشند. در واقع این گیاهان پتانسیل تجمع میزان بیشتری از فلزات مختلف در اندام‌های هوایی، توانایی رویش در خاک‌های آلوده و مقابله در برابر سمیت فلزات از طریق سم‌زدایی و یا تجمع از طریق بافت‌ها را دارد [۷۸].

گیاهان فرآینبشت‌کننده، توانایی ذاتی در تجمع فلزات به میزان حداقل یک درصد وزن زیست‌توده خشک و به عبارتی ۱۰۰ برابر گیاهان عادی را دارند [۶۴]. گونه‌های مذکور به‌منظور رشد در محیطی با مقادیر بالای فلزات با استفاده از مسیرهای بیوشیمیایی گوناگون، غلظت فلزات در سیتوپلاسم را در حد پایین نگه‌داشته تا مانع از اثرات سمیت فلزات در سیتوپلاسم شوند. این گونه‌ها پتانسیل بالایی در تجمع فلزات و انتقال آن‌ها از ریشه به اندام‌های هوایی، بدون ظهور علائم سمیت را دارند که این مسئله یکی از مزیت‌های اصلی در فناوری گیاه‌پالایی است [۷۸].

اگر چه این گونه‌ها قادر به تجمع مقادیر بالایی از فلزات هستند، اما اغلب دارای زیست‌توده و رشد پایینی می‌باشند. بنابراین پالایش اراضی آلوده به فلزات زمان‌بر است، البته به‌منظور افزایش زیست‌توده گونه‌های گیاهی می‌توان از موادی از قبیل اسیدهای آلی استفاده کرد [۶۴]. بنابراین استفاده از گیاهان فرآینبشت‌کننده فلزات در راستای پاک‌سازی اراضی آلوده به فلزات، بسیار اقتصادی و مؤثر است. به‌خصوص کاربرد گیاهان فرآینبشت بومی، به‌علت مقاومت و زنده‌مانی بیشتر و امکان رشد و نمو و پالایش اراضی آلوده مؤثرتر هستند.

بنابراین با شناسایی گونه‌های بومی فرآینبشت هر منطقه کارایی گیاه‌پالایی افزایش خواهد یافت که دلیل آن سازگاری با شرایط منطقه است. لذا شرایط خاک و اقلیم منطقه روی آن‌ها تأثیر بسزایی دارد. به‌گونه‌ای که در اراضی مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل شوری، کربنات کلسیم

^۸ Poaceae

^۹ Cyperaceae

^{۱۰} Amaranthaceae

^{۱۱} Fabaceae

^{۱۲} Asteraceae

^۱ Excluder

^۲ Indicator

^۳ Accumulator

^۴ Hyperaccumulation

^۵ Euphorbiaceae

^۶ Brassicaceae

^۷ Lamiaceae

و اسیدپتیه بالا اغلب با مشکلاتی مواجه هستند، که باید این سنگین در در جداول ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است (جدول ۱۱ مسائل در نظر گرفته شود [۱۱]. آستانه تجمع فلزات و ۱۲).

جدول ۱۱- آستانه تجمع فلزات سنگین در گیاهان فرانباشت کننده [۷۸ و ۸۵]

فلزات سنگین	آستانه تجمع فلزات (ppm)	فلزات سنگین	آستانه تجمع فلزات (ppm)
آرسنیک	۱۰۰۰	تیتانیوم	۱۰۰۰
جیوه	۱۰۰۰	نیکل	۱۰۰۰
سلنیوم	۱۰۰۰	کروم	۱۰۰۰
کادمیوم	۱۰۰	سرب	۱۰۰۰
مس	۱۰۰۰	روی	۱۰۰۰۰
کبالت	۱۰۰۰	منگنز	۱۰۰۰۰

جدول ۱۲- برخی از گونه‌های فرانباشت کننده فلزات سنگین [۹]

فلزات سنگین	گونه فرانباشت کننده	نام فارسی
نیکل	<i>Alyssum bertolonii</i>	قدومه
	<i>Alyssum caricum</i>	قدومه
	<i>Alyssum heldreichii</i>	قدومه
	<i>Alyssum markgrafii</i>	قدومه
	<i>Alyssum murale</i>	قدومه
	<i>Alyssum pterocarpum</i>	قدومه
	<i>Alyssum serpyllifolium</i>	قدومه
کادمیوم	<i>Berkheya coddii</i>	-
	<i>Isatis pinnatiloba</i>	-
	<i>Azolla pinnata</i>	آزولا
	<i>Eleocharis acicularis</i>	گندمی
	<i>Rorippa globosa</i>	-
	<i>Solanum photeinocarpum</i>	-
	<i>Thlaspi caerulescens</i>	-
	<i>Corrigiola telephifolia</i>	-
	<i>Eleocharis acicularis</i>	گندمی
	<i>Pteris biaurita</i>	سرخس
آرسنیک	<i>Pteris cretica</i>	سرخس
	<i>Pteris quadriaurita</i>	سرخس
	<i>Pteris ryukyuensis</i>	سرخس
	<i>Pteris vittata</i>	سرخس
	<i>Eleocharis acicularis</i>	گندمی
	<i>Euphorbia cheiradenia</i>	فرفیون، شیرسگ
	<i>Schima superba</i>	-
کروم	<i>Pteris vittata</i>	سرخس

نتیجه‌گیری

افزایش فعالیت معادن به دلیل استخراج فلزات و مواد معدنی گران‌بها، منجر به آزادسازی مواد فلزی خطرناک در محیط می‌شود. لذا فعالیت معادن به عنوان منبع اصلی انتشار فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شوند که بدون روش اصلاحی مناسب، پسماندهای صنعتی در خاک و یا آب نفوذ کرده و منجر به تخریب زیست‌بوم می‌شوند [۴۹].

در واقع زمانی که هر ماده معدنی یا فلز گران‌بها استخراج می‌گردد، فلزات مضر خاصی آزاد می‌کنند که در خاک اطراف معادن باقی‌مانده و یا وارد منابع آبی می‌شوند که به آلودگی زیست‌بوم منجر می‌گردند. این فلزات پایدار بوده و توانایی باقی ماندن در جو را تا چندین سال دارا هستند. لذا اثرات نامطلوبی را بر فعالیت متابولیکی و رشد گیاهان در آن مناطق به دنبال دارند [۴۹].

از طرفی موجودات زنده برای بقا و رشد به مقادیر بسیار کمی از فلزات سنگین نیاز دارند که با افزایش فعالیت صنعتی و استخراج و کاربرد فلزات، تراکم این عناصر در زیست‌بوم‌ها، به‌ویژه خاک افزایش یافته و باعث تغییرات می‌شود. بنابراین توجه به آلودگی حاصل از آن‌ها ضروری است [۹۹].

بخش عمده‌ای از فلزات سنگین، به دلیل سمی بودن و ایجاد آلودگی محیطی، به راحتی در آب حل شده و تقریباً تجزیه‌ناپذیرند. این ویژگی‌ها باعث بوجود آمدن برخی از اثرات نامطلوب از جمله تسریع در ورود این فلزات به بافت موجودات زنده شده، رشد گیاهان را مختل کرده و ارزش غذایی را کاهش می‌دهند [۹۵]. همچنین سمیت فلزات سنگین در گیاهان از جدی‌ترین نگرانی‌هایی است که در تغییرات آناتومی و فیزیولوژی گیاهان تأثیرگذار است و در این بین گیاهان مقاوم با تجمع فلزات سنگین در بافت‌ها، سیستم دفاعی در برابر سمیت فلزات را فعال می‌نمایند. این سیستم دفاعی شامل آنتی‌اکسیدان‌ها در جهت سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن و متابولیت‌های ثانویه در راستای جداسازی فلزات از واکوئل‌هاست [۹۳].

در بخشی از این گردآوری، اثرات نامطلوب فلزات سنگین بر گیاهان موردبررسی قرار گرفت که مشخص شد اکثر فلزات سنگین اثرات نامطلوب بر گیاهان داشته و ریخت‌شناسی آن‌ها را تغییر می‌دهند. با توجه به مرور منابع،

مکانیسم‌های فردی سمیت شناسایی شدند. لذا یکی از چالش‌های آینده در این راستا توسعه روش‌های اصلاحی مناسب، اقتصادی و سازگار با محیط در راستای حذف فلزات از زیست‌بوم‌های آلوده است.

از طرفی دیگر با توجه به اینکه استخراج معادن یک صنعت سودآور بوده و بر اقتصاد بسیاری از کشورها تأثیرگذار است؛ لذا گیاه‌پالایی به عنوان بهترین روش پاک‌سازی اراضی اطراف معادن به‌شمار می‌آید که مستلزم استفاده پایدار از سرزمین است. زیرا این روش نسبت به سایر روش‌های مرسوم، اقتصادی‌تر بوده و با محیط سازگارتر هستند [۹۸]. در سایر روش‌های اصلاحی از جمله روش‌های فیزیکی و شیمیایی، احتمال توسعه آلاینده‌های ثانویه وجود دارد و برای انجام آن به سرمایه‌گذاری بیشتری نیاز است. لذا در حال حاضر صنایع، فناوری اصلاح زیستی را جهت پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات ترجیح می‌دهند. در واقع می‌توان از رویکردهای بیوتکنولوژی که در راستای پیشرفت روش‌های زیستی جهت پاک‌سازی موفقیت‌آمیز فلزات سنگین است، بهره برد [۴۹].

در مرور منابع انجام‌شده مشخص است که گونه‌های مختلف، پتانسیل استخراج و یا تثبیت گیاهی در اراضی اطراف معادن را دارند. در واقع گیاه‌پالایی، فناوری مناسب برای این امر است که با مکانیسم‌های استخراج و تثبیت گیاهی، پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات در اطراف معادن قابل انجام است. با توجه به اینکه استخراج گیاهی به عنوان یکی از روش‌های گیاه‌پالایی، هزینه بالایی داشته و در کوتاه‌مدت قابلیت اجرایی ندارد، در زمین‌های با ارزش که حذف فلز از آن‌ها ضروری است، مناسب هستند. در صورتی که روش تثبیت گیاهی، به علت هزینه کمتر و اجرای آسان‌تر، رویکردی رایج‌تر محسوب می‌شود.

درواقع، روش‌های زیستی از جمله گیاه‌پالایی به دلیل مقرون به صرفه بودن نسبت به سایر روش‌های پاک‌سازی، ارجحیت دارند. با این حال این روش دارای محدودیت‌های خاصی از جمله طولانی بودن زمان اصلاح خاک‌های آلوده، زیست‌توده پایین گیاهان فرااباش‌کننده، قابلیت اجرا در اراضی با آلودگی کم تا متوسط، عدم آگاهی کافی در خصوص کشت، پرورش، آفات و بیماری‌های گیاهان نیز می‌باشد. بنابراین به منظور جلوگیری از موارد مذکور، بهترین

آبوهوای نامساعد در برابر آلودگی فلزات مقاومت کرده و به عنوان گیاه پالای قوی عمل می کنند [۹۸].

در خاک های آلوده به فلزات سنگین، کاربرد گیاهانی با توانایی رشد، سازگاری و جذب فلزات به عنوان یک روش پاک سازی این اراضی به شمار می آید [۱۰۲] که در این نوشتار گیاه پالایی به عنوان یکی از روش های پالایش خاک های آلوده به فلزات سنگین ارائه شد و نتایج نشان داد که به منظور کاهش آلودگی خاک و کاهش اثرات سمیت، قبل از کشت باید گونه گیاهی مناسب شناسایی گردد.

پیشنهاد می شود در تحقیقات آینده به منظور پاک سازی اراضی آلوده به فلزات سنگین در اطراف معادن، گیاهان بومی، سازگار و مقاوم با شرایط مناطق مورد توجه قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

این نوشتار برگرفته از مرور منابع رساله دکتری می باشد که با حمایت مادی و معنوی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. لذا نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از حامی این پژوهش دارند

References

- [1]. Abou Shanab, R.A.I., Tammam, A.A., El-Aggan, W.H., & Mubarak, M.M. (2017). Phytoremediation potential of wild plants collected from heavy metals contaminated soils. *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences*, 5(4), 15-19.
- [2]. Acosta, J.A., Abbaspour, A., Martinez, G.R., Martinez Martinez, S., Zornoza, R., Gabarr, M., & Faz, A. (2018). Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study. *Chemosphere*, 204, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.027>
- [3]. Adamu, G.K., Auwal, M., Kasim, A.A., & Halliru, J.L. (2015). Assessment of heavy metals in soils and surface water around mines in Jos metropolis, plateau state Nigeria. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 2(12), 386-389.

راه اجرای زیستی و اعمال اصلاحات در راستای حفظ پوشش گیاهی است [۹۸].

در این بین اطلاعات به دست آمده از گیاهان فراانباشت کننده فلزات سنگین، در راستای بهبود پتانسیل گیاهان غیرخوراکی در تجمع مقادیر بالای فلزات و کاهش آلودگی ناشی از این فلزات در محیط، کاربردی هستند. همچنین از این اطلاعات جهت القاء مکانیسم هایی که منجر به جذب کمتر فلزات در گونه های خوراکی و پیامدهای منفی این فلزات در راستای سلامتی موجودات زنده در زیست بوم ها می شوند، می توان بهره برد [۹۳].

در مرور منابع انجام شده، پژوهشگران بیشتر از گیاهان بومی جهت پاک سازی خاک های آلوده به فلزات سنگین در اطراف معادن استفاده کردند که این گونه ها در مقایسه با سایر گونه ها عموماً مناسب تر بودند. در این راستا ذکر این نکته ضروری است که کشت گیاهان بومی به همراه گیاهان غیربومی در درازمدت مؤثر خواهد بود. چون گیاهان غیربومی با حذف فلزات به رشد گونه های بومی کمک خواهد کرد.

در صورت استقرار گیاهان غیربومی در آبوهوای گرم، استقرار و تنوع زیستی منطقه تهدید شده و به عنوان مهاجم عمل می کنند. اما از طرفی این گونه ها به علت رشد سریع در

- [4]. Adelanwa, E.B., Bako, S.P., Iortsuun, D.N., & Japhet, W.S. (2016). Effects of Copper and Lead On The Chlorophyllis (a and b) and The Anti Oxidant Enzymes (Catalase and Peroxidase) in Lemnatisulcal (Family: Lemnaceae). *Journal of Tropical Biosciences*, 11, 1-11.
- [5]. Akinleye, C., Adewumi, A.J., & Akinleye, R.O. (2022). A Systematic Review of Ecological and Human Health Risk Associated with Metals in Soils around Mining Areas in Nigeria. *Achievers Journal of Scientific Research*, 4(1), 120-141.
- [6]. Akpanowo, M.A., Umaru, I., Joshua, E.O., Iyakwari, S., & Yusuf, S.D. (2020). Assessment of heavy metals contamination and pollution around mining sites of Anka, north-west Nigeria. *Nippon Journal of Environmental Science*, 1(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0041-7>
- [7]. Alharbi, M., & Aljeddani, G. (2022). Heavy Metals Phytoremediation and Its Impact on

- Photosynthetic Pigments and Metabolic Content in Some Plant Species Grown in the Streets of Jeddah Governorate, Saudi Arabia. *Journal of Environmental Protection*, 13(7), 557-574. DOI: 10.4236/jep.2022.137035
- [8]. Ali, S., Zeng, F., Qiu, L., & Zhang, G. (2011). The effect of chromium and aluminum on growth, root morphology, photosynthetic parameters and transpiration of the two barley cultivars. *Biologia Plantarum*, 55 (2), 291-296. <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0041-7>
- [9]. Ali, H., Khan, E., & Anwar Sajad, M. (2013). Phytoremediation of heavy metals Concepts and applications. *Chemosphere*, 91, 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- [10]. Alizadeh, A., Ghorbani, J., Motamedi, J., Vahabzadeh, G., Edraki, M., & Vander Ent, A. (2022). Metal and metalloid accumulation in native plants around a copper mine site: implications for phytostabilization. *International Journal of Phytoremediation*, 24(11), 1141-1151. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.2011831>
- [11]. Aloud, S.S., Alotaibi, K.D., Almutairi, K.F., & Albarakah, F.N. (2023). Phytoremediation Potential of Native Plants Growing in Industrially Polluted Soils of Al-Qassim, Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su15032668>
- [12]. Al Rashedy, H.S.M.A. (2021). The physiological response of mint plant (*Mentha spicata*) growing with soil contaminated with heavy metals. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 12(2), 133-138.
- [13]. Alshaal, T., Domokos Szabolcsy, E., Marton, L., Czako, M., Katai, J., Balogh, P., Elhawati, N., El Ramady, H., & Fari, M. (2013). Phytoremediation of bauxite derived red mud by giant reed. *Environmental Chemistry Letters*, 11, 295-302. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0406-6>
- [14]. Alvarez, V.M., Veronica, C.J., Mabel, V.M., & Victor D.S. (2015). Phytoremediation of Mine Tailings Using *Lolium Multiflorum*. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(4), 245-251. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.599
- [15]. Amini, F.L., Mirghaffari, N., & Eshghi Malayeri, B. (2011). Nickel Concentration in Soil and Some natural Plant Species around Ahangaran Lead and Zinc Mine in Hamedan. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 13(1), 11-20. <https://sid.ir/paper/87638/en>. [in Farsi]
- [16]. Amin Kamal, M., Perveen, K., Khan, F., Sayyed, R.Z., Ghim Hock, O., Chandra Bhatt, S., Singh, J., & Obaid Qamar, M. (2023). Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of *Brassica juncea* L. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1228117>
- [17]. Asadi Karam, O., & Qishlaqi, A. (2019). Concentration and speciation of heavy elements in soils and plants around Ijo porphyry copper mine (NW Share-Babak, Kerman province). *New Findings in Applied Geology*, 13(25), 109-123. 10.22084/nfag.2018.16955.1326 [in Farsi]
- [18]. Asati, A., Pichhode, M., & Nikhil, K. (2016). Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, 5(3), 56-66. DOI:10.13140/RG.2.2.27583.87204
- [19]. Azizah, D., Lestari, F., Kurniawan, D., Melany, W. R., Apriadi, T., & Murtini, S. (2022). Index of environmental pollution and adaptation of *Avicennia marina* around the ex-bauxite mining area in Bintan Island. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 967, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/967/1/012016
- [20]. Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martinez, S.M., & Acosta, A. (2023). Phytoremediation Potential of Native Plant Species in Mine Soils Polluted by Metal (loid)s and Rare Earth Elements. *Journal of Plants*, 12(6), 1-25. <https://doi.org/10.3390/plants12061219>
- [21]. Balali Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M.R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- [22]. Bech, J., Duran, P., Roca, N., Poma, W., Sanchez, I., Barcelo, J., Boluda, R., Roca

- Perez, L., & Poschenrieder, C. (2012). Shoot accumulation of several trace elements in native plant species from contaminated soils in the Peruvian Andes. *Journal of Geochemical Exploration*, 113, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.007>
- [23]. Chinmayee, D., Anu, M.S., Mahesh, B., Sheeba, M.A., Mini, I., & Swapna, T.S. (2014). A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Jatropha curcas* L. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8, 58-67.
- [24]. Dahrazma, B., Rahmati, Sh., Asghari, H.R., & Sadeghian, M. (2015). Evaluation of the Effects of Choghondarsar Copper Mine on the Concentration of Heavy Metals in Soil and Native Plants (Southwest of Abbasabad). *Journal of Mining Engineering*, 10 (27), 81-94. 20.1001.1.17357616.1394.10.27.8.1 [in Farsi]
- [25]. Dalvand, M., Hamidian, A.H., Zare chahuoki, M.A., Mirjalili, S.A.A., & Esmaeil zadeh, E. (2014). Investigating the Effects of Cu, Pb, Zn and Mn Concentrations in *Artemisia sp.* Above Ground Biomass in the Rangelands of Darreh Zereshk Copper Mine Taft . *Journal of Rangeland*, 8(3), 219-229. 20.1001.1.20080891.1393.8.3.2.2 [in Farsi]
- [26]. Dalvand, M., Hamidian, A.H., Zare chahuoki, M.A., Mirjalili, S.A.A., Motasharezadeh, B., & Esmaeil zadeh, E. (2016). Determination of the concentration of heavy metals (Cu, Pb & Zn) in roots of *Artemisia sp.* in natural lands of Darreh Zereshk copper mine, Taft, Yazd. *Journal of Natural Environment*, 69(1), 35-46. https://jne.ut.ac.ir/article_58633.html [in Farsi]
- [27]. De Maria, S., Puschenreiter, M., & Rivelli, A.R. (2013). Cadmium accumulation and physiological response of sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle. *Plant, Soil and Environment*, 59(6), 254-261.
- [28]. Doganlara, Z.B., Doganlara, O., Erdoganb, S., & Onal, Y. (2012). Heavy metal pollution and physiological changes in the leaves of some shrub, palm and tree species in urban areas of Adana, Turkey. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 24 (2), 65-78. <https://doi.org/10.3184/095422912X13338055043100>
- [29]. El Berkaoui, M., El Adnani, M., Hakkou, R., Ouhammou, A., Bendaou, N., & Smouni, A. (2022). Assessment of the Transfer of Trace Metals to Spontaneous Plants on Abandoned Pyrrhotite Mine: Potential Application for Phytostabilization of Phosphate Wastes. *Journal of Plants*, 11 (2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants11020179>
- [30]. Elouadihi, N., Laghlimi, M., Moussadek, R., Laghrour, M., Bouabdli, A., & Baghdad, B. (2022). Phytoremediation study of mining soils: case of the Mibladen and Zaida mine (High Moulouya, Morocco). *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 10(6), 1391-1400. DOI: [https://doi.org/10.18006/2022.10\(6\).1391.1400](https://doi.org/10.18006/2022.10(6).1391.1400)
- [31]. Emmanuel, N.M., & Nasirudeen, M.B. (2019). Heavy Metal Analysis of Soil Around Mine Sites in Ameri, Enyigba and Ishiagu in Ebonyi State. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(10), 116-122. DOI: 10.7176/JEES/9-10-12
- [32]. Farjadi, M., & Norastehnia, A. (2021). Effects of heavy metal mercury on some of the physiological responses in (*Nicotiana tabacum* L.). *Nova Biologica Reperta*, 8 (2), 102-113. <https://nabr.khu.ac.ir/article-1-3388-en.html>
- [33]. Franco, M.O., Vasquez, M.S., Patino, A., & Dendooven, L. (2010). Heavy metals concentration in plants growing on mine tailings in Central Mexico. *Bioresource Technology*, 101, 3864-3869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.013>
- [34]. Franco, H., Celis, C., Forero, S., Pombo, L.M., & Rodriguez, O.E. (2018). Phytoremediating Activity of *Baccharis Latifolia* in Soils Contaminated with Heavy Metals. *International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research*, 9(4), 38-43.
- [35]. Garcia Robles, H., Melloni, E.G., Navarro, F.B., Martin Peinado, F.J., & Lorite, J. (2022). Gypsum mining spoil improves plant emergence and growth in soils polluted with potentially harmful element. *Plant and Soil*, 481(5), 315-329. DOI:10.1007/s11104-022-05639-3

- [36]. Ghaderian, M., & Nosouhi, S. (2015). The capability of uptake and removal of toxic heavy metals from the industrial discharge of Mobarakeh Steel Complex by some metal accumulating plants. *Plant Process and Function*, 4 (12), 43-49. 20.1001.1.23222727.1394.4.12.2.2 [in Farsi]
- [37]. Gill, R.A., Kanwar, M.K., Reis, A.R., & Ali, B. (2022). Heavy metal toxicity in plants: Recent insights on physiological and molecular aspects. *Front in Plant Sciences*, 12, 1-5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.830682>
- [38]. Gomes, M.P., Melo Marques, T.C.L.D., Oliveira, M.D., Nogueira, G., Castro, E.M., & Soares, A.M. (2011). Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens*. *Sciences Agriculture*, 76 (5), 566-573. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000500009>
- [39]. Hamidian, A.H., Atashgahi, M., & Khorasani, N. (2014). Phytoremediation of heavy metals (Cd, Pb and V) in gas refinery wastewater using common reed (*Phragmites australis*). *International Journal of Aquatic Biology*, 2(1), 29-35. <https://doi.org/10.22034/ijab.v2i1.21>
- [40]. Hananingtyas, I., Nuryanty, C. D., Karlinasari, L., Alikodra, H. S., Jayanegara, A., & Sumantri, A. (2022). The effects of heavy metal exposure in agriculture soil on chlorophyll content of agriculture crops: a meta-analysis approach. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 951, No. 1, p. 012044). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/951/1/012044
- [41]. Hernandez, J.C.M., Delgado, O.R.V., Morales, M.C., Caseliss, J.L.V., Juarez, J.D.S., Xometla, O.O., Morales, J.A., & Osorio, G.P. (2019). Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Microbiological Research*, 228, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126308>
- [42]. Hosseinalizadeh, M., Mohammadian Behbahani, A., Yeganeh, H., & Khemandar, Kh. (2023). Investigating the potential of pasture species in plant remediation of soils in the downstream area of bauxite mine crushers of Alumina Company of Iran-Jajarm. Research project between Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources and Jajarm Alumina. 511 p. [in Farsi]
- [43]. Hosseinalizadeh, M., Yeganeh, H., Khemandar, Kh., & Saadatfar, A. (2024). Investigating phytoremediation of *Lycium depressum* Plant around the Iodine factory of Golestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, (in press). <https://doi.org/10.22052/deej.2024.255242.1068> [in Farsi]
- [44]. Hoseinpour, F., Hosein Nejad Mohtarami, M., Alipour, S., & Torbati, S. (2020). Heavy Metal Contaminations at Two Iranian Copper Mining Areas and the Remediation by Indigenous Plants. *Iranian Journal of Toxicology*, 14(2), 81-92. <https://doi.org/10.32598/ijt.14.2.501>
- [45]. Jahantab, E. (2021). Potential of heavy metals uptake by *Gundelia tournefortii* in rangelands around the Yasouj cement factory. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28 (4), 733-744. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125280> [in Farsi]
- [46]. Alfaraas, A. J., Khairiah, J., Ismail, B. S., & Noraini, T. (2016). Effects of heavy metal exposure on the morphological and microscopical characteristics of the paddy plant. *Journal of environmental biology*, 37(5), 955.
- [47]. Jiang, K., Wu, B., Wang, C., & Rana, Q. (2019). Ecotoxicological effects of metals with different concentrations and types on the morphological and physiological performance of wheat. *Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety*, 167, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.048>
- [48]. Jimenez, M.N., Bacchetta, G., Navarro, F.B., & Casti, M. (2021). Native Plant Capacity for Gentle Remediation in Heavily Polluted Mine. *Journal of Applied Sciences*, 11(4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/app11041769>
- [49]. Karn, R., Ojha, N., Abbas, S., & Bhugra, S. (2021). Community based Research and Innovations in Civil. A review on heavy metal contamination at mining sites and remedial techniques. IOP Conf. Series: Earth and

- Environmental Science (Vol. 796, p. 012013). DOI 10.1088/1755-1315/796/1/012013
- [50]. Khermandar, Kh., Hosseinalizadeh, M., Mahdavi, A., Mohammadian Behbahani, A., & Yeganeh, H. (2023). Ecological Restoration of Polluted Soils in Arid Region (Case Study: Bauxite Crusher of Jajarm Alumina). *Desert Management*, 10(4), 55-80. <https://doi.org/20.1001.1.24763985.1401.10.4.4.4> [in Farsi]
- [51]. Khermandar, Kh., Hosseinalizadeh, M., Mahdavi, A., Mohammadian Behbahani, A., & Yeganeh, H. (2023). Investigating the Phytoremediation of *Seidlitzia Rosmarinus* and *Haloxylon aphyllum* Desert Plants: A Case Study of Bauxite Crusher of Jajarm Alumina Mine. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 12(38), 45-58. <https://doi.org/10.22052/deej.2023.252496.1010> [in Farsi]
- [52]. Khorami pour, S., Mafi gholami, R., & Jahani, A. (2019). An Investigation on the Possibility of Heavy Metal (Pb and Ni) Phytoremediation from Plant *Artemisia Sieberi* in Mohammadabad Waste Disposal Site in Ghazvin. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(10), 91-103. <https://sid.ir/paper/359909/en> [in Farsi]
- [53]. Mensah, M. K., Drebenstedt, C., Okoroafor, P. U., & Wiafe, E. D. (2022). J. curcas and Manihot esculenta are potential super plants for phytoremediation in multi-contaminated mine spoils. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 373, p. 00080). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202237300080>
- [54]. Kord, B., Safikhani, F., Khademi, A., & Pourabbasi, S. (2018). Investigating the role of rangeland plants in remediation of soils contaminated with lead and zinc. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25 (1), 78-88. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116228> [in Farsi]
- [55]. Kumar Roy, S., Woo Cho, S., Jeong Kwon, S., Mostafa Kamal, A.H., Woo Kim, S., Won Oh, M., Soon Lee, M., Yook Chung, K., Xin, Z., & Hee Woo, S. (2016). Morpho-Physiological and Proteome Level Responses to Cadmium Stress in Sorghum. *Plos One*, 11(2), 1-27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150431>
- [56]. Kumar, M., Singh, A.K., & Sikandar, M. (2020). Biosorption of Hg (II) from aqueous solution using algal biomass: kinetics and isotherm studies. *Heliyon*, 6 (1), 1-10.
- [57]. Kumar, A.S., Alak, K.S., Manish, S.R., & Mohd, S. (2021). Remediation strategies for heavy metals contaminated ecosystem: A review Mahendra. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100155>
- [58]. Laghlimi, M., Elouadihi, N., Baghdad, B., Moussadek, R., Laghrour, M., & Bouabdli, A. (2022). Influence of Compost and Chemical Fertilizer on Multi-Metal Contaminated Mine Tailings Phytostabilization by *Atriplex nummularia*. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 23 (6), 204-215. DOI 10.12912/27197050/152915
- [59]. Li, R., Dong, F., Yang, G., Zhang, W., Zong, M., Nie, X., Zhou, L., Babar, A., Liu, J., Ram, B.K., Fan, C., & Zeng, Y. (2019). Characterization of Arsenic and Uranium Pollution Surrounding a Uranium Mine in Southwestern China and Phytoremediation Potential. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(6), 173-185. DOI: 10.15244/pjoes/103446
- [60]. Lotfy, S.M., & Mostafa, A.Z. (2014). Phytoremediation of contaminated soil with Cobalt and Chromium. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.003>
- [61]. Maddah, S.M., & Moraghebi, F. (2013). The comparisons between *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in respect of lead phytoremediation potential. *International Journal of Biosciences*, 3(2), 35-41. doi: <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.2.35-41>
- [62]. Madhu Priya, M., & Ravi Shankar, S. (2020). Effect of Heavy Metals on Growth and Development of Cultivated Plants with Reference to Cadmium, Chromium and Lead: A Review. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16 (3), 84-102.
- [63]. Makombe, N., & Gwisai, R.D. (2018). Soil Remediation Practices for Hydrocarbon and Heavy Metal Reclamation in Mining Polluted Soils. *The Scientific World Journal*, 3, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/5130430>

- [64]. Manzoor, M.M., Goyal, P., Gupta, A.P., & Gupta, S. (2020). Heavy metal soil contamination and bioremediation. *Bioremediation and Biotechnology*, Vol 2: Degradation of Pesticides and Heavy Metals, 221-239. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40333-1_13
- [65]. Marcelo Silva, J., Ramabu, M., & John Siebert, S. (2023). Phytoremediation and Nurse Potential of *Aloe* Plants on Mine Tailings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (2), 1-10. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021521>
- [66]. Martinez Sanchez, M.J., Garcia Lorenzo, M.L., Perez Sirvent, C., & Bech, J. (2012). Trace element accumulation in plants from an aridic area affected by mininig activities. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.01.007>
- [67]. Merzougui, A., Mariama, L., Hamid, F.E., Lachgar, M., El Anssari, A., & Mrani, D. (2022). Lead uptake, flavonoids and proline relationship in *Atriplex nummularia* growing in a galena mining are. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 12 (1), 11-18. DOI: http://dx.doi.org/10.13171/mjc02204121619_merzougui
- [68]. Mingyuan, L., Samsuri, A.W., Shukor, M.Y., & Phang, L.Y. (2020). Growth Performance of *Jatropha curcas* Cultivated on Local Abandoned Bauxite Mine Soil. *Sustainability*, 12(19), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su12198263>
- [69]. Mirck, J., & Zalesny, R.S. (2015). Mini Review of knowledge gaps in salt tolerance of plants applied to willows and poplars. *International Journal of Phytoremediation*, 17(7), 640-650. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.950414>
- [70]. Moameri, M., Jafari, M., Tavili, A., Motasharezadeh, B., & Zarechahuoki, M.A. (2015). Assessing rangeland plants potential for phytoremediation of contaminated soil with Lead and Zinc (Case study: Rangelands located around National Iranian Lead & Zinc Factory-Zanjan). *Journal of Rangeland*, 9(1), 29-42. <https://doi.org/20.1001.1.20080891.1394.9.1.3.6> [in Farsi]
- [71]. Moameri, M., Jafari, M., Tavili, A., Motasharezadeh, B., & Zare Chahouki, M.A. (2017). Rangeland Plants Potential for Phytoremediation of Contaminated Soils with Lead, Zinc, Cadmium and Nickel (Case Study: Rangelands around National Lead and Zinc Factory, Zanjan, Iran). *Journal of Rangeland Science*, 7(2), 160-171.
- [72]. Montalvan Olivares, D.M., Santana, C.S., Velasco, F.G., Luzardo, F.H.M., Andrade, S.F.R., Ticianelli, R.B., Armelin, M.J.A., & Genezini, F.A. (2021). Multi element contamination in soils from major mining areas in Northeastern of Brazil. *Journal of Environmental Geochemistry and Health*, 43(11), 4553-4576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00934-x>
- [73]. Montazeri, F., Tamartash, R., Tatian, M., & Hojati, M. (2018). Potential of rangeland species *Astragalus globiflorus* and *Acantholimon hohenackeri* in heavy metals absorption (Case study: rangelands around the Firoozkouh cement factory). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25 (2), 278-288. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116840> [in Farsi]
- [74]. Moore, F., Dehghani, Sh., & Keshavarzi, B. (2015). Trace element concentration in soils and plants in the vicinity of Miduk copper mine. *Journal of Economic Geology*, 6(2), <https://doi.org/305-314>. 10.22067/econg.v6i2.44780 [in Farsi]
- [75]. Muddarisna, N., Krisnayanti, B.D., Utami, S.R., & Handayanto, E. (2013). Potential of wild plants for phytoremediation of soil contaminated with mercury of gold cyanidation tailings. *Journal Of Environmental Science Toxicology And Food Technology*, 4(1), 15-19.
- [76]. Muhammad, S., Shah, M.T., & Khan, S. (2011). Heavy metal concentrations in soil and wild plants growing around Pb-Zn sulfide terrain in the Kohistan region, northern Pakistan. *Microchemical Journal*, 99, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.03.012>
- [77]. Murtaza, G., Murtaza, B., Niazi, N. K., & Sabir, M. (2014). Soil contaminants: sources, effects, and approaches for remediation. In *Improvement of Crops in the Era of*

- Climatic Changes: Volume 2* (pp. 171-196). New York, NY: Springer New York. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8824-8_7
- [78]. Nedjimi, B. (2021). Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *Springer Nature Applied Sciences*, 3(3), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>
- [79]. Novo, L. A., Castro, P. M., Alvarenga, P., & da Silva, E. F. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria-assisted phytoremediation of mine soils. In *Biogeotechnologies for mine site rehabilitation* (pp. 281-295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00016-6>
- [80]. Obinna Igwe, E., Ede, C.O., Eyankware, M.O., Nwachukwu, C.M., & Williams, O.B. (2022). Assessment of Potentially Toxic Metals from Mine Tailings and Waste Rocks Around Mining Areas of Oshiri-Ishiagu Region, Southeastern Nigeria. *Earth Systems and Environment*, 6(2), 597-615. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00306-0>
- [81]. Palutoglu, M., Akgul, B., Suyarko, V., Yakovenko, M., Kryuchenko, N., & Sasmaz, A. (2018). Phytoremediation of Cadmium by Native Plants Grown on Mining Soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 100(2), 293-297. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2220-5>
- [82]. Parsadoust, F., & Bahreininejad, B. (2014). Potential of rangeland species in cleaning cadmium contaminated soils in Irankoo region. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 21(2), 317-328. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2014.11379> [in Farsi]
- [83]. Parraga Aguado, I., Gonzalez Alcaraz, M.N., Alvarez Rogel, J., & Conesa, H.M. (2014). Assessment of the employment of halophyte plant species for the phytomanagement of mine tailings in semiarid areas. *Ecological Engineering*, 71, 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.061>
- [84]. Paz Ferreira, J., Lu, H., Fu, S., Mendez, A., & Gasco, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Journal of Solid Earth*, 5(1), 65-75. <https://doi.org/10.5194/se-5-65-2014>, 2014.
- [85]. Peco, J.D., Higuera, P., Campos, J.A., Esbri, J.M., Moreno, M.M., Brunet, F.B., Luisa, M., & Sandalio, L.M. (2021). Abandoned Mine Lands Reclamation by Plant Remediation Technologies. *Sustainability*, 13 (12), 1-27. <https://doi.org/10.3390/su13126555>
- [86]. Prasad Rath, B., Hota, S., Subhadarshini, S., Dash, D., & Kaibalya Das, P. (2019). Consequence of chromium-tainted soil on physical and biochemical responses of *Vigna radiata* L. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 7(1), 35-41. DOI: 10.7324/JABB.2019.70107
- [87]. Qassim, A.A., & Al Jawasim, M.H. (2019). Effects of Heavy Metals on Physiological Status of Plants. *Plant Archives*, 19(2), 2865-2871.
- [88]. Raffa, C.M., Chiampo, F., & Shanthakumar, S. (2021). Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review. *Applied Sciences*, 11, 1-23. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
- [89]. Rahman Khan, M., & Mahmud Khan, M. (2010). Effect of Varying Concentration of Nickel and Cobalt on the Plant Growth and Yield of Chickpea. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(6), 1036-1046.
- [90]. Rahim, F.A.A., Hamid, T.H.T.A., & Zainuddin, Z. (2019). Jatropha curcas as a potential plant for bauxite phytoremediation. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 308, No. 1, p. 012006). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/308/1/012006
- [91]. Ramazani, M., Mosleh Arani, A., Sodaieizadeh, H., & Khayat, M. (2023). Effect of Bacillus cereus and selenium on some morpho-physiological characteristics and ion content of Salsola arbuscula under lead stress. *Journal of Arid Biome*, 13(2), 193-207.. <https://doi.org/10.29252/aridbiom.2024.2080> 2.1968
- [92]. Rashed, M.N. (2010). Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3),

- 739-746.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.147>
- [93]. Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Iqbal, M., Khan, R., Kumar, M., Ramteke, P.W., & Gupta, R. (2022). A Comprehensive Review on the Heavy Metal Toxicity and Sequestration in Plants. *Biomolecules*, 12(43), 1-26.
<https://doi.org/10.3390/biom12010043>
- [94]. Rojas Solis, D., Larsen, J., & Lindig Cisneros, R. (2023). Arsenic and mercury tolerant rhizobacteria that can improve phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Peer Journal*, 11(10), 1-18. <https://doi.org/10.7717/peerj.14697>
- [95]. Ruchi Bharti, K., & Sharma, R. (2021). Effect of heavy metals: An overview. *materialstoday: proceedings*, 51(2), 880-885.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.278>
- [96]. Sahihi, T., Jafari, M., Javadi, A., & Tahmoures, M. (2020). Investigation of Phytoremediation Ability of Rangeland Species in Soils Contaminated with Copper and Manganese). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51 (6), 1594-1604.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.293146.668417> [in Farsi]
- [97]. Santos Jallath, J., Castro Rodrigues, A., Huezo Casillas, J., & Torres Bustillos, L. (2012). Arsenic and heavy metals in native plants tailings impoundments in Queretaro, Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 37-39, 10-17.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.12.002>
- [98]. Sarathchandra, S.S., Rengel, Z., & Solaiman, Z.M. (2023). A Review on Remediation of Iron Ore Mine Tailings via Organic Amendments Coupled with Phytoremediation. *Journal of Plants*, 12, 1-18. <https://doi.org/10.3390/plants12091871>
- [99]. Sergeevna Budovich, L. (2021). Effects of heavy metals in soil and plants on ecosystems and the economy. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19 (5), 991-997.
<https://doi.org/10.22124/cjes.2021.5331>
- [100]. Shahid, M., & Khalid, S. (2020). Foliar application of lead and arsenic solutions to *Spinacia oleracea*: biophysiochemical analysis and risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 39763-39773. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06519-7>
- [101]. Sharifi, Z., Sinegani, A.A.S., & Shariati, S. (2012). Potential of Indigenous Plant Species for the Phytoremediation of Arsenic Contaminated Land in Kurdistan (Iran). *Soil and Sediment Contamination: Benchmarking: An International Journal*, 21(5), 557-573.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2012.678951>
- [102]. Shi, J., Qian, W., Jin, Z., Zhou, Z., Wang, X., & Yang, X. (2023). Evaluation of soil heavy metals pollution and the phytoremediation potential of coppernickel mine tailings ponds. *Plos One*, 18(3), 1-16.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277159>
- [103]. Selvaraj, K., Ramasubramanian, V., & Kumar, M. (2021). Phytoremediation of Soil Contaminated with Arsenic, Nicke and Copper. *Indian Journal of Environmental Sciences*, 26(2), 51-59.
- [104]. Siyar, R., Doulati Ardejani, F., Norouzi, P., Maghsoudy, S., Yavarzadeh, M., Taherdangkoo, R., & Butscher, C. (2022). Phytoremediation Potential of Native Hyperaccumulator Plants Growing on Heavy-Metal-Contaminated Soil of Khatunabad Copper Smelter and Refinery, Iran. *Water*, 14(22), 1-19.
<https://doi.org/10.3390/w14223597>
- [105]. Sohrabizadeh, Z., Sodaieizadeh, H., Hakimzadeh, M. A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Ghanei Bafghi, M. J. (2023). A statistical approach to study the spatial heavy metal distribution in soils in the Kushk Mine, Iran. *Geoscience Data Journal*, 10(3), 315-327. <https://doi.org/10.1002/gdj3.175>
- [106]. Solgi, E., Zamanian, A., & Beigmohammadi, F. (2020). Investigating the effect of distance from source and species type on the absorption ability of heavy metals by tree species around Nahavand cement factory. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 8(16), 321-343. URL: <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-600-en.html> [in Farsi]
- [107]. Soltani javid, A., Moraghebi, F., & Farzami Sepehr, M. (2014). The Role of *Ephedra Poracera Fisch & Mey.* in Absorbing Heavy Metals in Robat Karim Manganese ore Plant. *Iranian Plant*

- Ecophysiology Research*, 9(2), 65-71. <https://sid.ir/paper/185552/en> [in Farsi]
- [108]. Soni, S., & Jain, S. (2014). A review on phytoremediation of heavy metals from soil by using plants to remove pollutants from the environment. *International Journal of Advanced Research*, 2(8), 197-203. Journal homepage: <http://www.journalijar.com>
- [109]. Tamartash, R., Montazeri, F., Tatian, M.R., & Vahab Zadeh, Gh. (2018). Heavy metal concentrations (Cu, Pb and Zn) in three rangeland species and adjacent soils around Kiasar Cement Factory in Northern Iran. *Environmental Sciences*, 15(4), 1-14. <https://sid.ir/paper/117718/en> [in Farsi]
- [110]. Vojodi Mehrabani, L., Valizadeh Kamran, R., & Mirzaei, H. (2019). The impact of Zn and Cd heavy metals on the growth and some physiological characteristics of spinach. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 8(2), 144-153. <https://doi.org/20.1001.1.25885073.1398.8.2.2.0>
- [111]. Wanitsawatwichai, K., & Sampanpanish, P. (2021). The combination of phytoremediation and electrokinetics remediation technology on arsenic contaminated remediation in tailing storage facilities from gold mine. *Heliyon*, 7 (8), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e0773>
- [112]. White, P.J., & Pongrac, P. (2017). Heavy-metal Toxicity in Plants. *Plant Stress Physiology*, 2(5), 301-332. <https://doi.org/10.1079/9781780647296.0300>
- [113]. Xiong, H., Duan, C., Xinxiang, A., & Chen, M. (2013). Response of scutellarin content to heavy metals in *Erigeron breviscapus*. *International Journal of Environmental Science and Development*, 4, 277-281. DOI: 10.7763/IJESD.2013.V4.353
- [114]. Zareh reshqueih, M., Hamidian, A.H., & Jabbarian Amiri, B. (2018). Investigating heavy metal pollution in soil and plant (*Astragalus sp.*) in lands around Khotoun Abad melting plant. *Journal of Natural Environment*, 71(2), 185-195. <https://doi.org/10.22059/jne.2018.250891.1472> [in Farsi]
- [115]. Zeinali nejad, M., & Farami, M. (2015). The Case Study of Miduk Copper Mine with and Emphasis on Concentration of Heavy Metals in Soil and Plants. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 10(38), 24-38. [in Farsi]
- [116]. Zhang, W., Zhao, Y., Xu, Z., Huang, H., Zhou, J., & Yang, G. (2020). Morphological and Physiological Changes of *Broussonetia papyrifera* Seedlings in Cadmium Contaminated Soil. *Journal of Plants*, 9, 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants9121698>
- [117]. Zoufan, P., Shiralipour, N., & Rastegharzadeh, S. (2016). Investigation of uptake and accumulation of zinc in *Malva parviflora*: a population collected from areas surrounding production industries of steel in Ahvaz. *Plant Process and Function*, 5 (15), 43-56. <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1395.5.15.4.7> [in Farsi].

A review on the phytoremediation of heavy metals contaminated soils in mines (Research Paper)

1- Khadijeh Khhermandar, Ph.D. Student, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2- Mohsen Hosseinalizadeh*, Associate Professor, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

alizadeh_m2001@yahoo.com

3- Ali Mahdavi, Professor, Dept. of Forest Sciences, Ilam University, Ilam, Iran.

4- Ali Mohammadian, Behbahani, Assistant Professor, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

5- Hasan Yeganeh, Associate Professor, Dept. of Rangeland Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: 3 Feb. 2024

Accepted: 24 Feb. 2025

Abstract

The extraction activities of mines, aimed at obtaining valuable economic resources, have led to significant land degradation. This degradation, in turn, has resulted in mineral residues contaminating the soil with both organic and inorganic toxic elements. Such contamination poses serious risks to ecosystems, particularly in arid and semi-arid regions, which are vulnerable to pollution spread through wind and water erosion, exacerbated by environmental stresses and high erosive forces. To address the contamination of heavy metal-laden lands and soils, a variety of technologies, including physicochemical methods, have been employed. However, these approaches tend to be costly and often generate secondary pollutants. In contrast, phytoremediation presents a more natural and cost-effective solution with minimal negative environmental impact. This method involves using resistant plant species to reduce pollutant dispersion and restore soil to acceptable biological conditions. Phytoremediation is particularly suitable for dealing with mine residues, which typically contain high concentrations of non-biodegradable metals. This review comprehensively discusses the background, concepts, applications, and mechanisms of phytoremediation. It also examines the impact of heavy metals on plants, the responses of different plant species to various metals, and their absorption and transport mechanisms. Additionally, it highlights the characteristics of resistant plants and their roles in phytoremediation, as well as hyperaccumulating species. Research findings indicate that heavy metals can adversely affect plant morphology, and that native plants possess greater potential for phytoremediation of contaminated mine soils. Consequently, future research should include a floristic inventory to identify and utilize native and suitable plant species for the rehabilitation of lands surrounding mines.

Keywords: Arid and semi-arid areas, Hyperaccumulation, Native plants, Pollutants.