

## مروری بر گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

محمد رضا نادری<sup>\*۱</sup>

[munajafabad@yahoo.com](mailto:munajafabad@yahoo.com)

عبدالرزاق دانش شهرکی<sup>۲</sup>

رضوان نادری<sup>۳</sup>

### چکیده

سمیت فلزات سنگین و تجمع آن‌ها در زنجیره‌های غذایی یکی از اصلی‌ترین معضلات زیست محیطی و بهداشتی جوامع مدرن است. اگرچه امکان اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از تکنیک‌های شیمیایی، فیزیکی و یا زیستی وجود دارد، اما روش‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح مناطق آلوده به فلزات سنگین هزینه‌بر، وقت‌گیر و تخریب‌کننده‌ی محیط زیست می‌باشند. از این رو، طی سال‌های اخیر دانشمندان و مهندسين درصدد طراحی و توسعه‌ی تکنیک‌های زیستی برآمدند که بتوانند مکان‌های آلوده به فلزات سنگین را بدون آنکه بر حاصلخیزی و تنوع بیولوژیکی خاک اثرات سوئی داشته باشند پاکسازی و تعدیل نمایند. گیاه‌پالایی از جمله فناوری‌های سبز و دوست‌دار محیط‌زیست است، که از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و از لحاظ انرژی کم هزینه می‌باشد. این فناوری دربرگیرنده‌ی استفاده از گیاهان و ریزجانداران وابسته به آن‌ها جهت پاکسازی و یا تثبیت آلاینده‌های سمی نظیر فلزات سنگین است. در مقاله‌ی حاضر مروری کوتاه بر فناوری گیاه‌پالایی و تکنیک‌های مختلف آن خواهیم داشت.

**کلمات کلیدی:** فلزات سنگین، گیاه‌پالایی، استخراج گیاهی، تصفیه‌ی گیاهی، تیخیر گیاهی، تثبیت گیاهی.

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد\* (مسئول مکاتبات).

۲- استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و تکنولوژی بذر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

## مقدمه

فلزات سنگین از جمله آلاینده‌های زیست محیطی هستند که در تمام نقاط جوامع صنعتی یافت می‌شوند (۱). واژه‌ی فلزات سنگین به فلزها و شبه فلزهایی که دارای چگالی بیش از ۵ گرم بر سانتیمتر مکعب هستند، اطلاق می‌شود. سرب (Pb)، روی (Zn)، مس (Cu)، کادمیم (Cd)، نیکل (Ni)، آرسنیک (As)، آهن (Fe)، منگنز (Mn)، مولیبدن (Mo)، کبالت (Co)، منیزیم (Mg)، جیوه (Hg)، کروم (Cr)، نقره (Ag) و سلنیوم (Se) از جمله‌ی این فلزات می‌باشند (۲). سمیت فلزات سنگین و تجمع آن‌ها در زنجیره‌های غذایی یکی از اصلی‌ترین معضلات زیست محیطی و بهداشتی جوامع امروزی است (۲). آلودگی خاک به وسیله‌ی فلزات سنگین با آلودگی آب یا هوا متفاوت است، چرا که فلزات سنگین در داخل خاک به مدت طولانی‌تری نسبت به سایر بخش‌های بیوسفر باقی می‌مانند و در خاک دوام و بقای بیشتری دارند (۱). معضل اصلی مربوط به فلزات سنگین آن است که این آلاینده‌های غیرآلی بر خلاف آلاینده‌های آلی تجزیه‌پذیر نمی‌باشند. این واقعیت، فلزات سنگین را به یکی از خطرناک‌ترین گروه آلاینده‌های زیست محیطی مبدل ساخته است (۳). گیاهان به برخی از فلزات سنگین در غلظت‌های بسیار پایین نیاز دارند، اما زمانی که غلظت این فلزات از حد نیاز گیاه بالاتر می‌رود منجر به بروز اختلالات متابولیکی و بازدارندگی رشد اغلب گونه‌های گیاهی می‌گردند (۳). فلزات سنگینی مانند مس و روی برای رشد و نمو طبیعی گیاه ضروری هستند، چراکه این فلزات از اجزای ساختمانی بسیاری از آنزیم‌ها و پروتئین‌ها می‌باشند (۳). به عنوان مثال، فلز روی جزء سازنده‌ی بسیاری از آنزیم‌ها شامل دهیدروژناز، پروتئیناز و پپتیداز است و در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، فسفات‌ها و اکسین‌ها و نیز در تشکیل ریبوزوم و RNA در گیاهان مشارکت دارد. مس در تعدادی از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه شامل فتوسنتز، تنفس، توزیع کربوهیدرات‌ها، متابولیسم نیتروژن و دیواره‌ی سلولی و تولید دانه، که در مقاومت گیاه نسبت به بیماری‌ها نقش دارند، سهیم است (۳). به هر حال، زمانی که این فلزات با غلظت‌های

بالا در خاک وجود داشته باشند اثرات سمی و مخربی را بر سلول‌ها ایجاد خواهند کرد (۳). لذا، وجود مقادیر بسیار زیاد از هر دو گروه فلزات ضروری (شامل روی، مس، آهن، منگنز، منیزیم و مولیبدن) و غیرضروری (مانند سرب، کادمیم، جیوه، آرسنیک، کروم، سلنیوم، کبالت و نقره) در خاک منجر به بروز علائم مسمومیت و جلوگیری از رشد گیاهان می‌شود (۳). طی ده سال اخیر، میزان انتشار سالانه فلزات سنگین در جهان به ۲۲۰۰۰ تن برای کادمیم، ۹۳۹۰۰۰ تن برای مس، ۷۸۳۰۰۰ تن برای سرب و ۱۳۵۰۰۰۰ تن برای روی، رسیده است (۴). منشأ فلزات سنگین آلوده‌کننده‌ی خاک شامل استخراج و ذوب سنگ‌های معدنی فلزدار، صنایع ریخته‌گری، لجن و رسوبات باطری اتومبیل، تمرین‌های نظامی، مناطق دفن و انباشت زباله‌ها و فاضلاب‌ها، کودهای کشاورزی و صنایع الکترونیکی، می‌باشد (۵). در گونه‌های گیاهی غیر مقاوم، فلزات سنگین طیف وسیعی از فعالیت‌های سلولی گیاه شامل فتوسنتز، تنفس، تغذیه‌ی معدنی، ویژگی‌ها و ساختمان غشای سلولی و بیان ژن را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۶). کادمیم (Cd) یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های خاک است که اثرات سوء آن شامل جلوگیری از رشد ریشه و اندام هوایی گیاه، کاهش شدید عملکرد محصول، تأثیر بر جذب عناصر غذایی و تعادل زیستی<sup>۱</sup> می‌باشد. به علاوه، این فلز با تجمع در محصولات زراعی مهم و متعاقباً ورود به زنجیره‌های غذایی، معضلات بسیار جدی را برای سلامت و بهداشت انسان‌ها و حیوانات ایجاد می‌کند (۶). کاهش زیست‌توده‌ی گیاه، پیامد مستقیم مسمومیت ناشی از کادمیم است که به واسطه‌ی جلوگیری کادمیم از سنتز کلروفیل و انجام فتوسنتز رخ می‌دهد (۶). ممکن است که غلظت‌های بسیار بالای کادمیم منجر به کاهش جذب عناصر غذایی، جلوگیری از فعالیت‌های آنزیمی و القای تنش اکسداتیو<sup>۲</sup>، که شامل دگرگونی در آنزیم‌های مربوط به سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدان<sup>۳</sup> است، شود (۶). خلاصه‌ای از اثرات ایجاد

1- Homeostasis

2- Oxidative stress

3- Antioxidant

شده در گیاهان به وسیله فلزات سنگین کادمیم، کروم، مس، جیوه، نیکل، سرب، و روی، در جدول ۱ موجود می‌باشد. استفاده از لجن فاضلاب، زباله‌های شهری و کودهای شیمیایی حاوی کادمیم (مانند کودهای فسفره) باعث افزایش غلظت کادمیم در خاک می‌شود (۶).

جدول ۱- اثرات اصلی فلزات سنگین در گیاهان (۷)

فلز	اثرات
کادمیم	کاهش جوانه‌زنی بذر، مقدار لیپید و رشد گیاه؛ القای تولید کلات‌های گیاهی
کروم	کاهش فعالیت آنزیمی و رشد گیاه؛ آسیب رساندن به غشای سلول و ریشه‌ی گیاه و ایجاد سبزاک
مس	جلوگیری از فتوسنتز، رشد گیاه و فرآیندهای تولیدمثلی؛ کاهش سطح بیرونی تیلاکوئید
جیوه	کاهش فعالیت فتوسنتزی، جذب آب و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان؛ تجمع فنول و پرولین
نیکل	کاهش جوانه‌زنی بذر، تجمع ماده‌ی خشک، تولید پروتئین، کلروفیل‌ها و آنزیم‌ها؛ افزایش آمینواسیدهای آزاد
سرب	کاهش تولید کلروفیل و رشد گیاه؛ افزایش سوپراکساید دیسموتاز
روی	کاهش سمیت نیکل و جوانه‌زنی بذر؛ افزایش رشد گیاه و نسبت ATP به کلروفیل

بر سیستم تنفسی شده و با بروز بیماری‌های استخوانی در ارتباط است (۱۰). علاوه بر این، کادمیم دارای اثرات سرطان‌زایی نیز می‌باشد (۱۱). به واسطه‌ی قرار گرفتن ممتد و طولانی مدت در معرض سرب، به تدریج غلظت آن در بافت‌های بدن انسان افزایش یافته و موجب اختلال در فعالیت‌های طبیعی مغز، کلیه‌ها، دستگاه تولیدمثلی و سیستم قلبی-عروقی می‌گردد. بر اساس گزارشات موجود، کودکان بسیار آسانتر از افراد بالغ، سرب را در دستگاه گوارشی خود جذب نموده و از طرف دیگر، سیستم عصبی کودکان در حال رشد نسبت به اثرات مخرب این فلز بسیار حساس می‌باشد (۱۰). مسمومیت ناشی از سرب در کودکان باعث آسیب‌های عصبی می‌شود و این صدمات منجر به کاهش ضریب هوشی، از دست دادن حافظه‌ی کوتاه مدت، ناتوانی در یادگیری و اختلالات هماهنگی اعضاء می‌گردند (۱۱). اثرات آرسنیک شامل مشکلات قلبی-عروقی، سرطان پوست و سایر معضلات پوستی، بیماری‌های سیستم عصبی محیطی و آسیب‌های کلیوی، است (۱۰). خطرات اصلی ناشی از جیوه بر سلامت انسان‌ها شامل آسیب رساندن به سیستم عصبی با علایمی از جمله لرزش غیرقابل کنترل، ضعف ماهیچه‌ای، کم‌بینایی و معیوب و بدشکل شدن اندام‌های نوزادان در رحم مادر می‌باشد (۱۷). از این رو، به منظور احیای

سرب (Pb)، یکی دیگر از فلزات سنگین است که دارای کارکرد زیستی مشخصی نمی‌باشد و از پتانسیل ایجاد مسمومیت برای گیاهان و سایر موجودات زنده برخوردار است. این فلز به دلیل پراکنش گسترده در جوامع شهری و صنعتی و خطر بالقوه‌ی آن برای محیط زیست، سلامت انسان‌ها و حیوانات، منشأ نگرانی‌های متعددی گردیده است. سرب نه تنها فعالیت ریزجانداران خاک را تحت تأثیر قرار داده و سبب از دست رفتن حاصلخیزی خاک می‌شود، بلکه باعث بروز تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد گیاهان و در نهایت کاهش عملکرد آن‌ها نیز می‌گردد (۸). این فلز به واسطه‌ی ورود به زنجیره‌های غذایی، در بدن انسان‌ها و حیوانات تجمع می‌یابد و سلامتی آن‌ها را به مخاطره می‌اندازد (۸). فلزات سنگین سمی به DNA آسیب می‌رسانند و احتمالاً اثرات سرطان‌زایی آن‌ها در حیوانات و انسان‌ها از قابلیت جهش‌زایی این فلزات سرچشمه می‌گیرد (۹). قرار گرفتن در معرض سطوح بالای این فلزات با ایجاد اثرات مخرب در سلامتی انسان‌ها و حیات وحش مرتبط است (۱۰). کادمیم دارای نیمه عمر بسیار طولانی در بدن انسان است و به میزان زیاد در کبد و کلیه‌ها تجمع می‌یابد. این عنصر برای مدت نسبتاً طولانی (۲۰ تا ۳۰ سال) در کلیه‌های انسان باقی می‌ماند و در غلظت‌های بالا موجب اثرگذاری سوء

گیاهان همچنان بالا خواهد بود. ۲- نشانگرهای فلز<sup>۳</sup>: این گیاهان فلزات را در بافت‌های هوایی خود انباشت می‌کنند و به طور کلی غلظت فلز در بافت‌های این گیاهان منعکس‌کننده‌ی غلظت آن فلز در خاک می‌باشد. ۳- ذخیره‌کنندگان فلز<sup>۴</sup>: این گونه‌های گیاهی که تحت عنوان بیش‌اندوز<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند، قادرند فلزات را تا سطوح بسیار بالاتر از غلظت‌هایی که در خاک و یا بافت‌های گیاهان غیربیش‌اندوز مجاور آن‌ها وجود دارد، در اندام هوایی خود متمرکز و انباشت نمایند. به طور کلی، صرف نظر از غلظت فلز در خاک، گونه‌های گیاهی که بتوانند عناصر نیکل، کبالت، مس، کروم و سرب را به میزان بیش از ۰/۱ درصد وزن خشک و فلز روی را به میزان بیش از ۱ درصد وزن خشک اندام هوایی انباشت نمایند، بیش‌اندوز محسوب می‌شوند (۱۳).

#### مکانیسم‌های تعادل سلولی، تحمل و سم‌زدایی از یون‌های فلزی در گیاهان تحت تنش

تحمل به فلز در گیاهان، به صورت توانایی زنده ماندن در خاکی که برای گیاهان دیگر سمی است، تعریف شده و به واسطه‌ی برهم‌کنش بین ژنوتیپ گیاه و محیط بروز می‌یابد (۱۴). گیاهان برای محافظت از خود در برابر مسمومیت فلزی باید مکانیسمی را توسعه دهند که به وسیله‌ی آن، فلز وارد سیتوسول شده و در آنجا یا فوراً به بیرون رانده شود و یا پیوند برقرار کرده و غیرفعال گردد و بدین طریق از غیرفعال شدن پروتئین‌های کاتالیزکننده (آنزیم‌ها) یا پروتئین‌های ساختاری توسط فلز جلوگیری به عمل می‌آید (۱۵).

#### ناقلین فلزی

ناقلین، واسطه‌ی ورود یون‌های فلزی از طریق ریشه‌ی گیاه به درون سلول‌های آن می‌باشند. تعدادی از ناقلین در حد فاصل بین سیتوسول و غشای پلاسمایی، برخی در واکوئل‌ها و تعدادی نیز در اجسام گلژی وجود دارند. در گیاهان

مجدد اراضی و حداقل کردن خطر ورود عناصر سمی به زنجیره‌های غذایی، پاکسازی اغلب مکان‌های آلوده به فلزات سنگین امری ضروری است (۱۱).

#### واکنش‌های گیاهی نسبت به فلزات سنگین

سمیت گیاهی ناشی از فلزات سنگین بر حسب گونه‌ی گیاه متفاوت است. برای گیاهان گل‌دار سمیت فلزات سنگین به ترتیب آرسنیک (As)~جیوه (Hg) < کادمیم (Cd) < تالیوم (Tl) < سلنیوم (Se) < سرب (Pb) < بیسموت (Bi)~آنتیمون (Sb)، می‌باشد (۱۲). با این وجود، نکته مهم آن است که عوامل متعددی می‌توانند این ترتیب را تحت تأثیر قرار دهند. این عوامل شامل ویژگی‌های خاک و نوع گیاه می‌باشند (۱۲). حساسیت گیاهان نسبت به فلزات سنگین وابسته به شبکه‌ای از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی مرتبط به هم است که تعدادی از این مکانیسم‌ها شامل ۱- جذب و انباشت فلزات از طریق برقراری پیوند با مواد مترشحه‌ی برون سلولی و اجزای سازنده‌ی دیواره‌ی سلولی؛ ۲- جریان فلزات سنگین از سیتوپلاسم به سمت اجزای سلولی واقع شده در بیرون از هسته مانند واکوئل‌ها؛ ۳- تشکیل کمپلکس در درون سلول، میان یون‌های فلزی با مواد مختلفی از جمله اسیدهای آلی، آمینواسیدها، کلات‌های گیاهی و متالوتیونین‌ها؛ ۴- تجمع اسمولیت‌ها و محافظین اسمزی<sup>۱</sup> و القای تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان؛ ۵- فعال‌سازی یا تعدیل متابولیسم گیاه به منظور فراهم آوردن تعداد کافی از مسیرهای متابولیکی عملیاتی و احیای سریع ساختارهای سلولی آسیب‌دیده می‌باشد (۱۳).

گیاهان به منظور ادامه دادن به رشد خود بر سطح خاک‌های آلوده به فلز، از سه استراتژی اصلی بهره می‌گیرند: ۱- طردکنندگان فلز<sup>۲</sup>: این گیاهان طی زمانی که طیف وسیعی از غلظت‌های فلز در خاک موجود است، به طور موثری از ورود یون‌های فلزی به درون بخش‌های هوایی خود جلوگیری می‌کنند، با این وجود، غلظت فلزات سنگین در ریشه‌های این

3- Metal indicators  
4- Metal accumulators  
5- Hyperaccumulators

1- Osmoprotectants  
2- Metal excluders

غلظت ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابری کادمیم را زمانی که این فلز با یک کلات گیاهی کمپلکس ایجاد کرده است در مقایسه با هنگامیکه به صورت یون رادیکال آزاد می‌باشد، تحمل کنند. محققین دریافته‌اند که گیاهان حساس نسبت به فلزات، فاقد توانایی لازم برای تشکیل کمپلکس‌های کلات-فلز می‌باشند (۱۸). مشخص شده است که میزان سنتز کلات‌های گیاهی در گونه‌های مقاوم به آرسنیک *Holcus lanatus* L نسبت به گونه‌های غیرمقاوم بسیار بیشتر است (۱۸). صرفنظر از سم‌زدایی، کلات‌های گیاهی در برقراری تعادل زیستی فلزات در گیاهان نیز نقش دارند. کلات‌های گیاهی از یک طرف به واسطه‌ی ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی، آن‌ها را جمع‌آوری و در واکوئل‌ها انباشت می‌کنند و از طرف دیگر، فلزات ضروری را به آپو آنزیم‌های تازه سنتز شده‌ای که نیازمند یون‌های  $\text{Cu}^{2+}$  یا  $\text{Zn}^{2+}$  جهت آغاز فعالیت کاتالیزوری خود هستند و یا به ساختارهای نوکلئیک‌اسیدی انتقال می‌هند (۱۸).

متالوتیونین‌ها، پروتئین‌های غنی از سیستئین هستند که دارای جرم مولکولی کم می‌باشند و در خوشه‌های تیولات-فلز<sup>۵</sup> شناسایی شده در جنین‌های بالغ گیاهان خانواده‌ی گندمیان، به شکل پروتئین اولیه و ساده‌ی سیستئین‌دار به یون‌های فلزی متصل می‌شوند. مشخص شده است که بیان بیش از حد ژن‌های القاکننده‌ی تولید متالوتیونین‌ها موجب افزایش تحمل گیاهان نسبت به فلزات سنگین (خصوصاً روی و مس) می‌شود (۱۸).

اسیدهای آلی و آمینواسیدها به دلیل توانایی یون‌های فلزی در واکنش با گوگرد (S)، نیتروژن (N) و اکسیژن (O)، لیگاند‌های القاکننده‌ی بالقوه‌ای برای کلات‌سازی می‌باشند. سیترات، مالات و اگزالات در دامنه‌ای از فرآیندها شامل درجات متفاوت تحمل فلز، انتقال فلز از طریق آوند آبکش و انباشت و ذخیره‌ی فلزات در واکوئل‌ها مشارکت دارند (۱۹). اسیدسیتریک در گیاهان ذخیره‌کننده‌ی نیکل، با یون  $\text{Ni}^{2+}$  کمپلکس تشکیل می‌دهد و موجب انباشت این فلز در واکوئل‌ها و در نتیجه افزایش تحمل گیاه نسبت به آن می‌شود (۱۹). به همین نحو، مالات نیز در گیاهان متحمل به روی به عنوان یک کلات‌ساز

بیش‌اندوز، تحت شرایط وجود غلظت‌های بالای فلزات در خاک، بیان ژن‌های القاکننده‌ی تولید ناقلین فلزی به صورت افزایشی تنظیم می‌گردد (با افزایش غلظت فلز بیان این ژن‌ها نیز افزایش می‌یابد) و این امر موجب افزایش جذب و ورود یون‌های فلزی به درون سلول‌های گیاه می‌شود (۱۶). از طرف دیگر، مشخص شده است که بیان بیش از حد ژن‌های القاکننده‌ی تولید ناقلین فلزی در مقاومت گونه‌های گیاهی بیش‌اندوز نسبت به فلزات سنگین نیز نقش دارد. این در حالی است که در گونه‌های گیاهی غیربیش‌اندوز<sup>۱</sup> تنها تحت شرایط کمبود عناصر فلزی ضروری، بیان ژن‌های القاکننده‌ی تولید ناقلین فلزی افزایش می‌یابد (۱۶).

### کلات‌ها و سم‌زدایی از یون‌های فلزی

کلات‌ها از طریق دربرگرفتن یون‌های فلزی موجود در سیتوسول، موجب سم‌زدایی از آن‌ها می‌شوند. در گیاهان، گروه‌های اصلی کلات‌ها شامل کلات‌های گیاهی<sup>۲</sup>، متالوتیونین‌ها<sup>۳</sup>، اسیدهای آلی و آمینواسیدها، می‌باشند. کلات‌های گیاهی، پپتیدهای غنی از سیستئین کوچکی می‌باشند که در پاسخ به فلزات سنگین تولید می‌شوند (۱۷). واکنش تشکیل کلات‌های گیاهی به وسیله‌ی آنزیم فیتوکلئیتین‌سینتتاز<sup>۴</sup> که نیازمند فعال‌سازی قبل از ترجمه توسط فلزات سنگین و یا شبه‌فلزها، خصوصاً کادمیوم، نقره، سرب، مس، جیوه، روی، قلع و طلا می‌باشد، کاتالیز می‌شود. مولکول‌های کلات گیاهی با فلزات سنگین کمپلکس تشکیل می‌دهند و سپس کمپلکس سیتوسولی کلات-فلز که وزن مولکولی کمی دارد به واکوئل انتقال یافته و در آنجا با اضافه شدن آنیون گوگرد ( $\text{S}^{2-}$ )، کمپلکس‌های مولکولی اصلی و بزرگ تشکیل می‌شوند و بدین ترتیب یون‌های فلزی در واکوئل‌ها تجمع می‌یابند و دیگر نخواهند توانست موجب مسمومیت اجزای حیاتی سلول گردند (۱۷). آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که یکسری از آنزیم‌های گیاهی حساس به فلز می‌توانند

- 1- Non-hyperaccumulator
- 2- Phytochelatins
- 3- Metallothioneins
- 4- Phytochelatin synthase

روش‌های زیستی برای پاکسازی محیط زیست شامل فن‌آوری‌های زیست‌پالایی<sup>۱</sup> می‌باشد. زیست‌پالایی بر مبنای استفاده از ریزجانداران طبیعی موجود و یا ریزجانداران ایجاد شده توسط مهندسی ژنتیک به منظور احیای مجدد مکان‌های آلوده و حفاظت از محیط زیست استوار است (۲۱). علاوه بر ریزجانداران، گونه‌های گیاهی خاص که غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین را بدون بروز علائم مسمومیت در بافت‌های خود ذخیره می‌کنند نیز دارای توانایی احیای مجدد محیط زیست در فرآیندی تحت عنوان گیاه‌پالایی<sup>۲</sup> می‌باشند. گیاه‌پالایی می‌تواند روش‌های پایداری را برای اصلاح خاک‌های مبتلا به تجمع فلزات سنگین فراهم آورد (۲۱). گیاه‌پالایی که دربرگیرنده‌ی استفاده از گیاهان برای زدودن، انتقال دادن، تثبیت کردن و یا تقلیل آلودگی‌ها در خاک، رسوبات و آب است، به مجموعه‌ی متنوعی از فن‌آوری‌های گیاه‌بنیان اطلاق می‌شود که از گیاهان طبیعی موجود و یا گیاهان ایجاد شده از طریق مهندسی ژنتیک جهت پاکسازی محیط‌های آلوده استفاده می‌کنند (۲۲). برحسب نوع آلاینده‌ها، شرایط منطقه، درجه‌ی اصلاح مورد نیاز و گونه‌ی گیاهی، فن‌آوری گیاه‌پالایی می‌تواند به صورت تثبیت گیاهی<sup>۳</sup> جهت محدود کردن آلاینده‌ها و یا به صورت استخراج گیاهی<sup>۴</sup> و تبخیر گیاهی<sup>۵</sup> جهت حذف آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد (۲۲). از آنجایی که گیاه‌پالایی به صورت درجا باعث پاکسازی آلودگی‌ها می‌شود، به حرکت درآمدن و برانگیخته شدن آن با استفاده از نور خورشید صورت می‌پذیرد و پس از کاشت گیاه به حداقل عملیات داشت و نگه داری نیاز دارد، هزینه‌ی آن به طور میانگین ۰/۱ سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح و ترمیم خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است و علاوه بر این، به دلیل بهره‌گیری از گیاهان، این فن‌آوری از لحاظ زیبایی نیز بسیار خوشایند و مطبوع می‌باشد (۲۳). تا به امروز، بیش از ۴۰۰ گونه‌ی گیاهی متعلق به ۴۵ خانواده که از پتانسیل ژنتیکی جذب و تحمل مقادیر بالای فلزات سنگین در

سیتوسولی عمل می‌نماید (۱۹). گزارش شده است که سالیسیلیک‌اسید نیز نقش مهمی در حفظ تعادل یونی گیاهچه‌های یونجه‌ی تیمار شده با کادمیم و آهن دارد. نقش هیستیدین نیز در کلاته کردن یون‌های فلزی، مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده است که میزان هیستیدین عصاره‌ی آوند چوبی گیاه بیش‌اندوز نیکل، یعنی *Alyssum lesbiacum* در معرض این فلز سنگین تا ۳۶ برابر افزایش می‌یابد (۱۹).

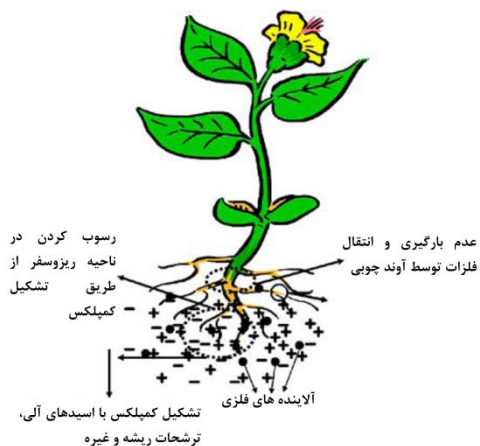
### روش‌های اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

از زمان آغاز انقلاب صنعتی، آلودگی زمین توسط فلزات سمی شتاب بسیار زیادی به خود گرفته است (۲۰). به طور کلی، امکان تجزیه‌ی زیستی فلزات سنگین به فرآورده‌های با سمیت کمتر یا بیشتر وجود ندارد، لذا این فلزات بدون تغییر در محیط زیست باقی می‌مانند. از این رو، اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تنها با استفاده از تکنیک‌هایی که این آلاینده‌ها را از خاک خارج نموده و یا آن‌ها را در مکان خود تثبیت نمایند، امکان‌پذیر است (۲۰). اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از تکنیک‌های شیمیایی، فیزیکی و یا زیستی صورت می‌پذیرد (۲۰). تیمارهای فیزیکی و شیمیایی به صورت برگشت ناپذیر خصوصیات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تنوع زیستی را از بین می‌برند و ممکن است که خاک را به یک محیط کشت بی‌فایده و غیرحاصلخیز برای رشد گیاهان مبدل سازند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح و ترمیم خاک‌های آلوده عمدتاً پرهزینه نیز هستند. اصلاح شیمیایی مستلزم استفاده از مواد شیمیایی برای پاکسازی محیط‌زیست طبیعی است، اما این روش یک روش عمومی نیست، بدین معنا که یک ماده‌ی شیمیایی نمی‌تواند برای زدودن تمام یون‌های فلزی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، وجود گروه‌ها و انواع زیادی از مواد شیمیایی، پاکسازی فلزات سمی از محیط زیست را به فرآیندی بسیار پیچیده تبدیل کرده است (۲۱).

امروزه نیاز به توسعه‌ی روش‌های زیستی اصلاح خاک، که از لحاظ هزینه مقرون‌به‌صرفه باشند و آلودگی‌ها را بدون تأثیر گذاشتن بر حاصلخیزی خاک از بین ببرند، است. استفاده از

- 1- Bioremediation
- 2- Phytoremediation
- 3- Phytostabilization
- 4- Phytoextraction
- 5- Phytovolatilization

بهره‌گیری از تکنیک تثبیت گیاهی به نتایج ارزشمندی دست یافت (۲۵).



تصویر ۱- شمای کلی تکنیک تثبیت گیاهی

ویژگی‌های اختصاصی گیاهان مناسب برای استفاده در تثبیت گیاهی آلاینده‌های فلزی عبارتند از: ۱- متحمل بودن نسبت به غلظت‌های بالای فلزات سنگین، ۲- تولید مقادیر زیاد زیست‌توده‌ی ریشه‌ای به منظور جذب درونی یا سطحی یون‌های فلزی و جلوگیری از تحرک آن‌ها در خاک و ۳- ناتوانی گیاه در انتقال مقادیر زیاد آلاینده‌های فلزی از ریشه به اندام هوایی، به طوری که نیازی به مدیریت شاخ و برگ برداشت شده گیاه نباشد (۲۶).

یون و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که گیاهان دارای فاکتور تجمع<sup>۱</sup> بالا (شامل غلظت فلز سنگین در ریشه‌ی گیاه تقسیم بر غلظت همان فلز در خاک) و فاکتور انتقال<sup>۲</sup> پایین (شامل غلظت فلز سنگین در اندام هوایی گیاه تقسیم بر غلظت همان فلز در ریشه‌ی گیاه)، از توانایی تثبیت فلزات سنگین برخوردار هستند (۲۷).

از گونه‌های گیاهی که تاکنون به منظور تثبیت گیاهی فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به *Agrostis tenuis* (سرب، روی و مس)، *Festuca rubra* (سرب و روی)، *Zygophyllum fabago* (سرب، روی و مس)، *Lupinus angustifolius* *Horedeum vulgare* (مس)،

بخش‌های هوایی خود برخوردار هستند، شناسایی شده است (۱۱).

## تکنیک‌های مختلف فناوری گیاه پالایی

### تثبیت گیاهی

در این تکنیک، گیاهان مستقر در مکان آلوده به جای خارج نمودن آلاینده‌ها از خاک، به واسطه‌ی جذب فلزات در درون یا بر سطح ریشه‌های خود آن‌ها را تثبیت و غیرمتحرک می‌سازند. تثبیت گیاهی در برگرفته‌ی استفاده از گونه‌های گیاهی ویژه به منظور غیرمتحرک کردن آلاینده‌ها در خاک از طریق جذب فلزات به درون سلول‌های ریشه، جذب سطحی بر روی ریشه و یا رسوب در ناحیه‌ی ریزوسفر و تثبیت فیزیکی آلاینده‌های فلزی می‌باشد. با بهره‌گیری از این فرآیند قدرت تحرک آلاینده‌های فلزی کاهش یافته و از انتقال آن‌ها به داخل منابع آب زیرزمینی و یا اتمسفر جلوگیری به عمل می‌آید (۲۴). از طرف دیگر، قابلیت جذب زیستی آلاینده‌های فلزی به منظور ورود به زنجیره‌های غذایی نیز کاهش خواهد یافت. از این روش می‌توان به طور موثری جهت احیای مجدد پوشش گیاهی در مکان‌هایی که پوشش طبیعی آن‌ها به دلیل وجود غلظت‌های بالای فلزات سمی در خاک سطحی و یا اختلالات فیزیکی مواد سطحی خاک از بین رفته است، استفاده نمود (۱). لاسات (۲۰۰۲) در تأیید ضرورت استفاده از این تکنیک برای احیای مناطق آلوده بیان داشت که گیاه پالایی خاک‌های آلوده به سرب مستلزم کاربرد هر دو روش استخراج گیاهی و تثبیت گیاهی می‌باشد (۱). شمای کلی تکنیک تثبیت گیاهی در تصویر ۱ به نمایش در آمده است.

کارایی تثبیت گیاهی در خاک‌های با بافت مناسب، که دارای مقدار زیادی ماده‌ی آلی هستند بیشتر از سایر خاک‌ها است، با این وجود امکان استفاده از این تکنیک در طیف وسیعی از خاک‌های آلوده، به منظور کاهش خطر آبخوبی و حرکت آلاینده‌های فلزی به سمت منابع آب زیرزمینی و همچنین جلوگیری از جابه‌جایی آن‌ها توسط باد به مناطق غیرآلوده‌ی مجاور وجود دارد (۲۵). هنگامی که به دلیل وسعت زیاد منطقه‌ی آلوده و یا نبود بودجه‌ی کافی، استفاده از روش‌های اصلاحی مرسوم تقریباً غیرعملی است، می‌توان با

1- Accumulation factor  
2- Translocation factor

این اوصاف، گونه‌های خاکزی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) و خردل (*Brassica juncea*)، موثرترین گیاهان معرفی شده جهت استفاده در تکنیک تصفیه‌ی گیاهی و زدودن فلزات سنگین از محیط‌های آبی می‌باشند (۲۶). ریشه‌های خردل قادر به جذب کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی هستند در حالی که آفتابگردان سرب، اورانیوم، سزیم ۱۳۷ و استرانسیوم ۹۰ را از محلول‌های هیدروپونیک می‌زاید (۲۹). گیاهان مورد استفاده در فرآیند تصفیه‌ی گیاهی می‌بایست از قدرت تحمل بالایی نسبت به فلزات سنگین برخوردار بوده، دارای هزینه‌ی نگهداری و داشت اندکی باشند، زیست‌توده‌ی ریشه‌ای قابل ملاحظه‌ای تولید نمایند و بتوانند مقادیر زیادی از فلزات سمی را در بافت ریشه و شاخ و برگ خود انباشت کنند (۲۹).

#### تبخیر گیاهی

تبخیر گیاهی، شامل استفاده از گیاهان به منظور استخراج فلزات خاص از خاک و سپس انتشار آن‌ها در اتمسفر به فرم گازی می‌باشد. برخی از آلاینده‌های فلزی نظیر جیوه و سلیسیم به فرم گازی نیز در محیط یافت می‌شوند. فرآیند تبخیر گیاهی دربرگیرنده‌ی استفاده از گیاهان طبیعی موجود و یا گیاهان دستکاری شده با روش‌های مهندسی ژنتیک به منظور جذب فرم‌های عنصری آرسنیک، جیوه و سلیسیم از خاک، تبدیل زیستی آن‌ها در داخل بافت‌های گیاه به گونه‌های گازی شکل توسط آنزیم‌هایی نظیر نیترات‌ردوکتاز، لاکاز<sup>۲</sup>، دی‌هالوژناز<sup>۳</sup> و نیتریلاز و در نهایت آزادسازی آن‌ها به درون اتمسفر می‌باشد (۲۶). مکانیسم کلی فرآیند تبخیر گیاهی در تصویر ۲ به نمایش در آمده است. جیوه و سلیسیم برای موجودات زنده سمی هستند لذا تردیدهایی در مورد این که آیا تبخیر این عناصر به داخل اتمسفر روشی بی‌خطر محسوب می‌شود یا خیر، وجود دارد (۲۶). امروزه بیشتر توجهات به تبخیر گیاهی فلز سنگین سلیسیم معطوف گردیده است، چرا که این عنصر از معضلات زیست محیطی بسیار جدی در نقاطی از جهان که دارای

و *Secale cereale* (آرسنیک)، *Brassica juncea* (کادمیم) و *Helianthus annuus* (سرب) اشاره نمود (۲۶).

#### تصفیه‌ی گیاهی

تصفیه‌ی گیاهی<sup>۱</sup> دربرگیرنده‌ی استفاده از گیاهان برای پاکسازی محیط‌های مختلف آبی است. این روش شامل استفاده از ریشه‌ی گیاهان و یا گیاهچه‌ها به منظور جذب درونی یا سطحی آلاینده‌های فلزی موجود در منابع آبی و فاضلاب‌ها و انتقال آن‌ها به اندام هوایی گیاه می‌باشد (۲۸). گیاهان خاکزی به دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای وسیع‌تر، از کارایی بالاتری نسبت به گیاهان آبی جهت استفاده در تکنیک تصفیه‌ی گیاهی برخوردار هستند. به عنوان مثال بوته‌های آفتابگردان به طور موفقیت‌آمیزی موجب زدودن آلاینده‌های رادیواکتیو از حوضچه‌های دفع فاضلاب نیروگاه اتمی چرنوبیل اکراین گردیدند. فرآیند تصفیه‌ی گیاهی مستلزم پرورش گیاهان خاکزی به صورت هیدروپونیک (آبکشت) و سپس انتقال نشاها به منبع آب آلوده به منظور جذب فلزات سنگین و انباشت آن‌ها در ریشه و اندام هوایی گیاه است (۲۸). از طرف دیگر، ممکن است که ترشحات ریشه‌ای و تغییرات pH ناحیه‌ی ریزوسفر نیز باعث رسوب فلزات بر سطح ریشه گردند. در نهایت، زمانی که ریشه‌ها توسط آلاینده‌های فلزی اشباع شدند، کل گیاه و یا فقط ریشه‌های آن به منظور امحا شدن برداشت می‌گردند (۲۲).

گونه‌های گیاهی آبی که دارای توانایی زدودن فلزات سنگین از منابع آبی هستند شامل سنبل آبی (*Eichhornia crassipes*)، قرح‌مریم (*Hydrocotyle umbellata* L.) و عدسک آبی (*Lemna minor* L.) می‌باشند. با این وجود، این گونه‌ها به دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای کوچک و کم توسعه، کارایی مطلوبی جهت زدودن فلزات سمی از منابع آبی ندارند (۲۸). از طرف دیگر، درصد بالای آب موجود در بافت شاخ و برگ این گیاهان، خشک‌کردن، سوزاندن و کمپوست نمودن آن‌ها را نیز دشوار می‌سازد. علی‌رغم محدودیت‌های مذکور، زو و همکاران (۱۹۹۹) بیان داشتند که سنبل آبی گیاهی کارآمد به منظور زدودن عناصر فلزی نادر از نهرهای فاضلاب است. با تمام

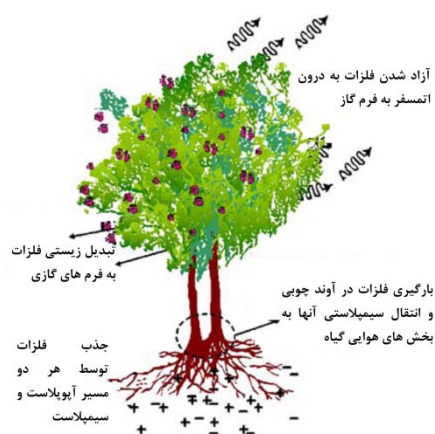
2- Laccase  
3- Dehalogenase

1- Phytofiltration



تبخیر آلاینده‌های فلزی موجود در خاک توسط گیاهان تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تجمع و انباشت آن‌ها در اتمسفر نخواهد داشت (۲).

با تمام این اوصاف، استفاده از تکنیک تبخیرگیاهی در مناطق نزدیک به مراکز پر جمعیت و یا در مکان‌هایی که شرایط آب و هوایی منحصر به فرد آن‌ها موجب رسوب و نشست سریع آلاینده‌های فرار موجود در اتمسفر بر سطح زمین می‌شود، خطرات پیش‌بینی نشده‌ای را به دنبال خواهد داشت (۳۰). از این رو، لازم است که قبل از انتخاب این روش برای اصلاح منطقه‌ی آلوده، پیامدهای آزادسازی ترکیبات فرار فلزی به درون اتمسفر را با دقت مورد مطالعه قرار داد (۳۰).



تصویر ۲- مکانیسم کلی تکنیک تبخیرگیاهی

### استخراج گیاهی

استخراج گیاهی که انباشت گیاهی<sup>۲</sup> نیز نامیده می‌شود، شامل فرآیند جذب آلاینده‌های فلزی موجود در خاک توسط ریشه و سپس انتقال آن‌ها به اندام هوایی گیاه می‌باشد. در این روش از گیاهان خاصی تحت عنوان بیش‌اندوز<sup>۳</sup> که قادر به تجمع مقادیر زیادی از فلزات در اندام هوایی خود و در نتیجه کاهش غلظت این آلاینده‌ها در خاک می‌باشند، استفاده می‌شود. توانایی گیاهان بیش‌اندوز در خارج نمودن فلزات سمی از خاک، نتیجه‌ی وابستگی آن‌ها به جذب فلزاتی نظیر روی، منگنز، مس و منیزیم و همچنین جذب آب، که برای رشد و نمو

خاک‌های غنی از سلینیوم هستند، محسوب می‌شود (۳۰). تری و همکاران (۱۹۹۲) بیان داشتند که گیاهان تیره‌ی شب‌بو<sup>۱</sup> قادر به آزادسازی بیش از ۴۰ گرم سلینیوم بر هکتار در روز به شکل ترکیبات گازی مختلف می‌باشند. بعضی از گیاهان آبرزی مانند لویی (*Typha latifolia* L.) نیز دارای توانایی تبخیر سلینیوم به اتمسفر هستند (۳۰).

میزان سمیت ترکیبات فرار سلینیوم نظیر دی‌متیل‌سلینید به میزان یک-پانصدم تا یک-ششصدم سمیت فرم‌های غیرآلی سلینیوم موجود در خاک است (۲). تبخیر سلینیوم و جیوه توسط گیاهان به اتمسفر یک راه حل دائمی برای مکان‌های آلوده به این فلزات محسوب می‌شود، چرا که با استفاده از تکنیک تبخیرگیاهی فرم‌های غیرآلی این عناصر از خاک زدوده شده و از طرف دیگر، امکان تجمع گونه‌های فرار و گازی شکل آن‌ها در هوای منطقه‌ی مورد نظر و یا مناطق مجاور آن نیز، بسیار اندک می‌باشد (۳۰). به علاوه، ممکن است که با استفاده از این تکنیک، نیازی به اعمال استراتژی‌های مدیریتی خاص در منطقه‌ی آلوده پس از کاشت گیاه مورد نظر نباشد. این روش اصلاحی دارای مزایایی از جمله حداقل به هم خوردگی خاک، فرسایش کمتر و عدم نیاز به از بین بردن مواد گیاهی آلوده، است (۳۰). هیتون و همکاران (۱۹۹۸) بیان داشتند که تبخیرگیاهی جیوه (به شکل دی‌اکسیدجیوه) موجب تجمع مقادیر خطرناک این عنصر برای سلامتی موجودات زنده در داخل اتمسفر نمی‌شود، لذا به نظر می‌رسد که تکنیک تبخیرگیاهی روشی نویدبخش و موثر به منظور اصلاح خاک‌های آلوده به سلینیوم و جیوه باشد (۳۰).

یکی از معایب تکنیک تبخیرگیاهی آن است که در این روش برخلاف سایر روش‌های اصلاحی خاک‌های آلوده، با معضل فقدان کنترل کافی بر آلاینده‌های گازی آزاد شده به داخل اتمسفر در حین مهاجرت و جابه‌جایی آن‌ها به مناطق دیگر مواجه هستیم. با این وجود، تعدادی از بنیانگذاران روش تبخیرگیاهی بر این باورند که ترکیبات آلاینده‌ی فرار به دلیل قرار گرفتن در معرض فرآیندهای طبیعی نظیر تجزیه‌ی نوری، با سرعت بیشتری به ترکیبات بی‌خطر تجزیه شده و در نتیجه

1- Phytoaccumulation  
2- Hyperaccumulators

3- Brassicaceae

تا به امروز بیش از ۴۰۰ گونه‌ی گیاهی متعلق به ۴۵ خانواده نظیر Asteraceae، Brassicaceae، Caryophyllaceae، Fabaceae، Lamiaceae و غیره که از پتانسیل ژنتیکی جذب و تحمل مقادیر بالای فلزات سنگین در اندام هوایی خود برخوردار هستند، شناسایی شده است (۱۵). لیست تعدادی از گونه‌های بیش‌اندوز مقاوم به فلزات، که برای استخراج گیاهی این آلاینده‌ها از خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرند در جدول ۲ موجود است.

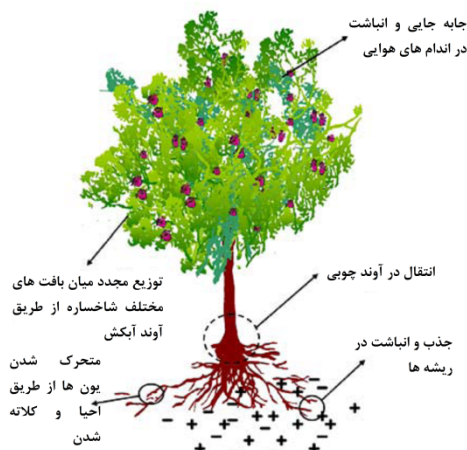
طبیعی گیاه و تداوم بخشیدن به کارکردهای طبیعی آن مورد نیاز هستند، می‌باشد (۱). براساس مطالعات بیکر و بروکس (۱۹۸۹)، گیاهانی که بتوانند فلزات روی و منگنز را به میزان بیش از ۱٪ وزن خشک اندام هوایی، نیکل، کروم، کبالت، مس، سرب و آلومینیوم را به میزان بیش از ۱/۰٪، کادمیوم و سلنیوم را به میزان بیش از ۱/۰٪ و جیوه را به میزان بیش از ۰۰۱/۰٪ وزن خشک اندام هوایی جذب و انباشت نمایند، بیش‌اندوز محسوب خواهند شد (۳).

جدول ۲- شماری از گونه‌های گیاهی بیش‌اندوز طبیعی (۲۶)

گونه‌ی گیاهی	فلز
<i>Pistia stratiotes</i>	نقره، کادمیوم، کروم، مس، جیوه، نیکل، سرب و روی
<i>Helianthus indicus</i>	سرب
<i>Sesbania drummondii</i>	سرب
<i>Lemna gibba</i>	آرسنیک
<i>Alyssum</i>	نیکل
<i>Solanum nigrum</i>	کادمیوم
<i>Thlaspi caerulescens</i>	کادمیوم

فاکتور تجمع (AF) است که شامل غلظت فلز در ریشه‌ی گیاه تقسیم بر غلظت همان فلز در خاک است و می‌بایست بیش از ۱ باشد. شاخص سوم، شاخص تحمل (TI) است که از طریق عدم کاهش و یا کاهش بسیار اندک در زیست‌توده‌ی اندام هوایی گیاه کشت شده بر سطح خاک آلوده به فلز سنگین، مشخص می‌گردد (۳۱). یافتن گونه‌های گیاهی بیش‌اندوزی که به طور همزمان دارای تمام شاخص‌های ذکر شده باشند نسبتاً دشوار است، چرا که اغلب گونه‌های بیش‌اندوز دارای زیست‌توده‌ی هوایی ناچیز، رشد کند و دوره‌ی بلوغ طولانی می‌باشند و این امر موجب می‌شود که پاکسازی مکان آلوده سال‌ها یا حتی ده‌ها سال به طول بیانجامد. لذا در سال‌های اخیر استفاده از گیاهان متحمل به فلزات سنگین، که از توانایی جذب و تجمع مقادیر نسبتاً بیشتری از آلاینده‌های فلزی در مقایسه با سایر گیاهان (به استثنای گیاهان بیش‌اندوز) و زیست توده‌ی بالا برخوردار هستند نظیر ذرت، برنج، آفتابگردان و خردل در ترکیب با عوامل کلات‌ساز مصنوعی مورد توجه محققین قرار گرفته و

گیاهان مناسب برای استفاده در استخراج گیاهی باید دارای صفات زیر باشند: ۱- قدرت تحمل بالا نسبت به فلزات، ۲- توانایی جذب و انباشت مقادیر زیاد چندین فلز در اندام هوایی، ۳- تولید بیوماس زیاد، ۴- رشد سریع، ۵- مقاومت نسبت به آفات و بیماری‌ها، ۶- جذابیت نداشتن برای حیوانات و ۷- به حداقل رساندن خطر انتقال فلزات به سطوح بالاتر زنجیره‌های غذایی (۲۲). علاوه بر ویژگی‌های ذکر شده، سه ویژگی مهم دیگر نیز در شناسایی یک گیاه به عنوان گونه‌ی بیش‌اندوز مناسب برای استخراج گیاهی فلزات مد نظر قرار می‌گیرد. اولین ویژگی فاکتور انتقال (TF) است که به صورت غلظت فلز در اندام هوایی گیاه تقسیم بر غلظت همان فلز در ریشه‌ی گیاه تعریف می‌شود و می‌بایست بالاتر از ۱ باشد (به عبارتی باید غلظت فلز در اندام هوایی گیاه بیش از غلظت آن فلز در ریشه‌ی گیاه باشد) (۳۱). فاکتور انتقال در تکنیک استخراج گیاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که در این روش هدف اصلی برداشت اندام هوایی گیاه می‌باشد. ویژگی دوم



تصویر ۳- شمای کلی تکنیک استخراج گیاهی

### مدیریت بیوماس گیاهی باقیمانده پس از گیاه پالایی فلزات سنگین

استخراج گیاهی مستلزم کشت مکرر گیاه در خاک آلوده تا زمان کاهش غلظت فلز به سطح مجاز است. پس از هر مرتبه برداشت محصول از منطقه آلوده، مقدار زیادی زیست توده گیاهی خطرناک غنی از فلز بر جای می ماند که باید جهت به حداقل رساندن خطرات زیست محیطی، به طور مناسب در محلی انبار و یا نابود گردد. به منظور کاهش حجم زیست توده گیاهی از فلز، می بایست آنرا سوزاند و تخمیر کرد و یا این که به گاز تبدیل نمود. مواد باقیمانده ای که غنی از فلزات هستند را می توان به منظور بازیافت فلزات ارزشمند آن (نظیر روی، مس و طلا) مورد فرآوری مجدد قرار داد و یا این که می توان آن را در مکانی مناسب نظیر یک زباله دان ایزوله شده بی خطر برای محیط زیست انباشت نمود (۳۳).

### مزایای فن آوری گیاه پالایی

مهم ترین مزیت استفاده از گیاهان به منظور پاکسازی محیط زیست، شامل بهره برداری از صفات ذاتی آن ها نظیر زیست توده فراوان، سیستم ریشه ای گسترده، توانایی تحمل تنش های محیطی و غیره می باشد (۳۴). گیاه پالایی از لحاظ زیبایی خویشاند و مطبوع است و محیط زیست را سبز و پاک می گرداند. از آن جایی که گیاه پالایی به صورت درجا باعث پاکسازی آلودگی ها می شود، به حرکت درآمدن آن توسط نور

دستاوردهای شگرفی را نیز به دنبال داشته است. این گیاهان در ترکیب با عوامل کلات ساز به عنوان یک گونه ی بیش اندوز عمل نموده و به دلیل برخورداری از زیست توده ی بالا موجب کاهش زمان مورد نیاز برای پاکسازی منطقه ی آلوده می گردند. این روش استخراج گیاهی فلزات تحت عنوان استخراج گیاهی تسهیل شده توسط عوامل کلات ساز<sup>۱</sup> نامیده می شود (۳۱).

طی فرآیند استخراج گیاهی، ریشه های گیاهان مستقر شده در مکان آلوده عناصر فلزی را از خاک جذب کرده و سپس آن ها را به اندام هوایی خود که محل انباشت این فلزات هستند، انتقال می دهند. پس از آن که گیاه به اندازه ی کافی رشد کرد، بخش های هوایی آن که سرشار از فلزات هستند، برداشت شده و از مکان آلوده به مکان دیگری جهت امحاء، انتقال داده می شوند و با ادامه ی این روند به تدریج خاک مورد نظر از لوث وجود فلزات سنگین پاکسازی می گردد (۲۸). در برخی موارد به غلط دو اصطلاح گیاه پالایی<sup>۲</sup> و استخراج گیاهی<sup>۳</sup> به صورت مترادف با یکدیگر بکار می روند، این در حالی است که گیاه پالایی یک مفهوم کلی در مورد روش های مختلف اصلاح و پاکسازی مناطق آلوده به فلزات با استفاده از گیاهان است، در حالی که استخراج گیاهی یک تکنیک پاکسازی منحصر به فرد می باشد (۲۸). بسته به نوع و میزان آلودگی فلزی، طول فصل رشد و کارایی جذب فلزات توسط گیاه مورد نظر، معمولاً اصلاح و پاکسازی خاک آلوده با استفاده از روش استخراج گیاهی بین ۱ تا ۲۰ سال به طول می انجامد (۳۲). این روش برای پاکسازی مناطقی که فلزات در خاک سطحی آن ها قرار دارند و دارای مقادیر پایین تا متوسط آلاینده های فلزی می باشند، مناسب است (۳۲). شمای کلی تکنیک استخراج گیاهی در تصویر ۳ به نمایش در آمده است.

- 1- Chelate-assisted phytoextraction
- 2- Phytoremediation
- 3- Phytoextraction

می‌تواند معضل آلودگی آب و یا خاک را به معضل آلودگی هوا تبدیل نماید. اما بزرگ‌ترین نگرانی مربوط به گیاه‌پالایی آن است که پس از برداشت گیاهان آلوده‌ی غنی از فلز، سرنوشت آن‌ها چگونه باید باشد؟ ممکن است که تجزیه‌ی زیستی گیاهان آلوده و یا استفاده از آن‌ها، مجدداً آلودگی را به طور کامل یا جزئی به خاک بازگرداند (۳۸). پاسخ این سوال همچنان نامشخص است.

### نتیجه‌گیری

وضعیت کنونی آلودگی محیط زیست توسط فلزات سنگین، کل اجزای اکوسیستم را تحت تأثیر قرار خواهد داد. نتایجی که تا به امروز حاصل شده‌اند، حاکی از آن هستند که بعضی از گیاهان می‌توانند برای پاکسازی فلزات سمی از خاک موثر باشند. به منظور بازگرداندن مجدد تعادل محیط زیست، تکنیک گیاه‌پالایی دارای فواید متعددی از قبیل هزینه‌ی اندک در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح خاک، عدم تأثیرگذاری بر تنوع زیستی خاک، کاهش میزان فرسایش و رواناب و غیره می‌باشد و از این رو یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای رسیدگی به معضل تجمع فلزات سنگین در محیط است. با این وجود، بازدهی و کارایی روش مذکور به طراحی و انتخاب یک استراتژی علمی، دقیق و جامع، با در نظر گرفتن نوع یون‌های فلزی موجود در خاک و یا آب، موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی منطقه‌ی مورد نظر و پتانسیل گیاه در زدودن آلاینده‌ها از محیط، وابسته است. گیاه‌پالایی هنوز در مرحله‌ی تحقیق و توسعه می‌باشد و دارای مباحث فنی زیادی است که نیاز به توجه و ارزیابی دارند. از طرف دیگر، به منظور افزایش مقبولیت آن به عنوان یک تکنولوژی پایدار جهانی، معرفی این فن‌آوری توسط اطلاعات واضح و دقیقی که برای تمامی افراد جامعه قابل فهم و استفاده باشند، اهمیت زیادی دارد. برای تبدیل کردن فرآیند گیاه‌پالایی به روشی که از نظر تجاری سودآور باشد، لازم است که هر ۲ فاکتور عملیات مدیریت زراعی و توانایی‌های ژنتیکی گیاه، بهینه شوند.

خورشید صورت می‌پذیرد و پس از کاشت گیاه به حداقل عملیات داشت و نگه داری نیاز دارد، هزینه‌ی آن به طور میانگین ۰/۱ سایر روش‌های فیزیکی، شیمیایی یا حرارتی اصلاح و تعدیل خاک‌های آلوده به فلزات است (۳۳). گیاهان روشی پایدار، درجا، غیرمخل، خودکفا و مستقل را به منظور پاکسازی آلاینده‌ها از خاک فراهم می‌آورند. حضور گیاهان در مکان آلوده، فرسایش آبی و بادی خاک را نیز کاهش می‌دهد. با استفاده از روش استخراج گیاهی می‌توان فلزات گران بها و مواد با ارزش دیگر را از خاک جمع‌آوری و بازیافت نمود و این امر موجب می‌شود که فرآیند استخراج گیاهی از لحاظ اقتصادی برای سرمایه‌گذاران سودبخش و ترغیب‌کننده باشد (۳۵). به علاوه، گیاهانی که در فرآیند زیست‌پالایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، خاک سطحی را آشفته نمی‌کنند و لذا سبب حفظ سودمندی و کارایی آن نیز می‌گردند (۳۶). گیاه‌پالایی از تخریب مناظر طبیعی جلوگیری نموده و موجب افزایش فعالیت و تنوع ریزجانداران خاک و ارتقای سلامت اکوسیستم‌ها می‌گردد (۳۷).

### نگرانی‌های مرتبط با فن‌آوری گیاه‌پالایی

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مربوط به فن‌آوری گیاه‌پالایی، شامل سرعت پایین این فرآیند در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح خاک‌های آلوده می‌باشد. ممکن است که پاکسازی یک مکان آلوده توسط گیاهان، به دلیل رشد آهسته‌ی آن‌ها که وابسته به محدودیت‌های اقلیمی و تنوعات گونه‌ای است، نیازمند فصول رشد زیادی باشد. گیاهان بیش‌اندوزی که دارای ریشه‌های کم‌عمق هستند تنها قادر به پاکسازی خاک یا منابع آب سطحی می‌باشند، اما نمی‌توانند از عهده‌ی پاکسازی و اصلاح سفره‌های آب زیرزمینی و افق‌های عمیق خاک برآیند (۳۶). خطر آلوده شدن زنجیره‌های غذایی توسط گیاهان جذب‌کننده‌ی مواد سمی نیز وجود دارد چرا که ممکن است حیوانات ساکن در منطقه‌ی آلوده از این گیاهان تغذیه نمایند (۳۵). به دلیل چسبیدن شدید آلاینده‌های آب‌گریز به ذرات خاک، تکنیک استخراج گیاهی کمتر در مورد آن‌ها موثر است (۳۴). از طرف دیگر، تبخیر ترکیبات آلاینده

## منابع

- 9- Baudouin, C., Charveron, M., Tarrouse, R., Gall, Y., 2002. Environmental pollutants and skin cancer. *Cell Biology and Toxicology*, Vol. 18, pp. 341–348.
- 10- World Health Organization., 1997. Inorganic lead. *Environmental Health Criteria* 165. International Programme on Chemical Safety, WHO, Geneva, Switzerland.
- 11- Yang, X.E., Long, X.X., Calvert, D.V., Stofella, P.J., 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant Soil*, vol. 259, pp. 181–189.
- 12- Ward, O.P., Singh, A., 2004. Soil bioremediation and phytoremediation An overview. In: Singh, A., Ward, O.P. (eds), *Applied bioremediation and phytoremediation*. Springer, Berlin, vol. 1, pp. 1-11.
- 13- Cho, M., Chardonens, A.N., Dietz, K.J., 2003. Differential heavy metal tolerance of *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis thaliana*: a leaf slice test. *New Phytologist*, vol. 158, pp. 287-293.
- 14- McNair, M.R., Tilstone, G.H., Smith, S.S., 2000: The genetics of metal tolerance and accumulation in higher plants. - In: Terry, N., Banuelos, G. (eds), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Lewis Publishers, Boca Raton. pp. 235-250.
- 15- Shah, K., 2007. Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia plantarum*, vol. 51, pp. 618-634.
- 16- Pence, N.S., Larsen, P.B., Ebbs, S.D., Letham, D.L., Lasat, M.M., Garvin, D.F., Eide, D., Kochian, L.V., 2000. The molecular physiology of heavy metal transport in zinc/cadmium hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proceedings of the National Academy of*
- 1- Lasat, M.M., 2002. Phytoextraction of toxic metals – A review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, vol. 31, pp. 109–120.
- 2- Adriano, D.C., 2001. *Trace Elements in Terrestrial Environments; Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*. Springer-Verlag. New York.
- 3- Kabata-Pendias, A., 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 413.
- 4- Singh, O.V., Labana, S., Pandey, G., Budhiraja, R., Jain, R.K., 2003. *Phytoremediation: an overview of metallicion decontamination from soil*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 61, pp. 405–412.
- 5- Agrawal, V., Sharma K., 2006. Phytotoxic effects of Cu, Zn, Cd and Pb on in vitro regeneration and concomitant protein changes in *Holarrhena antidysentrica*. *Plant Biology*, Vol. 50, pp. 307-310.
- 6- Majer, B.J., Tscherko, D., Paschke, A., 2002. Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in *Tradescantia* and on microbial enzyme activities: a comparative investigation. *Mutation Research*, vol. 515, pp. 111-124.
- 7- Jorge, L., Gardea-Torresdeya, B., Jose, R., Peralta-Videab, G., De la Rosaa, J.G., 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 249, pp. 1797–1810.
- 8- Lone, M.I., Li, H., Zhen, P.J., Stofella, E., Yang, X., 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University Sci B*, vol. 9, pp. 210-220.

- metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, vol. 41, pp. 219–228.
- 25- Berti, W.R., Cunningham, S.D., 2000. Phytostabilization of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean-up the environment*. Wiley. New York, pp. 71–88.
- 26- Ghosh, M., Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 3, pp. 1–18.
- 27- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L.Q., 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, vol. 368, pp. 456–464.
- 28- Prasad, M.N.V., Freitas, H., 2003. Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 6, pp. 275–321.
- 29- Dushenkov, S., Kapulnik, Y., 2000. Phytofiltration of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals – Using plants to clean-up the environment*. Wiley, New York, pp. 89–106.
- 30- Pilon-Smits, E.A.H., 2005. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 56, pp. 15–39.
- 31- Peer, W., Baxter, I., Richards, E., Freeman, J., Murphy, A., 2005. Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In: Tamas, M., Martinoia, E. (eds), *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification*. Springer, Berlin, *Topics in Current Genetics*, vol. 14, pp. 299–340.
- 32- Blaylock, M.J., Huang, J.W., 2000. Phytoextraction of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Sciences of the United States of America*, vol. 97, pp. 4956–4960.
- 17- Schmoger, M.C., Oven, M., Grill, E., 2000. Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants. *Plant Physiology*, vol. 128, pp. 793–801.
- 18- Hartley-Whitaker, J., Woods, C., Meharg, A.A., 2002. Is differential phytochelatin production related to decreased arsenate influx in arsenate tolerant *Holcus lanatus*? *New Phytologist*, vol. 155, pp. 219–225.
- 19- Drazic, G., Mihalovic, N., Lojic, M., 2006. Cadmium concentration in *Medicago sativa* seedlings treated with salicylic acid. *Plant Biology*, vol. 50, pp. 239–244.
- 20- Broos, K., Beyens, H., Smolders, E., 2005. Survival of rhizobia in soil is sensitive to elevated zinc in the absence of the host plant. *Soil Biology and Biochemistry*. vol. 37, pp. 573–579.
- 21- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D., Smith, J.A.C., 2000. Metal Hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal polluted soil. In: Baneulos, T.N.G. (Ed), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Lewis Publications, Boca Raton, pp. 85–107.
- 22- Thangavel, P., Subhram, C.V., 2004. Phytoextraction – Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B*, vol. 70, pp. 109–130.
- 23- Winter Sydnor, M.E., Redente, E.F., 2002. Reclamation of high elevation, acidic mine waste with organic amendments and topsoil. *Journal of Environmental Quality*, vol. 31, pp. 1528–1537.
- 24- Tordoff, G.M., Baker, A.J.M., Willis, A.J., 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of

- with nature to improve forest resources and products. International Conference of environment, vol. 29, pp. 631-637.
- 37- Belimov, A.A., Safronova, V.I., Mimura, T., 2002. Response of spring rape to inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase depends on nutrient status of the plant. Canadian Journal of Microbiology, vol. 48, pp. 189-199.
- 38- 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. Brazilian Journal of Plant Physiology, vol. 17, pp. 53-64.
- toxic metals: Using plants to clean-up the environment. Wiley, New York, pp. 53-70.
- 33- McGrath, S.P., Zhao, F.J., Lombi, E., 2002. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. Advances in Agronomy, vol. 75, pp. 1-56.
- 34- Bizily, S.P., Rugh, C.L., Summers, A.O., Meagher, R.B., 1999. Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 96, pp. 6808-6813.
- 35- Moffat, A.S., 1995. Plants proving their worth in toxic metal cleanup. Science, vol. 269, pp. 302-303.
- 36- Sykes, M., Yang, V., Blankenburg, J., Abu Bakr, S., 1999. Biotechnology: working