

## گیاه‌پالایی؛ تکنولوژی محیط‌زیستی برای مدیریت عناصر آلاینده سمّی

فاطمه خطیب اقدم<sup>۱</sup>، کمال سیاه چشم<sup>۲\*</sup>، افشین زیادپور<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی محیط زیستی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

۲ استادیار زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی محیط زیستی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰۴/۰۹)

### چکیده

گیاه پالایی می‌تواند یکی از امیدوارکننده ترین تکنیک‌ها جهت حذف آلاینده‌ها از محیط آب و خاک و مدیریت محیط‌زیست باشد. به کمک فرآیندهای جذب و عدم جذب سطحی می‌توان میزان نگهداری کاتیون‌ها و آنیون‌ها را تعیین نمود. بر اساس ضرایب انتقال عناصر مشخص می‌شود که عناصری مثل باریوم و لیتیوم حداقل انباشت و کادمیوم و بور بیشترین انباشت در بدنه گیاهان بیش اندوز مختلف را دارند. pH خاک از طریق کنترل حلالیت مواد آلی خاک، دخالت مستقیم در میزان دسترس پذیری و تحرک عناصر دارد و در ارتباط مستقیم با شرایط اکسایش و احیا است. جذب در ریشه می‌تواند به صورت غیر فعال (در جهت شیب انتشار) و فعال (در خلاف جهت شیب انتشار و با مصرف انرژی) باشد. گیاه پالایی در چهار حالت شامل: تثبیت گیاهی و ته نشست آلاینده‌ها در ریشه، استخراج گیاهی (در دو حالت پیوسته در تمام طول عمر گیاه و یا القایی و با افزودن کاتالیزور)، تبخیر گیاهی، انتقال آلاینده از ریشه به برگ‌ها و اتمسفر و تصفیه گیاهی به منظور حذف آلاینده‌ها از آب انجام می‌گیرد. برای نمونه، برای حذف آرسنیک، کادمیوم (روی)، کروم، جیوه، نیکل، سرب و سلنیوم می‌توان به ترتیب از گیاه سرخس دوپایه (*P.vittata*)، گیاه سوییس (*T.cerulea*)، درخت توس (*Betula sp.*)، قارچ مگس (*Amanita muscaria*)، گل قذومه (*Alyssum lesbiacum*)، گیاه رشادی (*Arabidopsis sp.*) و خردل چینی (*B.juncea*) استفاده کرد.

**کلید واژه‌ها:** گیاه‌پالایی، آلودگی خاک، زیست دسترس پذیری، فرآیندهای انتقال، جذب سطحی

## سرآغاز

افزایش جمعیت در جهان سبب شده که میزان استفاده از منابع طبیعی افزایش یافته و تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و سلامت زیست بوم‌های گیاهی و جانوری باشد. در نتیجه‌ی برخی فعالیت‌های انسانی از قبیل فعالیت‌های صنعتی و ذوب فلزات و به کار بردن سوخت‌های فسیلی و معدن‌کاری و استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها، مقادیر زیادی از عناصر آلاینده به محیط‌زیست و به خصوص خاک وارد می‌شود. پتانسیل اثرگذاری زمین‌شناسی بر روی رژیم غذایی و میزان جذب عناصر کمیاب و اصلی به وسیله انسان‌ها و جانوران علفخوار، وابسته به یک سری فاکتورهای گیاهی و خاک می‌باشد. سوای مصرف محصولات گیاهی، راه‌های دیگری وجود دارد که ترکیب و ویژگی‌های خاک‌ها بر روی سلامت انسان اثر بگذارد. مانند استنشاق و فرو بردن گرد و خاک‌های اتمسفری حاوی کانی‌های مختلف موجود در خاک و وجود عناصر در آب آشامیدنی که ترکیب آن هنگام عبور از افق‌های خاک تغییر کرده است. پالایش محیط‌زیست با برداشت این ترکیبات خطرناک و آلاینده، نیازمند دانش‌روز و استفاده از روش‌های نو به منظور احیای مناطق آلوده است. طی سال‌های گذشته از روش‌های فیزیکی و شیمیایی بسیاری برای پاکسازی اکوسیستم‌ها استفاده شده است، که اغلب با هزینه هنگفتی همراه می‌باشد. اما یک روش موثرتر به نام گیاه‌پالایی وجود دارد که در واقع کاربرد گونه‌های گیاهی به منظور پالایش منابع آب و خاک به صورت درجا می‌باشد و امروزه اهمیت زیادی یافته است زیرا این فناوری، دوستدار محیط زیست، موثر، اقتصادی و کاربردی است. گیاهان با سیستم ریشه‌ای خود، توانایی بی‌همتایی در تجمع عناصر ضروری و غیرضروری از خاک دارند. در حالت کلی گیاهان منتخب طبق الگوی خاصی در خاک‌های آلوده کاشته می‌شوند. بعد از این که گیاهان طی چند هفته یا چند ماه رشد کردند، برداشت می‌شوند و این روند گیاه‌کاری و برداشت ممکن است برای کاهش سطوح آلاینده تا مقدار مجاز، تکرار شود. زمان مورد نیاز برای پاکسازی، وابسته به نوع و مقدار آلودگی فلزی، مدت فصل رشد و بازده حذف فلز توسط گیاهان است اما محدوده نرمال آن بین یک تا بیست سال می‌باشد. این تکنیک برای پالایش نواحی بزرگ آلوده شده فلزی در اعماق کم، مناسب می‌باشد (Alloway, 1995).

در این تحقیق، نحوه انتقال عناصر از خاک به گیاه و عوامل

کنترل‌کننده این پروسه بررسی می‌شود. تاثیراتی که تمرکز این عناصر روی انسان‌ها و محیط‌زیست می‌گذارند با مثال‌های مختلف ارایه شده است. سپس اصول به کارگیری روش‌های گیاه‌پالایی و چگونگی رفتار با گیاهانی که عناصر سمی را انباشته‌اند، بررسی شده است. در آخر نگاهی ویژه بر گیاه‌پالایی ۹ عنصر شاخص و مواردی از کاربرد گیاه‌پالایی در ایران، خواهیم داشت.

## بحث

گیاه پالایی یا پالایش سبز عبارتست از فناوری استفاده از گیاهان برای استخراج، کاهش یا محدود کردن انتقال آلاینده‌ها به خاک و آب که روشی موثر، ارزان قیمت و دوستدار محیط‌زیست است. (Glick, 2003). ایده استفاده از گیاه برای جذب فلزات و سایر ترکیبات و برداشت آن‌ها اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Chaney معرفی شد، اما سابقه استفاده از این روش به حدود ۳۰۰ سال قبل بر می‌گردد (Henry, 2000).

## جذب سطحی

فرایندهای اصلی خاک می‌توانند قابلیت دسترس پذیری عناصر اصلی و کمیاب، هم از نظر متابولیکی و هم تا حد سَمی برای گیاهان را کنترل می‌کند تا جاییکه عبور این عناصر از نیمرخ خاک و رسیدن به آب زیرزمینی، تحت تاثیر جذب و عدم جذب عناصر در خاک می‌باشد. جذب یک واژه جامع برای نگه‌داری یون‌های فلزی روی سطوح فاز جامد در خاک می‌باشد. مکانیسم‌های جذب عبارت اند از:

- تبادل کاتیون و آنیون‌ها به طوری که یون‌ها در سایت‌هایی با بار مخالف، در سطوح جامد قرار می‌گیرند (سطوح با بار منفی برای کاتیون و سطوح با بار مثبت برای آنیون).
- جذب سطحی خاصی که در آن کاتیون‌های فلزی و آنیون‌ها توسط پیوندهای کوالانسی نگهداری می‌شوند.
- ته‌نشینی به صورتی که یون‌ها هم‌زمان با دیگر اجزای غیر آلی مثل اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز یا کربنات کلسیم روی سطح ته‌نشین شوند.
- ته‌نشینی به صورت ترکیبات غیر قابل حل شامل: کربنات‌های غیر قابل حل، سولفیدها، فسفات‌ها، هیدروکسیدها.
- کمپلکس‌های نامحلول با لیگاند‌های آلی جامد (در قیاس با کمپلکس‌های قابل حل با وزن مولکولی کم).

## زیست‌دسترس‌پذیری عناصر کمیاب و اصلی در گیاهان

تسخیر یون‌ها توسط ریشه می‌تواند طی چندین فرایند انجام گیرد که شامل تبادل کاتیونی توسط ریشه‌ها، انتقال به داخل سلول‌ها توسط حامل‌ها و ویژگی ساختار ریشه می‌باشد. این قابلیت از طریق رهاسازی یون‌ها و ترکیبات آلی شامل آمینو اسید، گلوتامیک اسید، پرولینیک اسید و آسپارتیک اسید کنترل می‌شود. گیاهان به آسانی می‌توانند کمپلکس‌های یونی یا کمپلکس‌های قابل حل از عناصر کمیاب را جذب کنند. فاکتورهایی که روی مقدار جذب عناصر در ریشه‌ها موثر بوده و آن‌ها را کنترل می‌کنند شامل: الف. تمرکز و گونه زایی عنصر در محلول خاک؛ ب. حرکت عنصر از خاک به سطح ریشه؛ ج. انتقال عنصر از سطح ریشه به داخل ریشه و د. جابه جایی از ریشه به جوانه می‌باشد. جذب یون‌های موجود در محلول خاک توسط غلظت کلی این یون‌ها در خاک نیز کنترل می‌شود. هرچند در مورد یون‌هایی که شدیداً جذب می‌شوند، جذب در ریشه، بیشتر وابسته به مقدار توسعه ریشه در حجم بزرگی از خاک می‌باشد. قارچ همزیست مایکوریز که به طور موثری ناحیه جذب ریشه را افزایش می‌دهد، می‌تواند در تسخیر یون‌های مغزی مثل ارتوفسفات‌ها و ریزمغزی‌ها، در زمانی که تراکم آن‌ها کم است، مشارکت کند (Alloway, 1995). تبخیر- تعرق یک فاکتور کنترل‌کننده مهم ریشه در تسخیر عناصر است، زیرا گیاهانی که تبخیر- تعرق خیلی سریع دارند می‌توانند حجم زیادی از محلول خاک، شامل یون‌ها و کمپلکس‌های داخل محلول را جذب کنند. جذب یون‌ها توسط ریشه می‌تواند غیرفعال یا به صورت فرآیندهای فعال متابولیکی باشد. جذب غیرفعال شامل انتشار یون‌ها در محلول خاک به سمت اندودرم ریشه می‌باشد اما برعکس، جذب فعال متابولیکی برخلاف شیب جهت انتشار بوده و به انرژی نیاز دارد. نوع مکانیسم جذب برای عناصر مختلف متفاوت است، برای مثال جذب سرب فعال است اما مس و مولیبدن و روی می‌توانند به صورت متابولیکی فعال یا ترکیبی از مکانیسم‌های فعال و غیرفعال جذب شوند. از سویی دیگر یون‌هایی که از طریق یک مکانیسم مشابه جذب ریشه شده‌اند، تمایل به رقابت با یکدیگر دارند، برای مثال جذب روی توسط مس و هیدروژن مختل می‌شود اما توسط آهن و منگنز آسیبی نمی‌بیند. جذب مس هم توسط روی و یون‌های آمونیوم، کلسیم،

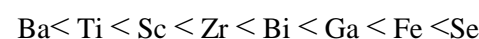
واجذب (یا عدم جذب سطحی)، واژه‌ای برای آزادسازی یون‌ها از حالت جذب شده، در قبال تغییرات و شرایط احیا یا آزادسازی از ریشه گیاه است. فاکتورهای کنترل‌کننده جذب و واجذب در خاک عبارتند از (Alloway, 1995):

- ویژگی‌ها، گونه‌زایی و غلظت محیطی عناصر اصلی و کمیاب
- ترکیب خاک، از نظر محتوی یا فقدان نسبی کانی‌های رسی مختلف و فراوانی کلی اکسیدهای آهن، منیزیم، کربنات کلسیم آزاد و مواد آلی
- شرایط فیزیکی‌وشیمیایی خاک شامل pH، شرایط احیا و غلظت سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها
- فاکتورهای گیاهی به خصوص ژنوتیپ که نقش اصلی را در تعیین مقدار انباشت عناصر در نسوج گیاهی و بخش‌های خوراکی و در نهایت، زنجیره غذایی بازی می‌کند.

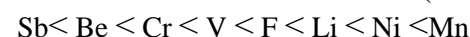
## انتقال عناصر کمیاب در گیاه- خاک

فاکتور انتقال (Translocation factor- Tf) که نسبت زیست‌انباشت (Bioaccumulation Ratio- BR) نیز نامیده می‌شود، یک روش مناسب برای شرح این است که کدام عنصر در خاک توسط گیاهان جذب و در بافت‌های هوایی آنها تجمع می‌یابد. این ضریب توسط تقسیم میزان غلظت یک عنصر در بافت‌های گیاهی بر میزان غلظت کلی همان عنصر در خاک سطحی به دست می‌آید. عناصری مثل باریوم و لیتیوم حداقل انباشت و عناصری مثل کادمیوم و بور بیشترین انباشت را دارند. اگرچه اختلافات قابل توجهی در انباشت عناصر کمیاب در بین گونه‌های گیاهی و بین انواع مختلف یک گونه (بین گونه‌ای و داخل گونه‌ای) رخ می‌دهد. از نظر قابلیت انتقال عناصر به دسته‌های زیر رده بندی می‌شوند (Alloway et al., 1995):

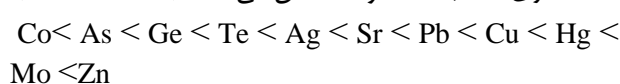
۱. عناصری که انباشت ندارند و فقط در دسترس هستند ( $Tf < 0.001$ )



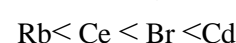
۲. عناصری که مقدار ناچیزی انباشت نشان می‌دهند ( $0.001 < Tf < 0.01$ )



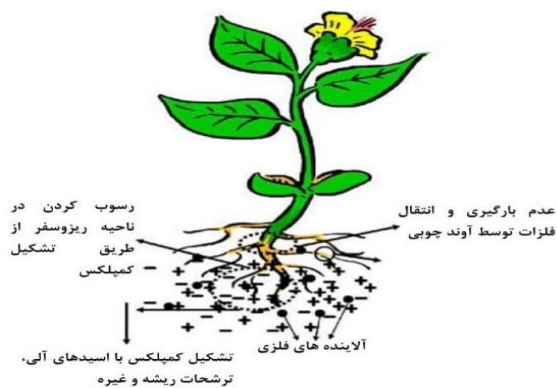
۳. عناصری که انباشت متوسط نشان می‌دهند ( $0.01 < Tf < 0.1$ )



۴. عناصری که انباشت شدیدی دارند ( $1 < Tf < 10$ )



گیاهی را برقرار کند (Trodooff et al., 2000). بر خلاف دیگر تکنیک‌های پایش، تثبیت گیاهی یا (Phytostabilization) هدفش حذف فلزات آلاینده از یک مکان نیست، بلکه ترجیحاً آن‌ها را توسط انباشت در ریشه‌ها یا ته‌نشست در منطقه ریشه ثابت می‌کند و خطرات را برای سلامتی انسان و محیط‌زیست، کاهش می‌دهد، شکل (۱). معایب این روش باقی ماندن آلاینده در خاک است و از این رو به پایش منظم نیاز دارد (US EPA, 2000).



شکل (۱): تصویر شماتیکی از تثبیت گیاهی (Padmavathiamma & Li, 2007)

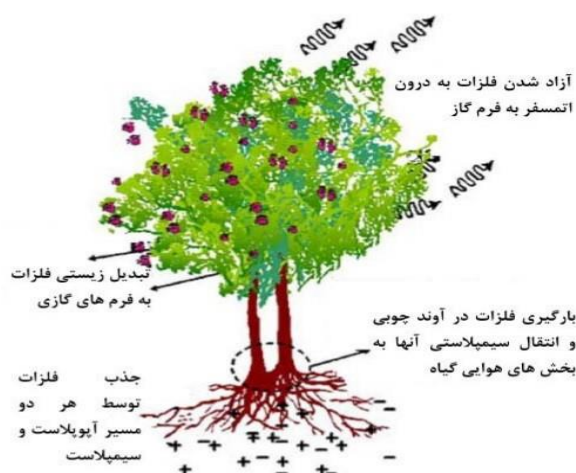
گیاه جذبی یا **Phytoextraction**: این روش شامل حذف توکسین‌ها، به خصوص فلزات سنگین و شبه‌فلزات توسط ریشه گیاهان و انتقال به اندام‌های هوایی می‌باشد (Salt et al., 2001; Lombi et al., 1998). بهترین روش برای حذف آلودگی از خاک و جدا کردن آن بدون نابود کردن ساختار و حاصل‌خیزی خاک، روش گیاه جذبی است (USEPA, 2000). آلاینده‌ها در ساقه و برگ‌ها انباشته شده و سپس برداشت می‌شوند و بدین طریق به شکل زیست توده گیاهی از محل حذف می‌گردند. استخراج گیاهی دو رده دارد که شامل پیوسته و القایی می‌باشد (Salt et al., 1998). استخراج گیاهی پیوسته احتیاج به گیاهان انباشتگری دارد که مقادیر بالایی از آلاینده‌های سمی را در سراسر مدت زندگی خود انباشت می‌کنند (فرانباشتگران)؛ در حالی که استخراج گیاهی القایی انباشت گیاهی را در یک نقطه زمانی توسط چنگالنده‌ها (لیگندهای چند دندانه‌ای برای پیوند با فلز)، افزایش می‌دهد. در مورد فلزات سنگین، چنگالنده (کی‌لیت)هایی مثل (EDTA) به

و پتاسیم مختل می‌شود (Barber, 1984; Graham, 1981). ریزوسفر یک زون باریک با ضخامت 1-2mm بین ریشه و خاک‌های احاطه‌کننده است که یک زون فعال از لحاظ میکروبیولوژیک و بیوشیمیایی فراهم می‌کند زیرا، مقادیر مخصوصی از مواد آلی شامل مواد ترش‌حی، موسیلاژ و سلول‌های تجزیه شده و مواد حاصل از تجزیه سلول را داراست. در نتیجه فرآیندهای اسید سازی، تغییرات پتانسیل اکسید و احیاء، تشکیل کمپلکس آلی، در ریزوسفر، برخی یون‌هایی که در مجاورت ریشه جذب خاک شده‌اند، ممکن است حل شده و برای جذب توسط ریشه، دسترس‌پذیر شوند (Marschner, 1995). مقادیر عناصر کمیاب که از هر خاک تسخیر می‌شود همانقدر که وابسته به ویژگی‌های خاک است، به فاکتورهای گیاهی هم بستگی دارد. مهم‌ترین فاکتورهای گیاهی ژنوتیپ یا آرایش گیاهی است یعنی اختلافات بین گیاهان یک خانواده و انواع گونه‌های آن‌ها. برای مثال با توجه به انباشت کادمیوم در محصولات، گیاهان از نظر انباشت به گروه‌های کم‌انباشتگران (حبوبات و گیاهان خوردنی)، متوسط انباشتگران (علف، یاس، کدو، کرفس)، فرانباشتگران (اسفناج، شب بو) رده بندی می‌شوند.

## انواع گیاه پالایی

**تثبیت گیاهی یا Phytostabilization**: در این روش گونه‌های گیاهی خاصی را، برای ثابت کردن یا بی حرکت کردن آلاینده‌ها در خاک، حین جذب و انباشت توسط ریشه و ته‌نشینی در منطقه ریشه و تثبیت فیزیکی خاک‌ها، به کار می‌برد. این فرآیند تحرک آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. این گیاهان با افزایش ظرفیت اتصال فلزی مانع انتقال عناصر سنگین از ریشه به بخش‌های قابل مصرف گیاه می‌شوند؛ مانند تثبیت Cd در برنج و تنباکو (Siegel, 2002) و یا اینکه گیاه ممکن است با ایجاد ترکیبات غیرمحلول از عناصر سنگین در خاک‌های کددهی شده، موجبات تجمع آن را در ریشه فراهم کند مثلاً در خاک‌هایی که کودهای فسفاته اضافه شده است،  $Pb^{2+}$  به ترکیب کلروپیرومورفیت تبدیل می‌شود. در بعضی موارد گیاه مثل یک پمپ، از طریق تعرق، مقدار زیادی از آب را از خاک به هوا منتقل می‌کند و سبب جلوگیری از مهاجرت زهاب آلوده به آب‌های زیرزمینی می‌شود. این فرآیند می‌تواند در جایی که به علت تمرکز بالای فلزات فاقد پوشش گیاهی است مجدداً یک پوشش

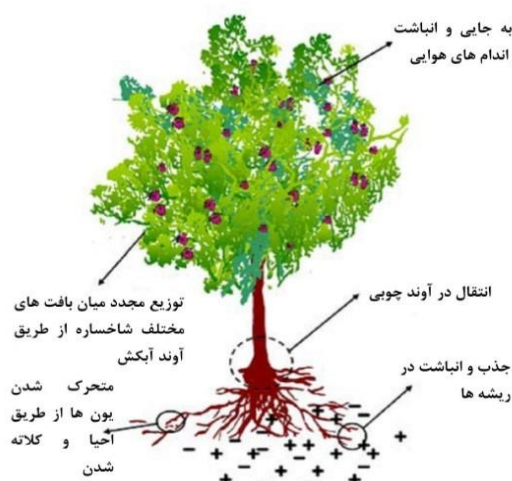
غیرمسمومیت‌زای آن ( $Hg^0$ ) در برگ‌های گیاه رشادی ترانسژنی (*Arabidopsis*) از خانواده شب‌بوین و درخت تبریزی (*Yellow poplar*) اتفاق می‌افتد (Rugh et al., 1996). به علاوه برخی گیاهان و باکتری‌ها سبب افزایش در فراریت Se به صورت دی‌متیل‌سلنید می‌شوند (Siegel, 2002). مکان‌هایی که در آن‌ها این تکنیک به کار برده می‌شود نیاز به مدیریت زیادی بعد از گیاه‌کاری ندارد و این مدت گیاه‌پالایی مزیت‌های دیگری دارد که شامل کمترین اختلال در مکان، فرسایش کم و عدم نیاز به مصرف مواد گیاهی آلوده است (Heaton et al., 1998). شکل (۳). اما از آنجایی که این فرآیند سبب انتقال مواد آلاینده به جو می‌شود، مواد منتقل شده شاید سلامت زیست بوم و انسان موثر باشد (Pivetz, 2001).



شکل (۳): تصویر شماتیکی از تبخیر گیاهی (Padmavathiamma and Li, 2007)

تصفیه گیاهی: از ریشه‌پالایی (Rhizofiltration) یا جوانه‌پالایی (Blastofiltration) برای جذب یا جذب سطحی آلاینده‌ها و در اصل فلزات، از آب و جریان مواد زاید آبدار (Prasad and Freitas 2003) استفاده می‌شود. ریشه‌های گیاه یا جوانه‌ها در آب‌های هوا داده شده رشد می‌کنند و فلزات سمی را در فاضلاب‌های آلوده ته‌نشین و متمرکز می‌کنند (Dushenkov & Kapulnik 2000; Elless et al., 2005). مزایای این روش، استفاده از آن به صورت برج و نابرگا است. گیاهانی مثل آفتابگردان، خردل هندی، تنباکو، چاودار، اسفناج و ذرت برای حذف سرب از زهاب‌ها بررسی شدند که بیشترین تأثیر در گل آفتابگردان بوده است که این گیاه تأثیر مثبتی در حذف

تحرك پذیری و انباشت متعاقب آلاینده‌هایی مثل سرب، کادمیوم، کروم، مس، نیکل و روی در (*Brassica juncea*) یا خردل چینی) و (*Helianthus anuus*) یا آفتابگردان کمک می‌کند (Blaylock et al., 1997; Turgut et al., 2004). توانایی دیگر چنگالنده‌های فلزی مثل EGTA, DTRA, CDTA, EDDHA و NTA برای افزایش انباشت در گونه‌های گیاهی متنوع تعیین شده‌است (Huang et al., 1997; Lombi et al., 2001b). اگر چه احتمالاً خطراتی در ارتباط با استفاده از چنگالنده‌های خاصی که کمپلکس‌های کیلیت-توکسین آن‌ها قابلیت انحلال در آب را داشته و در نتیجه می‌تواند سبب جابه‌جایی کمپلکس‌ها به لایه‌های عمقی خاک (Wu et al., 1999; Lombi et al., 2001b) و آلودگی آب‌های زیرزمینی و مصب شود، شکل (۲). محیط هدف در فرآیند گیاه‌جذبی، خاک است ولی این فرآیند شاید مواد آلاینده موجود در رسوبات و لجن‌ها را هم پاکسازی کند (Moteszarezhadeh & savaghebi-Firoozabadi, 2014).



شکل (۲): تصویر شماتیکی از استخراج گیاهی (Padmavathiamma and Li, 2007)

گیاه تبخیری یا **Phytovolatilization**: در این فرآیند آلاینده‌های محلول با آب توسط ریشه جذب می‌شوند و به برگ‌ها منتقل شده و از طریق روزنه‌ها تبخیر شده و به اتمسفر می‌روند (Tollsten & Muller, 1996; Newman et al., 1998; Davis, 1997). این روش برای پالایش آلاینده‌های غیرآلی مانند آرسنیک، سلنیوم و جیوه، ارزیابی و پیشنهاد شده است (Keating, 1997 & Fitzgerald, 1995). بهترین مثال برای این فرآیند، تبخیر جیوه به صورت تغییر به فرم

آلاینده به کار می‌رود (Motesharezadeh & Savaghebi, 2014).  
در جدول (۱) مکانیسم‌های مختلف گیاه پالایی همراه با عملکرد آن‌ها و نوع آلاینده ای که بر آن‌ها تاثیر گذاشته می‌شود، نشان داده شده است.

سرب در محدوده ۵۰۰-۱ میلی گرم بر لیتر داشته است (Raskin & Ensely, 2000). در این روش، تجمع ماده آلاینده در ریشه‌های گیاه انجام شده و مواد آلاینده از آب گرفته می‌شود. ریشه پالایی اغلب برای تیمار حجم زیادی از آب با غلظت پایین

جدول (۱): مکانیسم‌های مختلف گیاه پالایی (Ghosh & Singh, 2005)

فرآیند	عملکرد	آلاینده
تثبیت گیاهی	کمپلکس سازی	معدنی
استخراج گیاهی	فراانباشت	معدنی
تبخیر گیاهی	تبخیر توسط برگ‌ها	معدنی و آلی
تصفیه گیاهی	انباشت ریزوسفری	معدنی و آلی

به عنوان بیشترین مسموم‌کننده گیاهی از دو گونه آرسنیک می‌باشد (Quaghebeur & Rengel 2003; Wang et al., 2002). مطالعات زیادی در مورد به کار بردن سرخس دو پایه (*P.vittata*) برای گیاه‌پالایی آرسنیک در خاک و آب انجام شده و آزمایش‌های میدانی نشان می‌دهد، این گیاه می‌تواند خاک‌های آلوده را در طی ده سال یا کمتر، پاکسازی کند و میزان آرسنیک را در خاک، به کمتر ده میلی‌گرم بر لیتر کاهش دهد (Salido et al., 2003). در شهر آلبوکرکی در نیومکزیکو مطالعاتی انجام شده در یک منطقه نشان می‌دهد که سرخس‌ها به طور قابل توجهی مقدار آرسنیک را در نمونه آب شرب شهر کاهش داده است. شواهد مزبور نشان می‌دهد که گیاهان آرسنات را به آرسنیت تبدیل می‌کنند. اگرچه این تبدیل می‌تواند آرسنیک را کمتر برای گیاهان مضر کند، با این حال برای حیوانات و دیگر ارگانیزم‌هایی که ممکن است در معرض آرسنیت باشند، مضر است. یک گیاه‌پالایی ایده‌آل می‌تواند آرسنیک را در مقادیر مشابه با (*P.vittata*) انباشت کند و آن را در فرمی که کمتر سمی باشد، ذخیره کند. (*Arsenocholine & Senobetaine*) که فرم‌های اصلی آرسنیک در ماهی‌ها هستند، سمیت کمتری برای انسان‌ها دارند و به آسانی از طریق ادرار دفع می‌شوند (Lopez, 2004).

**کادمیوم:** کادمیوم یک فلز سمی و احتمالاً سرطان‌زا می‌باشد که در معدن کاری روی و عوامل صنعتی از کادمیوم برای جلوگیری از خوردگی ماشین‌آلات استفاده می‌شود. گرد و غبار کادمیوم یک

### بررسی خطرات زیست‌توده گیاهی بعد از گیاه‌پالایی

استخراج گیاهی شامل برداشت مکرر گیاهان در خاک‌های آلوده می‌باشد تا زمانی که غلظت فلزات به میزان قابل قبولی برسد. هر بار برداشت سبب انباشت مقادیر بسیاری از زیست‌توده‌ی خطرناک می‌شود که باید ذخیره و یا به طور مناسبی مرتب شود تا خطرات محیط‌زیستی آن کاهش یابد. حجم مواد زاید می‌تواند به روش‌های حرارتی، میکروبی، فیزیکی و یا شیمیایی کاهش پیدا کند. کمپوست ساختن اگرچه به طرز قابل توجهی خطر را کاهش می‌دهد، اما زیست‌توده حاصل از آلودگی فلزی هنوز خطرات سابق را دارد. در فشرده سازی نیز باید به جمع‌آوری و مصرف شیرابه توجه شود.

### آلاینده‌های عنصری رایج

**آرسنیک:** این عنصر به طور طبیعی شبه‌فلز می‌باشد که در آفت‌کش‌ها و نگه‌دارنده‌ها به کار می‌رود. آبیاری سبب پراکندگی آلودگی آرسنیک به خاک‌های اطراف شده و نتیجه آن مسمومیت با آرسنیک برای انسان‌ها و حیوانات است (McArthur et al., 2001). آرسنیت و آرسنات بخش غالب آرسنیک غیرآلی یافت شده در گیاهان زمینی بوده و هر دو فرم، مسموم‌کننده گیاهان هستند، اگرچه مکانیسم‌های مختلفی دارند. تشکیل کمپلکس‌های ADP-As به جای ATP سبب مرگ سلول می‌شود و آرسنیت می‌تواند به وسیله به هم پیوستن و منع کردن آنزیم‌ها با گروه‌های تیول سبب مرگ سلول شود. آرسنات بیشتر

(Pulford et al., 2001)، در حالی که کروم شش ظرفیتی توسط پوست نارگیل و تفاله نیشکر در خلیج‌ها جذب می‌شوند (Krishnani et al., 2004; Parimala et al., 2004). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که دو گونه گیاه علف شور (Tumbleweed & Salsola Kali) کروم شش ظرفیتی را در هر خاکی جذب می‌کنند (Gardea-Torresdey et al., 2005). **مس:** مس یک عنصر ضروری، آنزیم کوفاکتور برای اکسیداز (سیتوکروم C اکسیداز و سوپر اکسید دیستوفاز) و تیروسیناز می‌باشد. اگرچه حیوانات و گیاهان می‌توانند مقادیر سمی مس را جذب کنند، اما خطر آلودگی مس برای خاک و آب زیرزمینی حاصل از مناطق معدنی مثل (Black bird creek) یا مناطق دفع مثل (Picatinny) و (Arsenal) در نیوجرسی شمالی، دره (Deerlodge) وجود دارد (EPA, 1989). قبلا تصور می‌شد که (Elsholtzia splendens) یک فراانباشتگر مس است اما بعد از بررسی‌های بیشتر، نتیجه گرفته شد گیاهانی مثل (Elsholtzia argyi) (Jiang et al., 2004) و (Silene vulgaris) سلین بادکنکی از خانواده میخکیان (Song et al., 2004) و گل میمونی (Mimiulus guttatus) (Harper et al., 1998) در برابر مس بردبار می‌باشند. درخت بید سیاه (Salix nigra) نشان داده که می‌تواند مس و کادمیوم بیشتری را نسبت به گونه‌های دیگر Salix انباشت کند (Kuzovlina et al., 2004) برای آلودگی آبی مس، گیاه سنبل آبی (Eich hornia crassipes) می‌تواند برای گیاه پالایی در زهاب‌هایی که در مقادیر کمتری آلوده شده‌اند، به کار رود.

**جیوه:** جیوه عنصری سمی برای انسان‌هاست و بسته به فرمی که دارد می‌تواند سبب ناراحتی عصبی شدیدی شود (Carty & Malone 1979). جیوه در خاک می‌تواند در اثر احیای سولفات تبدیل به سینابار (Hgs) شود که خطرات محیط‌زیستی دارد. مواد آلی می‌توانند تحرک جیوه از سینابار را افزایش داده و سبب زیست‌دسترس‌پذیری جیوه شوند (Barnett et al., 1997); (Ravichandran et al., 1998). سمی‌ترین فرم جیوه فرم‌های آلی آن هستند، مثل متیل جیوه و فنیل جیوه استات. مواد آلی حاوی جیوه و یون جیوه برای گیاهان سمی هستند و گیاهان فراانباشتگر جیوه شناسایی نشده‌اند، اگرچه یک قارچ فراانباشتگر جیوه به نام قارچ مگس یا قارچ زرد (Amanita muscaria) بین ۹۶ تا ۱۹۰۰ میلی‌گرم بر گرم در کلاهک خود و ۶۱ تا ۹۲۰ میلی‌گرم بر گرم در ساقه خود انباشت می‌کند (Falandysz et al., 2001).

خطر مهم برای سلامتی انسان است. اکوتیپ گیاه سوییس (T.caerulescens) از خانواده شب‌بویان جزو گیاهان سم‌زدا بوده و مقدار زیادی از کادمیوم را انباشت می‌کند. اکوتیپ Vivez و Ganges می‌توانند به ترتیب بیش از ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از وزن خشک کادمیوم و ۱۲۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از وزن خشک کادمیوم را انباشت کنند، بدون این که هیچ علامتی از سمیت نشان دهند؛ اگرچه اکوتیپ‌های Puy de wolf و Prayon به ترتیب، فقط ۲۳۰۰ و ۴۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک را انباشت می‌کنند (Lombi et al., 2000). (Peer et al., 2003; 2001a; 2001b). دو گیاه (Arabidopsis halleri) و (Thalaspia caerulescens) بعنوان دو گیاه فراانباشتگر کادمیوم شناخته شده هستند (Cosio et al., 2004; Kupper et al., 2000). اگرچه، گزارش‌هایی از فرا انباشت کادمیوم در (B.juncea) نیز مشکوک است، زیرا شواهدی از انباشت کادمیوم در این گونه وجود دارد (Salt et al., 1997). مطالعات آزمایشی در ارتباط با گیاه‌پالایی روی کادمیوم بر روی خاک‌های آلوده جمع شده از صنعت ذوب روی در دهکده (Palmerton) پنسیلوانیا (Brown et al., 1994) و گنداب خاک کشاورزی آلوده در UK (Lombi et al., 2001b) و یک مکان آلوده حاوی باطله‌های معادن مس در امتداد رودخانه Silver Bow Creek، مونتانا انجام شده است (Ebbs et al., 1997). در تمام این مطالعات گونه (T.caerulescens) کادمیوم روی را از خاک حذف کرد اما با سرعتی که به بیش از ۱۵ سال زمان نیاز دارد تا بیشترین مقدار فلزات را فقط از یک افق خاک حذف کند. پتانسیل پالایش در (T.caerulescens) به وسیله ارتفاع کم و زیست‌توده آن محدود شده است. در یک تحقیق، اگرچه (T.caerulescens) بالاترین مقدار کادمیوم و روی را در برگ‌ها انباشت می‌کند، اما (B.juncea) روی بیشتر و مقادیر برابری از کادمیوم را حذف می‌کند که این به خاطر اندازه بزرگ‌تر این گیاه می‌باشد (Ebbs et al., 1997).

**کروم:** کروم سه ظرفیتی یک ماده مغذی ضروری برای حیوانات بوده و بیشتر در شرایط اکسیدان، در محیط‌زیست حضور دارد. کروم چهار ظرفیتی هزار بار سنگین‌تر از کروم سه ظرفیتی است و آژانس سلامت جهانی و (EPA) تایید کرده‌اند که کروم چهار ظرفیتی سرطان زاست. درخت توس (Betula) از خانواده توسکایان و بید (Salix) می‌توانند کروم را جذب کرده و حتی برای کرومی که آب‌های زیرزمینی را آلوده کرده مفید باشند

(al., 2003).

**نیکل:** مسمومیت با نیکل در انسان‌ها در نتیجه مواجهه شغلی مکرر با نیکل است که منجر به درماتیت، آسم یا سردرد می‌شود (Davies 1986; Akeeson & Skerfing, 1985). آرسنیک، کادمیوم و سرب اغلب در معدن‌کاری نیکل حضور دارند و فرآوری نیکل سبب انباشت فلزات سنگین در آب و خاک تا بیش از حد مجاز می‌شود (Lupankwa et al., 2004). سرپانتین و خاک‌های اولترامافیک به طور طبیعی به دلیل داشتن مقادیر بالایی از نیکل توسط فلورای منحصر به فرد و مقاوم به نیکل شناخته شده‌اند و اکثر فرآینب‌شگران نیکل از این خاک‌ها جمع‌آوری می‌شوند. قدومه بومی جزیره لسبوس یونان (Alyssum lesbiacum) و (Thlaspi goesingense) هر دو گیاهان فرآینب‌شگر نیکل در خانواده شب‌بوها هستند. در جنس Alyssum به تنهایی ۴۸ گونه کشف شده که بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ میکروگرم بر گرم نیکل در زیست توده خشک برگ دارند (Baker & Brooks 1989; Kerkeb & Kramer, 2003). گونه‌های مختلف Alyssum که فرآینب‌شگر نیکل هستند برای گیاه پالایی در مکان‌های معدنی مطالعه شده‌اند (Mc Grath & Zhao, 2003).

**سرب:** سرب یک فلز سنگین بسیار سمی است که خطراتی جدی برای سلامتی کودکان و حیات وحش دارد. منابع اصلی مسمومیت سرب شامل رنگ سربی و نشت بنزین‌های سرب‌دار است که بخار و غبار آن آلودگی خاک و مواد غذایی و آب می‌شود. سایر مناطق با آلودگی بالای سرب شامل کارخانجات ذوب کانسنگ سرب، مناطق تیراندازی و محل دفن باتری‌های قدیمی می‌باشد. گیاه پالایی سرب با استفاده از لیگندهایی مثل اتیلن دی آمین تتراسیتیک اسید (EDTA) که در صنعت برای

جداسازی یون‌های فلزی از محلول‌های آبی استفاده می‌شود، نتایج خوبی دربردارد. با این که کی‌لیت‌کننده‌ها (Chelator)، حلالیت و جذب سرب را افزایش می‌دهند اما مقدار سرب منتقل شده به جوانه‌ها باز هم در مقایسه با مقدار آن در خاک کم است و احتمال این که (Pb-EDTA) متحرک از خاک به آب زیرزمینی رفته و آن را آلوده کند افزایش می‌یابد. گیاه پالایی سرب وابسته به سیستمی است که سرب را برای انتقال به برگ‌ها محلول و متحرک می‌کند.

**روی:** مهم‌ترین فرآینب‌شگر روی متعلق به گیاه سوییس یا (T.caerulescens) می‌باشد. این گیاه برای انباشت ۲۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ میکروگرم بر گرم روی، قبل از بروز نشانه‌های سمیت مناسب است، با این حال می‌تواند مقدار ۴۰۰۰۰ میکروگرم بر گرم (بیشترین وزن خشک) را در جوانه‌ها انباشت کند (Pence et al., 2000).

**سلیوم:** فرآینب‌شگران سلیوم مثل (Astragalus bisulcatus) انباشت بیش از ۰.۶۵ درصد (w/w) از سلیوم (Pickering et al., 2003) و (B. juncea)، ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک را انباشت می‌کند (Banuelos et al., 1997). (A. bisulcatus) مقادیر بالایی از Se- متیل سلنوسیستین را در برگ‌های جوان انباشت می‌کند (Pickering et al., 2003). با بیان ژن ATP سولفوریلاز، آنزیمی که سلنات را احیا کرده و به سلنیت تبدیل می‌کند، در (B.jancea) انباشت سلیوم در جوانه‌ها دو برابر بیشتر خواهد شد (Van Huysen et al., 2004). در جدول (۲) تاثیرات غلظت‌های مختلف عناصری از قبیل کادمیوم، مس، سرب و روی در گیاهان نشان داده شده است.



جدول (۲): تاثیرات مقادیر مختلف فلزات در گیاهان (Pugh et al., 2002)

غلظت فلز ( $mg\ kg^{-1}$ )				حالت
Zn	Pb	Cu	Cd	
<10	-	<1-5	-	Deficient
10-150	0.5-10	3-30	0.05-2	Normal
>100	30-300	20-100	5-700	Phytotoxic

مطالعات موردی انجام شده در ایران

توسعه سریع صنعت و کشاورزی و بهره‌گیری از مواد شیمیایی متنوع و همچنین مصرف زیاد کودهای شیمیایی، عوامل بالقوه‌ای را برای آلوده کردن خاک‌های ایران فراهم ساخته است. در این بخش به چند نمونه از مطالعاتی که توسط محققان ایرانی برای به کار بردن تکنولوژی گیاه‌پالایی در پاکسازی آلاینده‌ها صورت گرفته است، اشاره می‌کنیم.

صنایع نفت و گاز یکی از مهم‌ترین صنایع می‌باشد که فاضلاب تولید شده در این صنایع شامل ترکیبات آلی و غیرآلی است که تخلیه‌ی آن می‌تواند سبب آلوده شدن آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک شود (Sadatipour et al., 2004). فلزات سنگین همچون کادمیوم، سرب و وانادیوم، بخشی از نفت و به تبع آن فاضلاب را تشکیل می‌دهد که از مهم‌ترین آلاینده‌های این صنایع می‌باشند. در یک مطالعه تحقیقاتی حذف فلزات سنگین Cd, Pb و V از فاضلاب پالایشگاه گاز بیدبلند با روش طبیعی (تالابی) با استفاده از گیاه نی (Common reed) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه‌های فاضلاب خروجی پالایشگاه و نمونه‌های گیاه نی از طبیعت برداشت شد و غلظت این فلزات در فاضلاب اندازه‌گیری شده و نتایج نشان داد وانادیم با ۶۶٪ بیشترین میزان کاهش را دارا بود و درصد کاهش سرب و کادمیم به ترتیب ۶۱٪ و ۵۹٪ بود. همچنین مشخص شد زمان مناسب برای حذف هر سه فلز، ۶ روز است و پس از آن در زمان ۱۰ روز، غلظت فلزات مورد مطالعه در فاضلاب بیشتر شد که نشان می‌دهد گیاه، فلزات را رهاسازی کرده و دلیل احتمالی آن می‌تواند آستانه محدود تحمل گیاه نسبت به جذب فلزات مربوطه باشد. سازوکار جذب توسط گیاه بوسیله پالایش در ناحیه ریشه (Rhizofiltration) بود به این صورت که گیاه فلزات سنگین را با غلظت کمتر در ریشه هایش تغلیظ یا ترسیب می‌کند. این روش به ویژه برای فاضلاب‌های صنعتی، رواناب کشاورزی و یا فاضلاب معادن اسیدی کاربرد دارد (آتشگاهی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین در تحقیقات دیگری توانایی گیاه نی

(Phragmites australis) در حذف فلز جیوه از پساب کارخانه کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام مورد بررسی قرار گرفت. دفع پساب‌های حاوی جیوه از واحد کلر آلکالی یکی از مشکلات اساسی صنعت پتروشیمی می‌باشد و نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که سیستم گیاه‌پالایی برای حذف جیوه از محیط‌های آبی بسیار کارآمد است و در برخی موارد تا ۹۹٪ جیوه از محلول حذف شده است. نتایج این آزمایش نشان داد که گذشت زمان بر میزان جذب جیوه توسط گیاه اثر مستقیمی داشته و میزان جذب در روزهای ۱، ۳، ۵ و ۷ به ترتیب ۲۲۷۱، ۵۸، ۳۷۴۳، ۴۷، ۴۲۰۴، ۹۸ و ۳۰۳۹، ۳۲ بود. از این رو گیاه نی برای حذف فلز جیوه از پساب صنایع پتروشیمی توصیه می‌شود (طیبی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین مطالعات انجام شده در حوضه‌های مختلف مناطق نفت‌خیز ایران نشان داده که ترکیب «فنانترن» از خانواده هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) آلاینده غالب در اغلب مناطق اطراف تاسیسات نفت و گاز است. تحقیقاتی جهت بررسی نقش ذرت خوشه‌ای سودانی (*Sorghum vulgare Pers. Sudanense*) در حذف آلاینده فوق با روش گیاه‌پالایی صورت گرفته است. پس از تیمار بندی بر اساس طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و کشت گیاه در محیط گلخانه با شرایط مشابه منطقه موردنظر، روند تغییرات غلظت آلاینده در خاک در مدت ۱۶ هفته (دوره رشد کامل گیاه) دنبال شده و میزان کلروفیل، بیومس تولیدی و میزان تجمع آلاینده مذکور در گیاه مطالعه شد. طبق نتایج به دست آمده گیاه مذکور، میزان حذف آلاینده در خاک را تا ۲۰٪ افزایش داده و آلاینده در ناحیه ریزوسفر گیاه تجزیه و به اندام‌های هوایی منتقل نشده است (علایی و همکاران، ۱۳۸۹). و در آخر در معدن سرب و روی باما (ایران کوه، اصفهان)، برای مطالعه و پالایش خاک‌های آلوده به سرب، سه منطقه با درجات مختلف آلودگی عنصر سرب (شدید، متوسط و شاهد) از طریق عکس‌های ماهواره‌ای انتخاب شد. پس از بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها، در مرحله دوم یازده گونه گیاهی که بین سه منطقه مشترک

## مطالعات موردی انجام شده در ایران

توسعه سریع صنعت و کشاورزی و بهره‌گیری از مواد شیمیایی متنوع و همچنین مصرف زیاد کودهای شیمیایی، عوامل بالقوه‌ای را برای آلوده کردن خاک‌های ایران فراهم ساخته است. در این بخش به چند نمونه از مطالعاتی که توسط محققان ایرانی برای به کار بردن تکنولوژی گیاه‌پالایی در پاکسازی آلاینده‌ها صورت گرفته است، اشاره می‌کنیم.

صنایع نفت و گاز یکی از مهم‌ترین صنایع می‌باشد که فاضلاب تولید شده در این صنایع شامل ترکیبات آلی و غیرآلی است که تخلیه‌ی آن می‌تواند سبب آلوده شدن آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک شود (Sadatipour et al., 2004). فلزات سنگین همچون کادمیوم، سرب و وانادیوم، بخشی از نفت و به تبع آن فاضلاب را تشکیل می‌دهد که از مهم‌ترین آلاینده‌های این صنایع می‌باشند. در یک مطالعه تحقیقاتی حذف فلزات سنگین Cd, Pb و V از فاضلاب پالایشگاه گاز بیدبلند با روش طبیعی (تالابی) با استفاده از گیاه نی (Common reed) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه‌های فاضلاب خروجی پالایشگاه و نمونه‌های گیاه نی از طبیعت برداشت شد و غلظت این فلزات در فاضلاب اندازه‌گیری شده و نتایج نشان داد وانادیم با ۶۶٪ بیشترین میزان کاهش را دارا بود و درصد کاهش سرب و کادمیم به ترتیب ۶۱٪ و ۵۹٪ بود. همچنین مشخص شد زمان مناسب برای حذف هر سه فلز، ۶ روز است و پس از آن در زمان ۱۰ روز، غلظت فلزات مورد مطالعه در فاضلاب بیشتر شد که نشان می‌دهد گیاه، فلزات را رهاسازی کرده و دلیل احتمالی آن می‌تواند آستانه محدود تحمل گیاه نسبت به جذب فلزات مربوطه باشد. سازوکار جذب توسط گیاه بوسیله پالایش در ناحیه ریشه (Rhizofiltration) بود به این صورت که گیاه فلزات سنگین را با غلظت کمتر در ریشه هایش تغلیظ یا ترسیب می‌کند. این روش به ویژه برای فاضلاب‌های صنعتی، رواناب کشاورزی و یا فاضلاب معادن اسیدی کاربرد دارد (آتشگاهی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین در تحقیقات دیگری توانایی گیاه نی

شیمیایی مثل استفاده از حلال‌ها و ترکیبات شیمیایی و شستشوی خاک، کمتر است. اما علاوه بر مزایایی که برای این روش ذکر شد، معایبی نیز وجود دارد. گستره پالایش در این روش اغلب به منطقه‌ای محدود می‌شود که تحت نفوذ ریشه است و این روش زمان‌بر بوده و برای پالایش کامل خاک، زمان طولانی نیاز است. همچنین احتمال این وجود دارد که گیاهان آلوده در این روش توسط حیوانات مصرف شده و آلاینده وارد چرخه غذایی شود. با این حال، گیاه پالایی سبب جلوگیری از تخریب محیط‌زیست شده و سلامت آن را بهبود می‌بخشد و به تبع آن از آسیب رساندن به سلامت انسان و سایر موجودات جلوگیری می‌کند. در نتیجه برای مدیریت صحیح محیط‌زیست و منابع طبیعی باید اطلاعات دقیقی از خاک منطقه و میزان جذب عناصر آلاینده و تاثیرات این عناصر بر انسان، گیاهان، جانوران و چگونگی انباشت این عناصر در گیاهان داشته باشیم تا بتوانیم با برقراری ارتباطی بین تمامی این عوامل روشی صحیح و اقتصادی برای حذف آلاینده از محیط به کار ببریم.

**تقدیر و تشکر:** از تمامی اساتید و دوستان بزرگواری که همیشه ما را برای برداشتن قدمی مستقل در راهی که آغاز کردیم یاری فرمودند، مخصوصاً از استاد گرامی گروه زیست‌شناسی دکتر یحیی صالحی لیسار برای کمک‌های بی‌دریغشان و فراهم آوردن منابعی که به سختی در دسترس بودند نهایت تقدیر و تشکر را داریم.

## فهرست منابع

- آتشگاهی، م؛ حمیدیان، ا؛ خراسانی، ن؛ افلاکی پاشاکی، ف. و محمد نژاد مطلق، م. ۱۳۹۰. بررسی کارایی حذف فلزات سنگین در فاضلاب پالایشگاه بید بلند. نشریه محیط‌زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران. ۶۴ (۱): ۳۳۷-۳۴۶.
- پارسادوست، ف؛ بحرینی نژاد، ب؛ صفری سنجانی، ب. و کابلی، م. ۱۳۸۶. گیاه پالایی عنصر سرب توسط گیاهان مرتعی و بومی در خاک‌های آلوده منطقه ایران کوه (اصفهان). فصلنامه پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی. ۲۰ (۲): ۵۴-۶۳.
- طبیعی، ل؛ حمیدیان، ا؛ دانه کار، ا. و پور باقر، ه. ۱۳۹۵. بررسی توانایی گیاه نی در حذف فلز جیوه از پساب کارخانه کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام. نشریه محیط‌زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران. ۶۹ (۱): ۹۵-۱۰۵.
- علایی، ا؛ وکیلی، ف. و مهرداد شریف، ا. ۱۳۸۹. گیاه پالایی خاک‌های آلوده به "فنانترین" با استفاده از گیاه سورگوم. مجله محیط‌شناسی، سال ۶۳ (۵۳): ۷۹-۸۸.
- متشرع زاده، ب. و ثوابی فیروز آبادی، غ. ۱۳۹۳. گیاه پالایی یا پالایش سبز. انتشارات دانشگاه تهران.

بودند انتخاب و در بهار سال ۱۳۸۴ در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی برداشت شدند. علاوه بر آن خاک‌های ریزوسفری این گیاهان از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و همچنین فرم عصاره‌گیری عنصر سرب و در نهایت انباشتگی عنصر سرب در گیاه و همچنین فاکتور انتقال، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که گونه‌های گیاهی جوسیخک (*Ebenus Stellata*) و گون (*Astragalus glaucantus*) از خانواده باقالی‌ها و کلاه میرحسن (*Acantholimon*) بیشترین غلظت سرب در اندام‌های هوایی (به ترتیب ۱۱۸٫۶، ۹۸٫۱، ۸۶٫۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک گیاهی) و بیشترین ضریب انتقال سرب از اندام زیرزمینی به اندام هوایی (به ترتیب ۲٫۹۵، ۳٫۵۴ و ۳٫۷۰) را داشتند و با توجه به این موضوع و همچنین زیست توده و شرایط سازگاری مناسب، این سه گونه جهت پالایش خاک‌های آلوده به عنصر سرب در این منطقه و مناطق مشابه توصیه می‌گردند (پارسادوست و همکاران، ۱۳۸۶).

## نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی روشی اقتصادی و مقرون به صرفه است که با محیط‌زیست سازگار بوده و نسبت به سایر روش‌های پاکسازی هزینه‌های کمتری دارد. قابلیت پالایش در این روش می‌تواند به صورت برجا و نابرجا باشد همچنین میزان دست‌خوردگی خاک کاهش یافته و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت ندارد. گیاه پالایی یک روش طبیعی است و احتمال تخریب زیست بوم نسبت به سایر روش‌های پالایش فیزیکی مثل سوزاندن و یا پالایش

نیسی، ع؛ وثوقی، م؛ محمدی، ب؛ محمدی، م؛ نعیم آبادی، الف. و هاشم زاده، ب. ۱۳۹۳. گیاه پالایی فلزات سنگین توسط گیاه آفتابگردان: یک مطالعه مروری. فصلنامه علمی دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه. ۲ (۲): ۶۰.

Baker, A. & Brooks, R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1:81-126.

Banuelos, G.; Ajwa, H.; Terry, N. & Zayed, A. 1997. Phytoremediation of selenium laden soils: A new technology. *Journal of Soil and Water Conservation*. 52:426-430.

Barber, S. 1984. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Wiley, New York.

Barnett, M.; Harris, L.; Turner, R.; Stevenson, R.; Henson, T.; Melton, R. & Hoffman, D. 1997. Formation of mercuric sulfide in soil. *Environ Sci Technol*. 31:3037-3043.

Blaylock, M.; Salt, D.; Dushenkov, S.; Zakharova, O.; Gussman, C.; Kapulnik, Y.; Ensley, B. & Raskin, I. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ Sci Technol*. 31:860-865.

Brown, S.; Chaney, R.; Angle, J. & Baker, AJM. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc-contaminated and cadmium-contaminated soil. *J Environ Qual*. 23:1151-1157.

Carty, A. & Malone, S. 1979. The Chemistry of Mercury in Biological Systems. In: Nriagu J (ed) *The Biogeochemistry of mercury in the environment*. ElsevierBiomedical, Amsterdam. 433-479.

Cosio, C.; Martinoia, & E. Keller, C. 2004. Hyperaccumulation of cadmium and zinc in *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* at the leaf cellular level. *Plant Physiol*. 134:716725.

Davis, L.; Vanderhoof, S.; Dana, J.; Selk, K.; Smith, K.; Goplen, B & Erickson, L. 1998. Movement of chlorinated solvents and other volatile organics through plants monitored by Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry. *J Hazardous Subst Research*. 1:4-1, 4-26.

Davies, J. 1986. Occupational asthma caused by nickel salts. *J Soc Occ Med*. 36:29-31

Dushenkov, S. & Kapulnik, Y. 2000. Phytofiltration of metals. In I. Raskin & B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals – Using plants to clean-up the environment*. 89-106.

Ebbs, S.; Lasat, M.; Brady, D.; Cornish, J.; Gordon, R. & Kochian, L. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J Environ Qual*. 26:1424-1430.

Elless, P.; Poynton, Y.; Williams, A.; Doyle, P.; Lopez, C. & Sokkary, A. et al., 2005. Pilot-scale demonstration of phytofiltration for drinking arsenic in New Mexico drinking water. *Water Research*, 39(16), 3863–3872.

EPA. 1989. EPA Superfund Record of Decision: Picatinny Arsenal (US Army). Rockaway Township, NJ, U.S. Environmental protection agency superfund. <http://www.epa.gov /superfund/sites /rods/fulltext /r0289093.pdf>

Falandysz, J.; Lipka, K.; Kawano, M.; Brzostowski, A.; Dadej, M.; Jedrusiak, A. & Puzyn, T. 2003. Mercury content and its bioconcentration factors in wild mushrooms at Lukta and Morag, northeastern Poland. *J Agric Food Chem*. 51:2832-2836.

Gardea-Torresdey, J.; de la Rosa, G.; Peralta-Videa, J.; Montes, M.; Cruz-Jimenez, G. & CanoAguilera, I. 2005. Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). *Arch Environ Contam Toxicol*. PMID: 15696348.

Ghosh, M. & Singh, S. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1–18.

Graham, R. 1981. Absorption of copper by plant roots. In: Loneragan JF, Robson AD, Graham RD (eds) *Copper in soils and plants*. Academic, Sydney. 141–164.

- Gratao, P.L.; Prasad, M.N.V.; Cardoso, P.F.; Lea, P.J. & Azevedo, R.A. 2005. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. 58-60.
- Harper, F.; Smith, S. & Macnair, M. 1998. Can an increased copper requirement in copper-tolerant *Mimulus guttatus* explain the cost of tolerance? II. Reproductive phase. *New Phytol.* 140:637-654.
- Heaton, A.; Rugh, C.; Wang, N. & Meagher, R. 1998. Phytoremediation of mercury- and methylmercury-polluted soils using genetically engineered plants. *Journal of Soil Contamination.* 74:497-510.
- Huang, J.; Chen, J.; Berti, W. & Cunningham, S. & 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ Sci Technol.* 31:800-805.
- Jiang, L.; Yang, X. & He, Z. 2004. Growth response and phytoextraction of copper at different levels in soils by *Elsholtzia splendens*. *Chemosphere.* 55:1179-1187.
- Krishnani, K.; Parimala, V. & Meng, X. 2004. Detoxification of chromium (VI) in coastal water using lignocellulosic agricultural waste. *Water SA.* 30:541-545
- Kupper, H.; Lombi, E.; Zhao, F. & McGrath, S. 2000. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta.* 212:75-84.
- Kuzovkina, Y.; Knee, M. & Quigley, M. 2004. Cadmium and copper uptake and translocation in five willow (*Salix L.*) species. *Int J Phytoremediation.* 6:269-287.
- Lombi, E.; Zhao, F.; Dunham, S. & McGrath, S.P. 2000. Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. *New Phytol.* 145:11-20.
- Lombi, E.; Zhao, F.; Dunham, S. & McGrath, S. 2001b. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *J Environ Qual.* 30:1919-1926.
- Lombi, E.; Zhao, F.; McGrath, S.; Young, S. & Sacchi, G. 2001. Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype. *New Phytol.* 149:53-60.
- Lopez, W. 2004. Case Studies in Environmental Medicine- Arsenic Toxicity, Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2nd edn. Academic, San Diego
- McArthur, J.; Ravenscroft, P.; Safiulla, S. & Thirlwall, M. 2001. Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh. *Water Resources Research.* 37:109-117.
- McGrath, S. & Zhao, F.; 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Curr Opin Biotechnol.* 14:277-282.
- Mulligan, C.N.; Young, R.N. & Gibbs, B.F.; 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and ground water: an evaluation. *Eng. Geol.* 60:193-207.
- Newman, L.; Strand, S.; Choe, N.; Duffy, J.; Ekuan, G.; Ruszaj, M.; Shurtleff, B.; Wilmoth, J.; Heilman, P. & Gordon, M. 1997. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environ Sci Tech.* 31:1062-1067.
- Padmavathamma, P.K. & Li, L.Y. 2007. Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. 108-120.
- Parimala, V.; Krishnani, K.; Gupta, B.; Jayanthi, M. & Abraham, M. 2004. Phytoremediation of chromium from seawater using five different products from coconut husk. *Bull Environ Contam Tox.* 73:31-37.
- Peer, W.A.; Baxter, I.R.; Richards, E.L.; Freeman, J.L. & Murphy, A.S. 2005. Phytoremediation and hyperaccumulator plants. 14-28.

- Peer, W.; Mamoudian, M.; Lahner, B.; Reeves, R.D.; Murphy, A. & Salt, D. 2003. Identifying model metal hyperaccumulating plants: germplasm analysis of 20 Brassicaceae accessions from a wide geographic area. *New Phytol.* 159:421-430.
- Pence, N.; Larsen, P.; Ebbs, S.; Letham, D.; Lasat, M.; Garvin, D.; Eide, D. & Kochian, L. 2000. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proc Natl Acad Sci USA.* 97:4956-4960.
- Pickering, I.; Wright, C.; Bubner, B.; Ellis, D.; Persans, M.; Yu, E.; George, G.; Prince, R. & Salt, D. 2003. Chemical form and distribution of selenium and sulfur in the selenium hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*. *Plant Physiol* 131:1460-1467.
- Pivets, B. 2001. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites.* Ground Water Issue. United States Environmental Protection Agency.
- Prasad, M. & Freitas, H. 2003. Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology.* 6: 275–321.
- Pugh, R.; Dick, D. & Fredeen, A. 2002. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 52:273–279.
- Pulford, I.; Watson, C. & McGregor, S. 2001. Uptake of chromium by trees: Prospects for phytoremediation. *Environ Geochem Health.* 23:307-311.
- Quaghebeur, M. & Rengel, Z. 2003. The distribution of arsenate and arsenite in shoots and roots of *Holcus lanatus* is influenced by arsenic tolerance and arsenate and phosphate supply. *Plant Physiol.* 132:1600-1609.
- Raskin, I. & Ensley, B. D. *Phytoremediation of toxic metals.* 2000. John Wiley and Sons, Ltd. Publisher
- Ravichandran, M.; Aiken, G.; Reddy, M. & Ryan, J. 1998. Enhanced dissolution of cinnabar (mercuric sulfide) by dissolved organic matter isolated from the Florida Everglades. *Environ Sci Tech.* 32:3305-3311.
- Rugh, C.; Senecoff, J.; Meagher, R. & Merkle, S. 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nat Biotechnol.* 16:925-928.
- Rugh, C.; Wilde, H.; Stack, N.; Thompson, D.; Summers, A. & Meagher, R. 1996. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene. *Proc Natl Acad Sci USA.* 93:3182-3187.
- Sadatipour, S.; Mirzaie, L. & Rezaei, A. 2004. An Investigation on Kangan Gas Refinery Waste Water. *International Journal of Environmental Science & Technology,* 1: 205-213.
- Salido, A.; Hasty, K.; Lim, J. & Butcher, D. 2003. Phytoremediation of arsenic and lead in contaminated soil using Chinese brake ferns (*Pteris vittata*) and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Int J Phytoremediation.* 5:89-103.
- Salt, D.; Smith, R. & Raskin, I. 1998. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol.* 49:643-668.
- Salt, D.; Pickering, I.; Prince, R.; Gleba, D.; Dushenkov, S.; Smith, R. & Raskin, I. 1997. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian mustard. *Environ Sci Technol.* 31:1635-1644.
- Selinus, O.; Alloway, B.; Centeno, J. A.; Finkelman, R.B.; Fuge, R. Lindh, U. & Smedley, P. 2005. *Essentials of Medical Geology.* 351- 373.
- Song, J.; Zhao, F.; Luo, Y.; McGrath, S. & Zhang, H. 2004. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. *Environ Pollut.* 128:307-315.
- Tollsten, L. & Muller, P. 1996. Volatile organic compounds emitted from beech leaves. *Phytochem.* 43:759-762.

- Tordoff, G. M.; Baker, A. J. M. & Willis, A. J. 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41(1-2), 219-228.
- Turgut, C.; Pepe, K. & Cutright, T. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environ Pollution*. 131:147-154.
- Van Huysen, T.; Terry, N. & Pilon-Smits, EAH. 2004. Exploring the selenium phytoremediation potential of transgenic Indian Mustard overexpressing ATP sulfurylase or cystathionine- $\gamma$ -synthase. *Int J Phytoremediation* 6:1-8.
- Wang, J.; Zhao, F.; Meharg, A.; Raab, A.; Feldmann, J. & McGrath, S. 2002. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. *Plant Physiol*. 130:1552-1561.
- Wu, J. Hsu, F. & Cunningham, S. 1999. Chelate-assisted Pb phytoextraction: Pb availability, uptake, and translocation constraints. *Environ Sci Tech*. 33:1898-1904.