فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۴۹، تابستان ۹۸

گیاه‌پالایی: فناوری پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

آزاده صالحی[۱] *

az.salehi@rifr-ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۱ **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹**

چکیده

فناوری گیاه‌پالایی یک فرآیند پایدار، ارزان‌قیمت و دوست‌دار محیط‌زیست است که استفاده توام از گیاهان و میکروارگانیزم‌ها را برای پالایش بسترهای آلوده فراهم می‌سازد. از میان روش‌های مختلف گیاه‌پالایی، سه روش تثبیت، استخراج و تصعید گیاهی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بکار می‌روند. تولید زی‌توده بالا، سیستم ریشه‌ای خوب توسعه‌یافته و یک سیستم دفاعی قوی، مهم‌ترین معیارهای کلی گیاهان برای موفقیت در فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشد. نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که در بین گیاهان مختلف، گونه‌های درختی به ویژه گونه‌های تندرشد متعلق به خانواده Salicaceae (صنوبرها و بیدها) گزینه‌های مناسبی برای استفاده در فرآیند گیاه‌پالایی می‌باشند. به‌طوری‌که این گونه‌های درختی زی‌توده زیادی تولید می‌کنند، نسبت به گونه‌های زراعی و مرتعی منابع غذایی برای چهارپایان نیستند، سیستم ریشه‌ای توسعه یافته‌ای برای جذب فلزات سنگین از خاک دارند و میزان تبخیر و تعرق زیاد در آن‌ها موجب افزایش جریان آب در درخت و انتقال فلزات به اندام‌های هوایی می‌گردد. برای افزایش کارایی فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، تکنیک‌های متعددی چون استفاده از گیاهان تراریخته، افزایش زیست‌فراهمی فلزات سنگین، افزایش رشد و تولید زی‌توده گیاه و استفاده از میکروارگانیزم‌ها پیشنهاد شده است. در نهایت از آنجایی‌که طی فرآیند گیاه‌پالایی زی‌توده گیاهی آلوده تولید می‌شود، مدیریت و دفع مناسب آن ضرورت دارد. در این مطالعه فرآیند گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری پایدار برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از جنبه‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: پالایش سبز، فلزات سنگین، خاک آلوده، تثبیت گیاهی، استخراج گیاهی.

۱- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

Human & Environment., No. 49, Summer 2019

Phytoremediation: A Remediation Technology of Heavy Metal Contaminated Soils

Azadeh Salehi [1*] *(Corresponding Author)*
az.salehi@rifr-ac.ir

Abstract

Phytoremediation is a sustainable cost effective and ecofriendly technique that employs plants and microorganisms for the cleanup of contaminated environments. Among different techniques of phytoremediation, three methods include phytostabilization, phytovolatilization and phytoextraction are used for the removal heavy metals from contaminated soils. Capability of accumulating high levels of heavy metals, large biomass production, the extensive root system, strong defense system and no entrance of produced biomass to food chain are the most important properties of suitable plants for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. The results of several studies have shown that among different plants, the family Salicaceae is attended as suitable candidates for phytoremediation of heavy metal contaminated soils due to fast growth, wide-spreading root system, metal tolerance and ability to accumulate heavy metals. Various techniques to enhance of phytoremediation efficiency of heavy metal contaminated soils have been subjected such as the use of transgenic plants, increase of bioavailability of heavy metals in soil, increase of plant growth and biomass production and the use of microorganisms. Finally, since lot of biomass is produced during this process, it needs proper disposal and management. In this study, the phytoremediation is discussed as a sustainable technology for remediation of heavy-metal contaminated soils from different aspects.

Key Words: Phytoremediation, Heavy Metals, Contaminated Soil, Phytostabilization, Phytoextraction

1 Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I.R. Iran. **(Corresponding Author)*

مقدمه

فلزات سنگین جزء آلاینده‌های غیرآلی بوده و می‌توانند در هر کجای طبیعت، در اکوسیستم‌های آبی و خاکی و حتی در اتمسفر موجود باشند. آلودگی خاک با فلزات سنگین از طریق فرسایش طبیعی سنگ‌ها و فعالیت‌های بشر از قبیل احتراق سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، تصفیه سنگ‌های حاوی فلز، دفع کنترل‌شده و نشده پساب‌ها، استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و مواد رنگی اتفاق می‌افتد (۱). در چند دهه اخیر، آلودگی خاک با فلزات سنگین به دلیل پایداری طولانی‌مدت فلزات سنگین در خاک و تاثیرات زیان‌بار بوم‌شناختی تبدیل به یک بحران زیست‌محیطی شده است (۲). روش‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که اغلب آن‌ها علاوه بر هزینه زیاد منجر به تخریب ساختار فیزیکی و شیمیایی و فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند (۳)، بنابراین بهتر است تا حد ممکن از روش‌های زیستی مناسب، طبیعی، مقرون‌به‌صرفه و در محل استفاده شود.

فناوری گیاه‌پالایی[1] در دهه‌های اخیر توجه ویژه‌ای را به‌عنوان روشی مؤثر، ارزان‌قیمت و دوست‌دار محیط‌زیست برای حذف، جابجایی و یا غیرفعال کردن آلاینده‌ها از خاک‌های آلوده به خود جلب کرده است. هدف اصلی این فرآیند استفاده از پتانسیل طبیعی پوشش گیاهی در جهت رفع آلودگی آب، خاک و هوا از فلزات سنگین و مواد آلی سمی می‌باشد. گیاهان همیشه اهمیت تعیین‌کننده‌ای در زندگی بشر داشته‌اند. گیاهان از طریق فراهم کردن منابع تجدیدشدنی غذا، سوخت و فیبر در طول هزاران سال، از موجودیت زندگی انسان حمایت کرده‌اند (۴). گیاه‌پالایی که فرآیند حاصل از عمل مشترک گیاه و میکروارگانیزم‌ها می‌باشد، از نظر اقتصادی قابل رقابت با انواع روش‌های پالایش متداول موجود می‌باشد. گیاه‌پالایی یک فرآیند طبیعی بوده و با انرژی خورشیدی انجام می‌شود و به صورت در محل قابل انجام است، در نتیجه نیازی به حفاری یا جابجایی خاک ندارد. همچنین تجهیزات مورد نیاز این روش در مقایسه با روش‌های پالایش دیگر بسیار اندک است (۵).

روش‌های مختلف گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده شامل تبدیل گیاهی[2]، ترغیب گیاهی[3]، تصعید گیاهی[4]، تثبیت گیاهی[5] و استخراج گیاهی[6] است که سه روش تثبیت (تثبیت و کاهش تحرک آلاینده در خاک توسط گیاهان از طریق فرآیندهای جذب، رسوب و ایجاد کمپلکس)، استخراج (جذب آلاینده از خاک توسط ریشه گیاهان و انتقال و تجمع آن‌ها در اندام هوایی گیاه) و تصعید گیاهی (جذب آلاینده از خاک و انتقال آن‌ها به صورت بخار به جو) برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بکار می‌رود (۴).

ایده استفاده از گیاهان برای جذب آلاینده‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Cheney معرفی شد، اما سابقه استفاده از این روش به حدود ۳۰۰ سال قبل باز می‌گردد (۶). این روش در سال‌های اخیر به دلیل حداقل عوارض زیست‌محیطی، عدم نیاز به پرسنل تخصصی و تجهیزات گران قیمت، هزینه‌های پایین، تولیدات گیاهی قابل بازیافت، استفاده از آن به‌صورت در محل و در مقیاس وسیع، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۷). پژوهش‌های متعدد انجام شده بیان‌گر آن است که گیاهان مختلف نظیر گونه‌های زراعی، مرتعی و درختی قادر به جذب فلزات سنگین از محیط کشت خود می‌باشند. لیکن، اغلب گیاهان بیش‌انباشته‌گر فلزات سنگین متعلق به گونه‌های زراعی و مرتعی هستند. گیاهان بیش‌انباشته‌گر قادر به تجمع مقادیر بالای فلزات سنگین در برگ‌های خود می‌باشند (۸). برای مثال گیاهانی چون *Thlaspi caerulescens*، *Holumaniastrum robertii*، *Astragalus*

1- Phytoremediation

2- Phytotransformation-Phytodegradation
3- Rhizodegradation-Phytostimulation
4- Phytovolatilization
5- Phytostabilization
6- Phytoextraction

Sebertia و *Berkheya coddii* ،*racemosus* *acuminate* به عنوان گیاهان بیش‌انباشته‌گر فلزات سنگین معرفی شده‌اند (۹، ۱۰). اما با توجه به رشد کم این گیاهان، زی‌توده کل تولید شده محدود بوده و در نتیجه جرم کلی فلزات تجمع‌یافته پایین خواهد بود (۴).

در مقابل، گونه‌های درختی دارای صفات ویژه‌ای می‌باشند که آن‌ها را برای جذب آلاینده‌ها از محیط رشد مناسب می‌سازد. برای مثال گونه‌های درختی زی‌توده زیادی تولید می‌کنند، نسبت به گونه‌های زراعی و مرتعی منابع غذایی برای چهارپایان نیستند، سیستم ریشه‌ای توسعه یافته‌ای برای جذب فلزات سنگین از خاک دارند و میزان تبخیر و تعرق زیاد در آن‌ها موجب افزایش جریان آب در درخت و انتقال فلزات به اندام‌های هوایی می‌گردد (۵). در بین گونه‌های درختی، گونه‌های متعلق به خانواده Salicaceae از قبیل صنوبرها و بیدها نه تنها به دلیل رشد سریع و تولید زی‌توده بالا، سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده و جذب بالای آب (۱۱)، بلکه به دلیل مقاومت و ظرفیت انباشت بالای فلزی و ایجاد کلن‌های اصلاح شده متعدد از این خانواده، گزینه‌های ایده‌آلی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین معرفی شده‌اند (۴، ۱۲، ۱۳). به‌طوری‌که Fischerova´ و همکاران (۱۴) در بررسی خود نشان دادند که توانایی پالایش خاک آلوده به فلزات سنگین کادمیم، سرب، آرسنیک و روی در *Salix dasyclados* به مانند گیاهان بیش‌انباشته‌گر *Arabidopsis halleri* و *Thlaspi caerulescens* بود. تحقیقات انجام شده در داخل کشور توسط محققین مختلف نیز حاکی از توانایی استقرار و پتانسیل گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گونه‌های درختی متعدد نظیر زیتون (*Olea europea L.*) (۱۵)، کاج تهران (*Pinus eldarica*) (۱۶)، اقاقیا (*Robinia pseudoacacia*) (۱۷)، بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) و پسته وحشی (*Pistacia atlantica*) (۱۸)، اکالیپتوس (*Eucalyptus occidentalis*) (۱۹)، توت سفید (*Morus alba*) و سپیدار (*P. alba*) (۲۰) ، زبان گنجشک (*Fraxinus rotundifolia*) ، نارون چتری (*Ulmus densa*) و بید سفید (*S. alba*) (۲۱) و تبریزی (*P. nigra*) و سپیدار (*P. alba*) (۵) می‌باشد. پژوهش‌های خارجی متعدد نیز موید توانایی گونه‌های درختی متعدد در پالایش بسترهای آلوده به فلزات سنگین می‌باشد، که در این زمینه می‌توان به یافته‌های محققینی چون Lingua و همکاران (۲۲)، Borghi و همکاران (۲۳)، Pietrini و همکاران (۲۴) و Ma و همکاران (۲۵) (بر روی کلن‌های مختلف صنوبر و بید)، Arriagada و همکاران (۲۶) (*Eucalyptus globulus*)، Bojarczuk و Kieliszewska-Rokicka (۲) (*Betula pendula*) وFerna´ndez و همکاران (۲۷) (*Betula celtiberica*) اشاره کرد.

در حقیقت ایجاد یک شالوده صحیح برای تحقق راهکار اکولوژیکی "گیاهان برای سیاره سالم" در مقیاس جهانی ضروری به نظرمی‌رسد، که تحقق این راهکار نیاز به آشنایی با مباحث مرتبط با اهمیت گیاهان برای زیست‌کره دارد. از آنجایی‌که گیاه‌پالایی به‌عنوان یک فناوری پایدار، ارزان‌قیمت و دوست‌دار محیط‌زیست که براساس استفاده مستقیم از گیاهان زنده برای پالایش بسترهای آلوده بنا نهاده شده، امروزه موضوع تحقیقاتی مهمی را در پژوهش‌های گیاهی به خود اختصاص داده است، از این‌رو در مطالعه حاضر گیاه‌پالایی به عنوان فناوری پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

آلودگی خاک با فلزات سنگین

فلزات سنگین به عناصری با خصوصیات فلزی گفته می‌شود که عدد اتمی آن‌ها بیش‌تر از ۲۰ و وزن مخصوص آن‌ها بیش‌تر از ۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب باشد. تا کنون ۶۰ فلز سنگین شناسایی شده است و در این میان فلزات گران قیمتی مانند پلاتین، نقره و طلا نیز یافت می‌شود (۲۸). برخی از فلزات سنگین نظیر روی (Zn)، مس (Cu)، آهن (Fe)، منگنز (Mn) و نیکل (Ni) جزء عناصر ضروری و مفید در فیزیولوژی گیاهان و جانوران هستند. این عناصر در کاتالیز آنزیمی، انتقال الکترون، متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و ... نقش دارند (۲۹). با این وجود مقدار بیش از حد نیاز یک عنصر ضروری نیز

می‌تواند اثر مخربی بر رشد و نمو موجود زنده داشته باشد. از سوی دیگر فلزات سنگینی چون کادمیم (Cd)، جیوه (Hg)، سرب (Pb) و آرسنیک (As) هیچ نقش مفیدی زیستی ندارند (۳۰). از دلایل سمیت فلزات سنگین برای موجودات زنده می‌توان به ایجاد تنش اکسیداتیو در نتیجه تحریک رادیکال‌های آزاد، اتصال به مولکول‌های آلی و تخریب آن‌ها، جایگزینی دیگر فلزات ضروری در رنگدانه‌ها یا آنزیم‌ها و تخریب کارکرد آن‌ها، اتصال به گروه‌های سولفیدریل در پروتئین‌ها و در نتیجه برهم‌زدن ساختار و کارکرد پروتئین‌ها و ... اشاره کرد (۳۱). فلزات سنگین جزء آلاینده‌های غیرآلی هستند و می‌توانند در هر کجای طبیعت، در اکوسیستم‌های آبی و خاکی و حتی در اتمسفر موجود باشند. در واقع فلزات سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی از نظر شیمیایی قابل تجزیه نیستند.

یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی فلزات سنگین خاک، سنگ بستر است. به‌طوری‌که ترکیب و غلظت طبیعی فلزات سنگین موجود در خاک به نوع مواد مادری و شرایط آب و هوایی طی فرآیند هوازدگی، بستگی دارد (۳۲). از سوی دیگر فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری بشر نیز منجر به افزایش سطح فلزات سنگین در زیست‌بوم می‌شود (۱). منابع آلودگی فلزات سنگین در کشاورزی شامل مصرف کودهای آلی و معدنی، کاربرد آهک برای افزایش pH خاک، لجن فاضلاب، آب آبیاری، آفت‌کش‌ها و ... می‌باشد. کودهای معدنی به‌خصوص کودهای فسفاته دارای مقادیر متفاوتی از فلزات سنگین روی، سرب، نیکل، کروم و کادمیم هستند. همچنین کود دامی از کبالت، مس، روی و منگنز و لجن فاضلاب از مس، کادمیم، نیکل، سرب، کروم و روی غنی می‌باشد (۲۸). هر چند مقدار فلزاتی که به خاک‌ها اضافه می‌شوند به‌طور معمول در مقادیر کم است، اما باید به این واقعیت توجه کرد که کاربرد مکرر کودها در مزارع و ماندگاری طولانی‌مدت فلزات سنگین در خاک، در درازمدت منجر به آلودگی خاک می‌شود.

منابع صنعتی آلودگی فلزات سنگین شامل استخراج معادن و بازیافت فلزات، صنایع پلاستیک‌سازی، نساجی و فولادسازی، کارخانه‌های ذوب و استخراج فلزات، فرآوری کاغذ، پالایشگاه‌ها و ... می‌باشد. در واقع صنایع مختلف بسته به فعالیت خود منجر به ورود فلزات سنگین به محیط‌زیست می‌شوند، به‌طوری‌که طی ۱۰۰ سال اخیر صنایع سهم عمده‌ای در افزایش سطح فلزات سنگین زیست‌بوم داشته‌اند. در واقع تمام فلزاتی که از معادن استخراج می‌شوند، در نهایت در زیست‌بوم پراکنده شده و عموما" به آب و خاک راه می‌یابند (۳۳). منابع شهری فلزات سنگین شامل خاکستر حاصل از سوزاندن و دفن زباله‌ها در خاک، تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی (ذغال سنگ و نفت)، منابع حاصل از اشکال مختلف حمل و نقل و ... می‌باشد (۲۸). از سوی دیگر با توجه به کمبود منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک و افزایش نیاز به آب آبیاری، لجن فاضلاب‌ها و پساب‌های صنعتی و شهری به عنوان منابعی عمده برای آب اهمیت یافته‌اند (۱۷). یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از این پساب‌ها و لجن‌ها در کشاورزی، افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک است (۱۶).

قوانین و استانداردهای متعددی برای تعیین غلظت مجاز فلزات سنگین در خاک تعیین شده است، که این قوانین و استانداردها به عنوان راهنمایی برای ارزیابی سطح آلودگی در خاک بکار می‌روند. در جدول ۱، متوسط غلظت جهانی فلزات سنگین در خاک و رنجی از حداکثر غلظت مجاز فلزات سنگین در خاک کشاورزی و همچنین رنج طبیعی فلزات سنگین در بافت گیاهی آمده است (۸).

روش‌های پالایش خاک آلوده به فلزات سنگین

با توجه به این‌که خاک‌های آلوده به فلزات سنگین برای کشاورزی و سایر کاربری‌ها مناسب نمی‌باشند، از این رو پالایش خاک‌های آلوده از اهمیت زیادی برخوردار است. در واقع جابجایی، حذف و یا تخفیف اثر آلاینده‌های زیست‌محیطی بر پایه روش‌های علمی و پژوهشی پیشرفته یک ضرورت محسوب می‌شود. فلزات سنگین به‌طور شیمیایی قابل تجزیه نمی‌باشند و باید به طور فیزیکی جابجا شده و یا به صورت آلی درآیند (۱). در کل، خاک آلوده به فلزات سنگین را می‌توان به روش‌های

فیزیکی، شیمیایی و زیستی پالایش کرد که این روش‌های پالایش به دو گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شوند (۷): ۱) پالایش در محل[1] و ۲) پالایش خارج از محل[2]. در پالایش در محل، پاک‌سازی خاک آلوده بدون حفاری، جابجایی و انتقال خاک صورت می‌گیرد، اما در پالایش خارج از محل لازم است خاک آلوده به فلزات سنگین را حفاری و در جای دیگر دفن کرد که این امر خطر انتقال آلودگی به مناطق دیگر را بالا خواهد برد (۳۴). در واقع، پالایش در محل مزایای مطلوبی نسبت به پالایش خارج از محل نظیر حفظ زیست‌بوم، کاهش دست‌خوردگی خاک و کاهش هزینه‌های پالایش خاک دارد.

روش پالایش فیزیکی خاک مبتنی بر استفاده از عوامل فیزیکی و مکانیسم‌هایی نظیر گرم کردن، سوزاندن، هوادهی و ... می‌باشد. در مقابل، در پالایش شیمیایی با استفاده از حلال‌ها و ترکیبات شیمیایی، شستشوی خاک و نیز انجام فرآیندهای اکسایش و کاهش، جداسازی، رسوب و یا تبدیل آلاینده‌ها انجام می‌شود (۳۵). پالایش فیزیکی و شیمیایی خاک گرچه موثر می‌باشد، ولی در اکثر موارد گران بوده و نیازمند نیروی کار زیاد و هزینه‌های مهندسی قابل توجهی است. علاوه براین، تکنیک‌های به‌کار رفته در این نوع پالایش‌ها سبب تغییرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و کاربری اراضی را برای رشد گیاه و تولید محصولات کاهش می‌دهند. همچنین این روش‌ها در سطوح به نسبت کوچک قابل استفاده بود و برای مناطقی با وسعت زیاد نامناسب می‌باشند (۳). بنابراین بهتر است تا حد ممکن از روش‌های طبیعی و زیستی استفاده شود. پالایش زیستی[3] فرآیندی است که از موجودات زنده (باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، پلانکتون‌ها، پروتوزوآها و گیاهان) برای پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده استفاده می‌شود (۳۶).

1- In-situ
2- Ex-situ
3- Bioremediation

جدول ۱- متوسط غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه (۸)

فلز سنگین	متوسط غلظت جهانی فلزات سنگین در خاک (mg/kg)	رنجی از حداکثر غلظت مجاز فلزات سنگین در خاک کشاورزی (mg/kg)	رنج طبیعی فلزات سنگین در بافت گیاهی(mg/kg)
آرسنیک (AS)	۶/۸۳	۲۰-۱۵	۱-۱/۷
کادمیم (Cd)	۰/۴۱	۵-۱	۰/۰-۰۵/۲
کبالت (Co)	۱۱/۳	۵۰-۲۰	۰/۰۲ -۱
کروم (Cr)	۵۹/۵	۲۰۰-۵۰	۰/۱ -۰/۵
جیوه (Hg)	۰/۰۷	۰/۵-۵	-
مولیبدن (Mo)	۱/۱	۱۰-۴	۰/۵-۲
نیکل (Ni)	۲۹	۶۰-۲۰	۰/۵-۱
سرب (Pb)	۲۷	۳۰۰-۲۰	۱۰-۵
مس (Cu)	۳۸/۹	۱۵۰-۶۰	۳۰-۵
روی (Zn)	۷۰	۳۰۰-۱۰۰	۱۵۰-۲۷
منگنز (Mn)	۴۸۸	-	۳۰۰-۳۰

گیاه‌پالایی

فناوری پالایش خاک با محوریت گیاه با نام گیاه‌پالایی بخشی از پالایش زیستی است که در آن با استفاده از گیاهان و برهم‌کنش مثبت و همیاری با موجودات زنده خاک، آلاینده‌های آلی (آفت‌کش‌ها، مواد منفجره، ترکیبات محافظ چوب، شوینده‌های کلری و ...) و غیرآلی (فلزات سنگین، رادیونوکلیدها و ترکیبات دیگری نظیر NH_4، NO_3، PO_4، ClO_4 و ...) از بستر آلوده به صورت در محل و خارج از محل پالایش می‌شوند (۲۶). ایده استفاده از گیاه برای جذب و برداشت فلزات و سایر آلاینده‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Cheney معرفی شد، اما سابقه استفاده از این روش به حدود ۳۰۰ سال قبل باز می‌گردد (۶). این روش در سال‌های اخیر به دلیل حداقل عوارض زیست محیطی، عدم نیاز به پرسنل تخصصی، هزینه‌های پایین، تولیدات گیاهی قابل بازیافت و استفاده از آن به‌صورت در محل توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۳۷) و تحقیق بر روی گونه‌های گیاهی مناسب جهت اصلاح بسترهای آلوده همچنان ادامه دارد. در واقع گیاهان با آب و خاک از طریق ریشه‌ها و با هوا از طریق برگ‌ها در تماس بوده و بنابراین هم‌زمان با سه محیط‌زیست مختلف در حال فعل و انفعال و تاثیر متقابل می‌باشند. تاثیرات متقابل میکروبی- خاک- گیاه فرآیندهای منحصر به فردی را ایجاد می‌کند که کل متابولیسم گیاهی و همچنین تغییر شکل آلاینده را تحت تاثیر قرار می‌دهند. سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته نیز به گیاهان اجازه می‌دهد که مناطق بزرگی از خاک را در عمق‌های مختلف کنترل کنند. همچنین سطوح بزرگ برگ‌های گیاهان، جذب آلاینده‌ها از هوا را امکان‌پذیر می‌سازد و در کل می‌توان گفت گیاهان دستگاه‌های مورد نیاز برای مجموعه کامل فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی دفع مسمومیت را دارا می‌باشند. در جدول ۲ برتری‌ها و کاستی‌های این فناوری به اختصار آمده است. روش‌های مختلف گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده شامل تبدیل گیاهی، ترغیب گیاهی، تصعید گیاهی، تثبیت گیاهی و استخراج گیاهی است که در شکل ۱ و جدول ۳ خلاصه‌ای از آن‌ها ذکر شده است (۴).

جدول ۲- برتری‌ها و کاستی‌های فناوری گیاه‌پالایی (۷)

برتری‌ها	کاستی‌ها
کارایی در پالایش طیف وسیعی از آلاینده‌ها (آلی و غیر آلی) و مناطق آلوده	پالایش منطقه آلوده ممکن است مدت زمان زیادی طول بکشد.
قابلیت پالایش در محل و خارج از محل	محدود بودن پالایش به محدوده ریشه‌دوانی گیاهان پالاینده
کاهش میزان تخریب خاک نسبت به روش‌های سنتی پالایش خاک	محصول فرآیند گیاه پالایی ممکن است در گروه زباله‌های خطرناک قرار گیرد.
کاربرد این فناوری در مقیاس وسیع باعث ذخیره انرژی خورشید می‌شود.	نگرانی از بابت مصرف گیاهان آلوده و در نتیجه انتقال آلاینده به زنجیره غذایی
هزینه‌های کم (حداقل یک دهم هزینه‌های روش‌های مرسوم پالایش)	امکان رهاسازی مجدد آلاینده‌های انباشته شده در گیاهان در زیست‌بوم
کارایی این فناوری بیش‌تر و در مقابل تخریب آن کم‌تر است.	محدود بودن به مناطقی با غلظت‌های پایین و متوسط آلاینده
عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت و افراد متخصص	تاثیر احتمالی گونه‌های غیر بومی بر تنوع زیستی منطقه
سازگار با زیست‌بوم و از منظر عمومی خوشایندتر	ممکن است توانایی پالایش ۱۰۰٪ آلاینده‌ها را نداشته باشد.
کاهش حجم ضایعات و زباله‌های باقی‌مانده (بیش از ۹۵ درصد)	به سازگاری گیاه پالاینده با شرایط منطقه آلوده بستگی دارد.

جدول ۳- خلاصه‌ای از روش‌های مختلف گیاه‌پالایی خاک آلوده (۴)

مکانیسم پالایش	هدف فرآیند
تبدیل گیاهی	جذب، تجمع و تغییر شکل کامل یا جزئی مولکول‌های آلاینده‌های آلی در بافت‌های گیاهی
ترغیب گیاهی	تجزیه و تخریب میکروبی آلاینده‌های آلی خاک از طریق افزایش کربن آلی خاک، جمعیت باکتری‌ها و قارچ‌های ریشه و ترشحات یا آنزیم‌های گیاهی رها شده از ناحیه ریشه
تصعید گیاهی	جذب آلاینده‌های آلی و غیرآلی از خاک توسط گیاهان و انتقال آن‌ها به صورت بخار به جو
تثبیت گیاهی	تثبیت و کاهش تحرک آلاینده در خاک توسط گیاهان از طریق فرآیندهای جذب، رسوب و ایجاد کمپلکس
استخراج گیاهی	جذب آلاینده‌ها (اغلب فلزات) از خاک بوسیله ریشه گیاهان و انتقال و تجمع آن‌ها در اندام هوایی گیاه

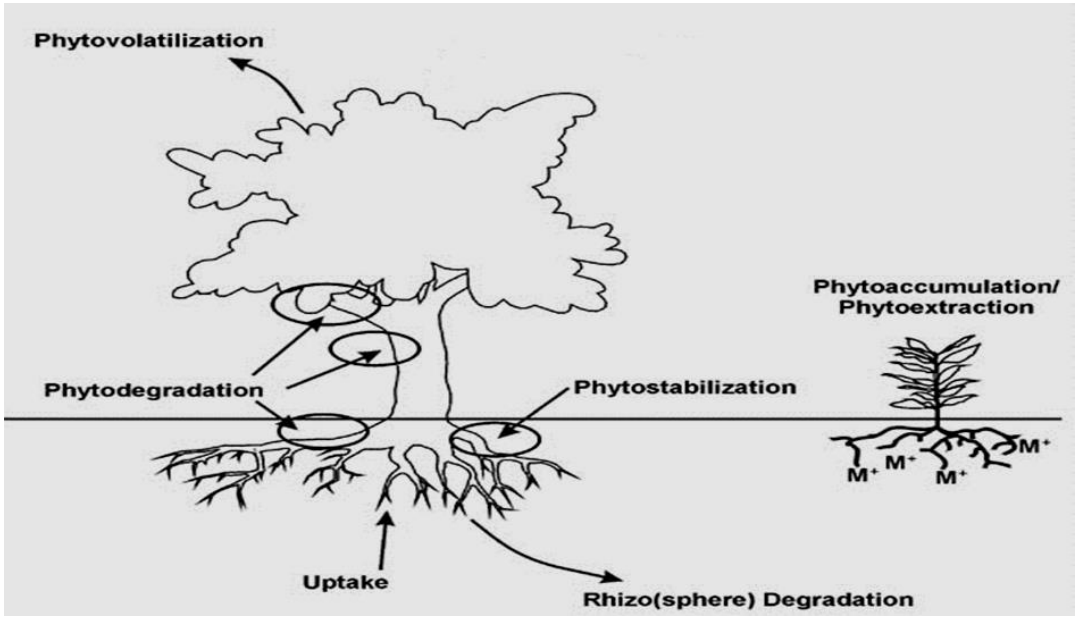
گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

از میان روش‌های مختلف گیاه‌پالایی، سه روش تثبیت، استخراج و تصعید گیاهی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بکار می‌رود.

تثبیت گیاهی

تثبیت گیاهی براساس توانایی گیاهان در تثبیت و کاهش تحرک فلزات و ترکیبات شیمیایی آبگریز در خاک، رسوبات و لجن از طریق فرآیندهای جذب، رسوب و ایجاد کمپلکس، استوار می‌باشد. با کاربرد این روش، از انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌شود. افزون بر آن، استقرار پوشش گیاهی و ریشه‌دوانی آن با جلوگیری از فرسایش بادی از پخش شدن آلاینده‌ها می‌کاهد. در واقع، این روش شبکه خاک را تثبیت کرده و فرسایش خاک و جابجایی آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. حجم و تراکم ریشه‌ها در خاک یک عامل اصلی در

کارآیی این روش محسوب می‌شود. در این روش در برخی موارد، گیاهان به دلیل تعرق مقادیر زیاد آب با کنترل هیدرولیکی از حرکت شیرابه‌های آلوده به سوی آب‌های زیرزمینی یا سایر منابع آبی نیز جلوگیری می‌کنند. تثبیت گیاهی به ویژه در مواردی که سطح آلودگی پایین بوده و یا در آلودگی‌های گسترده که سایر روش‌های پالایش در محل کارآمد نیست، بهترین راهکاراست. در مناطقی که غلظت آلاینده‌ها بالا باشد، اجرای تثبیت گیاهی به دلیل سمیت زیاد ممکن است با مشکل مواجه شود که در این صورت افزودن بهسازهای خاک از جمله عناصر غذایی، آهک، مواد آلی، کود حیوانی، کمپوست و ... توصیه می‌شود (۴).



شکل ۱- روش‌های مختلف گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده (شکل فوق بیان‌گر این مطلب است که روش‌های مختلف گیاه‌پالایی در کدام قسمت گیاه اتفاق می‌افتد.)

استخراج گیاهی

استخراج گیاهی مربوط به جذب آلاینده‌ها (اغلب فلزات) از خاک، رسوبات و لجن‌های آلوده بوسیله ریشه گیاهان و انتقال و تجمع آن‌ها در اندام هوایی گیاه می‌باشد. استخراج گیاهی کارآمدترین روش گیاه‌پالایی در حذف فلزات از خاک‌های آلوده است. در واقع در نتیجه فرآیند جذب، فلزات در گیاه انباشته و به زی‌توده گیاه اضافه می‌شوند. گیاهانی که برای استخراج گیاهی بکار می‌روند باید پنج ویژگی اصلی داشته باشند: ۱) تحمل به سطوح بالای فلزات سنگین در محیط رشد، ۲) پتانسیل تجمع فلزات سنگین، ۳) نرخ رشد سریع، ۴) تولید زی‌توده بالا، ۵) سیستم ریشه‌ای گسترده و عمیق (۳۸). کارایی روش استخراج گیاهی متاثر از گونه گیاهی، زیست‌فراهمی فلز برای ریشه گیاه پالاینده، جذب فلز بوسیله ریشه، انتقال فلز از ریشه به اندام هوایی و تحمل گیاه به تنش فلز سنگین می‌باشد (۳۹). در واقع استفاده از گیاهان چند ساله سریع‌الرشد با سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته و زی‌توده هوایی انبوه بیش از سایر گیاهان در روش استخراج گیاهی می‌تواند باصرفه باشد. البته گیاهانی با تولید زی‌توده پایین اما با پتانسیل تجمع بالای فلزی (گیاهان بیش‌انباشته‌گر) نیز می‌توانند با موفقیت در این

روش استفاده شوند. در واقع برخی از گیاهان عالی راهکارهایی برای مقاومت به تنش ناشی از فلزات سنگین دارند که آن‌ها را قادر به رشد و نمو در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌سازد. برای مثال، در گیاهان فلزدوست[1]تجمع غیرسمی فلز در برگ‌ها، تثبیت فلز در ریشه و یا سمیت‌زدایی فلز بوسیله خزان برگ‌ها از جمله راهکارهای احتمالی مقاومت به فلز سنگین است. درحالی‌که در گیاهان شبه‌فلزدوست[2]تثبیت فلز بیش‌تر در ریشه صورت می‌گیرد (۴۰).

تصعید گیاهی

تصعید گیاهی عبارت است از استفاده از گیاهان برای جذب آلاینده‌های آلی و غیرآلی از آب و خاک و انتقال آن‌ها به‌صورت بخار به جو. ترکیبات آزاد شده پس از تصعید ممکن است توسط رادیکال‌های آزاد موجود در جو تجزیه شده و یا به‌صورت آلاینده در هوا باقی بمانند که در این‌صورت به دلیل پخش آلاینده در حجم بزرگ ممکن است از خطر آن‌ها کاسته شود. این روش آلاینده‌ها را از زیست‌بوم حذف نمی‌کند بلکه می‌تواند آن‌ها را از آب و خاک به هوا منتقل کند. در واقع تصعید گیاهی برای جلوگیری از پخش آلاینده در درون خاک و آلودگی آب‌های زیرزمینی توصیه می‌شود. تصعید گیاهی اولین بار برای برداشتن جیوه استفاده شد (۷). همچنین گزارشاتی مبنی بر تصعید گیاهی تری‌کلرواتیلن (TCE) به‌وسیله صنوبر تبریزی (۴۱)، متیل‌تتری‌آریبوتیل‌اتر (MTBE) به‌وسیله اکالیپتوس (۴۲)، سلنیوم به‌وسیله خردل هندی (۴۳) و متیل جیوه بوسیله تنباکو (۴۴) و صنوبر تبریزی (۴۵) وجود دارد.

برای افزایش کارایی فرآیند گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تکنیک‌هایی از قبیل ۱) استفاده از گیاهان مهندسی ژنتیکی شده به کمک ژن‌های بیش‌انباشته‌گر یا گیاهانی با خاصیت تحمل‌پذیری بالا به فلزات سنگین و تولید زی‌توده بالا که بتوانند در شرایط آب و هوایی مختلف رشد کنند و به طور غیرطبیعی قابلیت تجمع مقادیر بالای فلزات سنگین را داشته باشند، ۲) افزایش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک برای جذب توسط گیاه، ۳) استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی به منظور افزایش رشد و تولید زی‌توده گیاه، ۴) استفاده از میکروارگانیسم‌های خاک به عنوان یک منبع طبیعی، ارزان و سالم که می‌تواند اثرات چند جانبه شامل ترشح عوامل کلات‌کننده، فاکتورهای تنظیم‌کننده رشد و افزایش زی‌توده گیاه در فرآیند گیاه‌پالایی را به همراه داشته باشد و ... پیشنهاد شده است (۴۶).

برداشت زی‌توده گیاهی آلوده حاصل از فرآیند گیاه‌پالایی (روش استخراج گیاهی) و دفع آن به‌عنوان یک پسماند خطرناک اهمیت زیادی داشته و باید مطابق با مقرارت حفاظت و اصلاح منابع[3]صورت گیرد. زیرا احتمال ورود آلاینده‌ها به زنجیره غذایی از طریق مصرف زی‌توده گیاهی حامل آلاینده بوسیله دام و حیات وحش وجود دارد. در واقع پس از برداشت گیاهان سرشار از فلز ۱) می‌توان وزن و حجم مواد آلوده را با خاکستر کردن یا کمپوست کردن کاهش داد (۳۸)؛ ۲) گیاهان سرشار از فلز را می‌توان به عنوان زباله‌های خطرناک دفن کرد؛ ۳) اگر توجیه اقتصادی داشته باشد می‌توان فلز را از زی‌توده گیاهی بازیافت کرد؛ ۴) همچنین می‌توان این گیاهان را برای مصارف غیرخوراکی مانند صنایع چوب بکار برد (۴۷). شایان ذکر است که برای ارزیابی کارآیی و اثر بخشی فناوری گیاه‌پالایی، باید کنترل مداومی روی زی‌توده گیاهی تولید شده و همچنین منابع آب و خاک تحت فرآیند پالایش صورت گیرد و فقط زمانی که نتایج مطلوبی از تمام بررسی‌ها بدست آید، می‌توان نتیجه گرفت که اهداف پالایش حاصل شده است.

گیاهان پالاینده خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

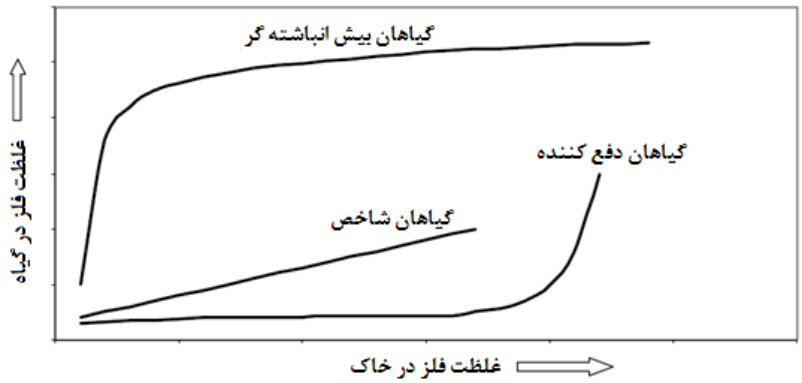
میزان جذب آلاینده فلزی از خاک توسط گیاه پالاینده علاوه بر خصوصیات خاک، به نوع فلز سنگین، گونه گیاهی و سن گیاه نیز بستگی دارد. با توجه به این‌که پتانسیل جذب و تجمع فلزات سنگین در بین گونه‌های گیاهی متفاوت است، از این رو موفقیت فرآیند گیاه پالایی مرهون انتخاب صحیح گیاه پالاینده است (۴۸). گیاهان رشد یافته در خاک‌های آلوده به

1- Metallophyte
2- Pseudometallophyte
3- Resources Conservation and Recovery Act

فلزات سنگین براساس غلظت آلاینده فلزی در اندام‌های گیاه در برابر افزایش غلظت فلز سنگین در خاک به سه گروه تقسیم می‌شوند (شکل ۲): ۱) دفع‌کننده فلز:[1] این گیاهان از جذب فلزات سنگین تا آستانه خاصی، جلوگیری کرده ولی پس از این آستانه، فلزات را جذب می‌کنند؛ اما در برابر افزایش غلظت آلاینده فلزی در اندام‌های هوایی خود در حد بحرانی مقاومت دارند، به‌طوری‌که در خاک‌هایی با غلظت بالای فلزی، این گیاهان فقط فلزات را در ریشه‌های خود نگه داشته و از انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی جلوگیری می‌کنند؛ ۲): معرف یا شاخص فلزی:[2] در این گیاهان جذب آلاینده فلزی به‌صورت خطی متناسب با افزایش غلظت فلز در خاک زیاد می‌شود، بنابراین غلظت آلاینده فلزی در این گیاهان می‌تواند منعکس‌کننده غلظت فلزات در خاک باشد؛

۳) بیش‌انباشته‌گرها:[3] این گیاهان به‌طور فعال غلظت‌های بالایی از فلزات را در ریشه و اندام‌های هوایی خود انباشته می‌کنند. گیاهان بیش‌انباشته‌گر به‌طور معمول گیاهانی جان سخت ولی ریز اندام هستند و تولید زی‌توده اندکی دارند. یک گیاه بیش‌انباشته‌گر باید توانایی جذب و تجمع بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر گرم فلزات مس، کادمیم، کروم، سرب، نیکل و کبالت و یا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر گرم فلزات روی و منگنز را در ماده خشک گیاهی دارا باشد. تاکنون بالغ بر ۴۰۰ گونه گیاهی از ۲۲ خانواده به عنوان گیاهان بیش‌انباشته‌گر شناسایی شده‌اند. بیش‌تر گیاهان بیش‌انباشته‌گر متعلق به خانواده *Brassicaceae* می‌باشد، به‌طوری‌که ۸۷ گونه از ۱۱ جنس این خانواده به عنوان گیاه بیش‌انباشته‌گر معرفی شده‌اند (۷).

1- Metal Excluder
2- Metal Indicator
3- Hyperaccumulator



شکل ۲- واکنش گیاهان نسبت به افزایش غلظت فلزات سنگین خاک (۷)

سازوکارهای مستعد سلولی برخی از گیاهان عالی برای سمیت‌زدایی و تحمل به فلزات سنگین عبارت است از ۱) مقاومت در برابر حرکت فلزات به داخل سلول‌های ریشه از طریق قارچ‌های میکوریزی همزیست شده با ریشه گیاه، ۲) اتصال به دیواره سلولی و ترشحات ریشه، به‌طوری که ترشحات ریشه‌ای می‌توانند منجر به کلاته شدن آلاینده فلزی شده و جذب آلاینده را تا مقدار معینی کاهش دهند، ۳) کاهش جریان به داخل سلول از طریق غشاء پلاسمایی (در واقع غشاء سلولی با جلوگیری یا کاهش ورود آلاینده به داخل سلول از طریق انتشار به خارج نقش مهمی در مقاومت به تنش فلز سنگین ایفا می‌کند.)، ۴) کلات شدن آلاینده فلزی توسط کلات‌های گیاهی در محیط سیتوسول سلول‌های گیاهی؛ کلات‌های گیاهی خانواده‌ای از ترکیبات فلزی پپتیدی هستند که به سرعت در گیاهان توسط تیمارهای فلز سنگین القاء می‌شوند. برای مثال در گیاه کلزا نشان داده شد که تجمع کادمیم همراه با القاء سریع کلات‌های گیاهی است و ۵) انتقال و تجمع فلزات در واکوئل، به‌طوری‌که انتشار یون‌های فلزی به خارج از غشاء پلاسمایی یا انتقال و تجمع آن‌ها در واکوئل دو سازوکار مهم جهت کاهش سطح سمیت فلز در سلول‌های گیاهی است (۲۸). در کل می‌توان گفت گیاهان مختلف نظیر گونه‌های زراعی، مرتعی و درختی قادر به جذب فلزات سنگین از محیط کشت خود می‌باشند. لیکن، اغلب گیاهان بیش‌انباشته‌گر شناسایی شده فلزات سنگین متعلق به گونه‌های زراعی و مرتعی هستند. اما با توجه به میزان رشد کم این گیاهان، میزان زی‌توده کل تولید شده محدود بوده و در نتیجه جرم کلی فلزات تجمع یافته پایین خواهد بود. در کل می‌توان گفت تولید زی‌توده بالا، سیستم ریشه‌ای خوب توسعه یافته و یک سیستم دفاعی قوی مهم‌ترین معیارهای کلی گیاهان برای موفقیت در فرآیند پالایش سبز خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشد (۴). در بین گیاهان مختلف، درختان به ویژه درختان تندرشد از قبیل صنوبرها و بیدها دارای صفات ویژه‌ای می‌باشند که آن‌ها را برای جذب آلاینده‌ها از محیط رشد مناسب می‌سازد. برای مثال گونه‌های درختی زی‌توده زیادی تولید می‌کنند، نسبت به گونه‌های زراعی و مرتعی منابع غذایی برای چهارپایان نیستند، سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته‌ای برای جذب فلزات سنگین از خاک دارند و میزان تبخیر و تعرق زیاد در آن‌ها موجب افزایش جریان آب در درخت و انتقال فلزات به اندام‌های هوایی می‌گردد (۵، ۴۹).

نتیجه‌گیری نهایی

خاک به عنوان جزئی از زیست‌کره نقش مهمی در محیط‌زیست دارد. آلودگی خاک با غلظت‌های بالای فلزات سنگین به دلیل پایداری طولانی‌مدت آن‌ها در خاک و ورود به زنجیره غذایی، تبدیل به بحرانی زیست‌محیطی شده است. نتایج پژوهش‌های متعدد حاکی از کارایی بالای گیاهان متعدد در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است. پالایش خاک با استفاده از فناوری گیاه‌پالایی دارای فواید متعددی در مقایسه با روش‌های پالایش مرسوم دارد، از این‌رو می‌تواند به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های پالایش خاک موردتوجه قرار گیرد. در

واقع گیاهان عالی می‌توانند به‌عنوان ابزارهای اکولوژیکی برای تثبیت (تثبیت گیاهی)، تصعید (تصعید گیاهی) یا حذف فلزات سنگین (استخراج گیاهی) از خاک آلوده استفاده شوند. با این وجود، بازدهی و کارایی این فناوری نیازمند ۱) بررسی نوع و غلظت یون‌های فلزی موجود در خاک، ۲) درنظر گرفتن موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر، ۳) انتخاب دقیق گیاهانی با پتانسیل گیاه‌پالایی مناسب،۴) افزایش کارایی گیاهان با استفاده از تکنیک‌های به زراعی و به نژادی و ۵) در نهایت مدیریت و دفع مناسب زی‌توده گیاهی آلوده حاصل از فرآیند گیاه‌پالایی است.

منابع

1. Gaur, A., Adholeya, A., 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. Current Science, Vol. 86, pp. 528-534.
2. Bojarczuk, K., Kieliszewska-Rokicka, B., 2010. Effect of ectomycorrhiza on Cu and Pb accumulation in leaves and roots of silver birch (*Betula pendula* Roth.) seedlings grown in metal-contaminated soil. Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 207, pp. 227-240.
3. Kramer, U., 2005. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. Current Opinion in Biotechnology, Vol. 16, pp. 133-141.
4. Kvesitadze, G., Khatisashvili, G., Sadunishvili, T., Ramsden, J.J. 2006. Biochemical Mechanisms of Detoxification in Higher Plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 245 p.

۵. صالحی، آزاده، «گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب توسط صنوبرهای بومی ایران (*Populus alba* و *Populus nigra*) همزیست شده با قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا»، رساله دکتری علوم جنگل، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، ۱۳۹۳؛ ۱۸۹ صفحه.

۶. Henry, J.R. 2000. An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury.U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation office. Washington, D.C., 55 p.

۷. Ghosh, M., Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. Applied Ecology and Environmental Research, Vol. 3, pp. 1-18.

8. Kabata-Pendias, A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants, 4th ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
9. Lasat, M.M. 2000. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. Grant, No. CX 824823.
10. Jankite, A., Vasarevicius, S., 2007. Use of Poacea f. species to decontaminate soil from heavy metals. Ekologija, Vol. 53(4), pp. 84-89.
11. Bitts´anszky, A., Gyulai, G., Gullner, G., Kiss, J., Szab´o, Z., K´atay, G., Heszky, L., K¨om´ıves, T., 2009. In vitrobreeding of grey poplar (*Populus* × *canescens*) for phytoremediation Purposes. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 84, pp. 890-894.
12. Pulford, I.D., Dickinson, N.M. 2005. Phytoremediation technologies using trees. In: Prassad MNV, Naidu R [eds.], Trace elements in the environment, 375-395. CRC Press, New York.

13. Salehi, A., Tabari Kouchaksaraei, M., Mohammadi Goltapeh, E., Shirvany, A., Mirzaei, J., 2016. Effect of mycorrhizal inoculation on black and white poplar in a lead-polluted soil. Journal of Forest Science, Vol. 62(5), pp. 223–228.
14. Fischerova, Z., Tlustos, P., Szakova, J., Sichorova, K., 2006. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements. Environmental Pollution, Vol. 144, pp. 93-100.
15. Aghabarati, A., Hosseini, S.M., Esmaili, A., Maralian, H., 2008. Growth and mineral accumulation in *Olea europeaa* L. trees irrigated with municipal effluent. Research Journal of Environmental Sciences, Vol. 2, pp. 281-290.
16. Salehi, A., Tabari, M., 2008. Accumulation of Zn, Cu, Ni and Pb in soil and lesf of *Pinus eldarica* Medw. Following irrigation with municipal effluent. Research Journal of Environmental Sciences, Vol. 2, pp. 291-297.
17. Tabari, M., Salehi, A., 2009. Long-term impact of municipal sewage irrigation on treated soil and black locust trees in a semi-arid suburban area of Iran. Journal of Environmental Sciences, Vol. 21, pp. 1438-1445.

۱۸. خداکرمی، یحیی، شیروانی، انوشیروان، زاهدی‌امیری، قوام‌الدین، متینی‌زاده، محمد، صفری، هوشمند، «مقایسه مقدار جذب فلز سرب در اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) نهال‌های یکساله دو گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) و بنه (*Pistacia atlantica*) به روش محلول پاشی»، مجله جنگل ایران، ۱۳۸۸، جلد ۱، شماره ۴، صفحات ۳۱۳-۳۲۰.

۱۹. شریعت، آناهیتا، عصاره، محمدحسن، قمری‌زارع، عباس، «اثر کادمیم بر برخی پارامترهای فیزیولوژی در *Eucalyptus occidentalis*»، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۳۸۹، جلد ۱۴، شماره ۵۳، صفحات ۱۴۵-۱۵۳.

۲۰. رفعتی، مریم، خراسانی، نعمتا...، مراقبی، فرهنگ، شیروانی، انوشیروان، «توانایی گونه‌های توت سفید (*Morus alba*) و سپیدار (*Populus alba*) در تثبیت و برداشت فلزات سنگین»، نشریه محیط زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران، ۱۳۹۱، جلد ۶۵، شماره ۲، صفحات ۱۸۱-۱۹۱.

۲۱. عظم‌پور، ثریا، پیله‌ور، بابک، شیروانی، انوشیروان، بایرام‌زاده، ویلما، احمدی، مهدی، «گیاه‌پالایی سه گونه درختی زبان گنجشک، نارون چتری و بید سفید (*Fraxinus rotundifolia*, *Ulmus densa*, *Salix alba*) نسبت به فلز سنگین نیکل (مطالعه موردی: پالایشگاه نفت کرمانشاه) »، مجله جنگل ایران، ۱۳۹۲، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۱۴۱-۱۵۰.

22. Lingua, G., Franchin, C., Todeschini, V., Castiglione, S., Biondi, S., Burlando, B., Parravicini, V., Torrigiani, P., Berta, G., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones. Environmental Pollution, Vol. 153, pp. 137-147.
23. Borghi, M., Tognetti, R., Monteforti, G., Sebastiani, L., 2008. Responses of two poplar species (*Populus alba and Populus* × *canadensis*) to high copper concentrations. Environmental and Experimental Botany, Vol. 62, pp. 290-299.

24. Pietrini, F., Zacchini, M., Iori, V., Pietrosanti, L., Bianconi, D., Massacci, A., 2010. Screening of poplar clones for cadmium phytoremediation using photosynthesis, biomass and cadmium content analyses. International Journal of Phytoremediation, Vol. 12, pp. 105-120.
25. Ma, Y., He, J., Ma, Ch., Luo, J., Li, H., Liu, T., Polle, A., Peng, Ch., Luo, Zhi-Bin., 2014. Ectomycorrhizas with *Paxillus involutus* enhance cadmium uptake and tolerance in *Populus* × *canescens.* Plant, Cell and Environment, Vol. 37, pp. 627-642.
26. Arriagada, C.A., Herrera, M.A., Ocampo, J.A., 2005. Contribution of arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of *Eucalyptus globulus* to Pb. Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 166, pp. 31-47.
27. Ferna´ndez, R., Bertrand, A., Casares, A., Garcı´a, R., Gonza´lez, A., Tame´s, R.S., 2008. Cadmium accumulation and its effect on the in vitro growth of woody fleabane and mycorrhized white birch. Environmental Pollution, Vol. 152, pp. 522-529.
۲۸. کافی، محمد، برزویی، اعظم، صالحی، معصومه، کمندی، علی، معصومی، علی، نباتی، جعفر، «فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان»، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۱۳۸۸، ۵۰۲ صفحه.
29. Gohre, V., Paszkowski, U., 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta, Vol. 223. pp. 1115-1122.
30. Sebastiani, L., Scebba, F., Tognetti, R., 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P.* × *euramericana*) exposed to industrial waste. Environmental and Experimental Botany, Vol. 52, pp. 79-88.
31. Yang, X.E., Long, X.X., Ye, H.B., He, Z.L., Calvert, D.V., Stoffella, P.J., 2005. Cadmium tolerance and hyperaccumulaion in a new Zn hyperaccumulating plant species. Plant and Soil, Vol. 259, pp. 181-189.
32. Abdullahi, M.S., Uzairu, A., Okunola, O.J., 2009. Quantitative determination of heavy metal concentration in onion leaves. International Journal of Environmental Research, Vol. 3, pp. 271-274.
33. Athar, M., Vohora, S.B. 1995. Heavy metals and Environment. New Age International Ltd, Publishers. New Delhi, 216 p.
34. Khan, G., Kuek, C., Chaudhry, T.M., Khoo, C.S., Hayes, W.J., 2000. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. Chemosphere, Vol. 41, pp. 197-207.
35. Ward O.P., Singh, A., 2004. Soil bioremediation and phytoremediation-An overview. Applied bioremediation and phytoremediation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-12.
۳۶. داوری، مهدی، «مدل‌سازی پالایش سبز خاک‌های آلوده با دو آلاینده نیکل و کادمیم»، رساله دکتری خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، ۱۳۸۸؛ ۱۷۵ صفحه.

37. Liu, J.N., Zhou, Q.X., Wang, S., Sun, T., 2009. Cadmium torerance and accumulation of *Althaea rosea* Cav. and its potential as a hyperaccumulator under chemical enhancement. Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 149, pp. 419-427.
38. Garbisu, C., Hernández-Allica, J., Barrutia, O., Alkorta, I., Becerril, J.M., 2002. Phytoremediation: a technology using green plants to remove contaminants from polluted areas. Reviews on environmental health, Vol. 17, pp. 173-188.
39. McIntyre, T., 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils. Advances in Biochemistry Engineering Biotechnology, Vol. 78, pp. 97-123.
40. Dahmani-Muller, H., Van Oort, F., Ge´lie, B., Balabane, M., 2000. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. Environmental Pollution, Vol. 109, pp. 231-238.
41. Morikava, H., Erkin, O.C., 2003. Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. Chemosphere, Vol. 52, pp. 1553-1558.
42. Newman, L.A., Strand, S.E., Choe, N., Duffy, J., Ekuan, G., Ruszaj, M., Shurtleff, B.B., Wilmoth, J., Heilman, P., Gordon, M.P., 1997. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. Environmental Science & Technology, Vol. 31, pp. 1062-1067.
43. De Souza, M.P., Lytle, M.C., Mulholland, M.M., Otte, M.L., Terry, N., 2000. Selenium assimilation and volatilization from dimethylselenoniopropionate by Indian mustard. Plant Physiology, Vol. 122, pp. 1281-1288.
44. Heaton, C.P., Rugh, C.L., Wang, N.J., Meagher, R.B., 1998. Phytoremediation of mercury and methylmercurey polluted soils using genetically engineered plants. Journal of Soil Contamination, Vol. 7, pp. 497-509.
45. Rugh, C.L., Senecoff, J.F., Meagher, R.B., Merkle, S.A., 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. Nature Biotechnology, Vol. 16, pp. 925-928.

۴۶. زارعی، مهدی، «بررسی تنوع قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و کارایی آن‌ها در گیاه‌پالایی»، رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی آب و خاک، ۱۳۸۷؛ ۱۶۵ صفحه.

۴۷. رفعتی، مریم، «بررسی قدرت جذب فلزات سنگین کادمیوم، کروم و نیکل توسط درختان توت سفید و سپیدار (مطالعه برروی کشت گیاهان گلخانه‌ای)»، رساله دکتری محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۹۰؛ ۱۵۰ صفحه.

48. Angelova, V., Ivanov, K., 2009. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in black mustard (*Brassica nira* Koch). Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 153, pp. 449-459.

۴۹. صالحی، آزاده، طبری‌کوچکسرایی، مسعود، شیروانی، انوشیروان، «زنده‌مانی، رشد و غلظت سرب نهال سپیدار (*Populus alba clone 44/9*) در خاک آلوده به سرب»، مجله جنگل ایران، ۱۳۹۳، جلد ۶، شماره ۴، صفحات ۴۱۹-۴۳۳.