گیاه‌پالایی؛ تکنولوژی سبز امید بخش برای پاکسازی زمین‌های آلوده به فلزات سنگین

المیرا میرزایی[۱]، صادق حسین‌نیایی[۲]

۱- دانشجو کارشناسی منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲- فارغ‌التحصیل دکتری منابع طبیعی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)
ایمیل نویسنده مسئول: Sadeghhoseyni71@gmail.com

چکیده

در حال حاضر آلودگی خاک و آب با فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین آلودگی‌های محیطی می‌باشد که به یک نگرانی جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. فلزات سنگین عناصر کمیابی هستند که برخی از آن‌ها از جمله مس، کبالت، روی، کروم و منگنز در مقادیر بسیار کم به عنوان ریزمغذی‌ها برای گیاهان و حیوانات ضروری هستند؛ در حالی که تعدادی از آن‌ها نه تنها ضروری نیستند، بلکه باعث ایجاد آلودگی‌ها متعددی در خاک می‌شوند. روش‌های مختلفی برای پاکسازی سرزمین‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد، که عمده آن‌ها گران‌قیمت بوده و یا تأثیرات نامطلوب در طبیعت به جا می‌گذارند. در این میان تکنیک گیاه‌پالایی یا پالایش سبز یک روش سازگار با محیطزیست، ارزان قیمت و قابل اجرا در سطوح وسیع است که می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیز در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین برای احیاء پوشش گیاهی به کار رود. این مطالعه به بررسی مفهوم گیاه‌پالایی، استراتژی‌های مختلف آن، مزایا و معایب این روش و سرنوشت گیاهان مورد استفاده برای گیاه‌پالایی می‌پردازد.

واژگان کلیدی: گیاه‌استخراجی، گیاه‌تثبیتی، فیلتراسیون گیاهی ، فلزات سنگین.

مقدمه

اصطلاح سنگین برای فلزات سنگین به دلیل وزن اتمی بالا یا چگالی زیاد این فلزات به کار می‌رود. اگرچه امروزه کلمه سنگین برای توصیف عناصر شیمیایی فلزی و متالوئیدهایی که برای انسان و محیطزیست سمی هستند استفاده می‌شود، بعضی از متالوئیدها و فلزات سبک‌تر مانند سلنیوم، آلومینیم و آرسنیک سمی هستند و از طرفی فلزات سنگینی مانند طلا عموما خاصیت سمی بودن ندارند (تچنوو و همکاران، ۲۰۱۲). این فلزات زیست‌تخریب پذیر نیستند، بنابراین وقتی با استنشاق یا از راه بلع جذب شوند در سیستم بدن تجمع می‌یابند و باعث عوارض بیولوژیکی و فیزیولوژیکی می‌شوند؛ به همین دلیل این فلزات جزء مواد خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند.

هرچند برخی از فلزات سنگین برای زندگی انسان ضروری بوده و عناصر ضروری نامیده می‌شوند و برای انواع عملکردهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی مورد نیاز هستند (گواتام و همکاران، ۲۰۱۶)؛ با این حال، زمانی که در مقادیر زیاد وجود داشته باشند می‌توانند سمی باشند. در حال حاضر خاک‌های نزدیک معادن و تأسیسات ذوب فلز به شدت به فلزاتی مانند روی، سرب، کادمیوم، مس، کروم و نیکل آلوده هستند (بولارباه و همکاران، ۲۰۰۶). مداخلات اصلاحی برای بازیابی منابع‌طبیعی با اهمیت، ضروری است؛ در واقع حفاظت از زمین و تنوع‌زیستی در میان اولویت‌های ۱۷ گانه اهداف توسعه پایدار قرار دارد (سازمان ملل، ۲۰۱۵).

روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی برای پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد، که با توجه به هزینه‌های بسیار گزاف این روش‌ها بایستی به دنبال ارائه راهکارهای ارزان‌تر، پایدارتر و سازگار با محیطزیست باشیم. گیاه‌پالایی یک روش مؤثر، مقرون به صرفه و یک تکنولوژی احیاء سازگار با محیطزیست است (گول و همکاران، ۲۰۲۰). این تکنولوژی تقریبا نو ظهور، پتانسیل احیاء اکوسیستم‌ها و استفاده دوباره مناطق آسیب دیده را دارد؛ بنابراین منبعی را برای استفاده به جامعه برمی‌گرداند. علاوه بر این، گیاه‌پالایی مدیریت آب، حفاظت از تنوع‌زیستی، ترسیب کربن، زیبایی‌شناسی و پایداری اکوسیستم را ارتقا می‌دهد. جدا از مزایای اقتصادی و محیطزیستی، جنبه‌های اجتماعی گیاه‌پالایی نیز موضوع مهمی است. در حال حاضر دانش

انتخاب گیاهان مناسب و اجرای این فناوری محدود است (آلورنیا و سوسلو، ۲۰۱۹) و موفقیت پروژه‌های اصلاحی بدون مشارکت جوامع محلی مشکل می‌باشد (ویر و دوتی، ۲۰۱۶). بنابراین، مطالعات گیاه‌پالایی و مشارکت جوامع در پروژه‌ها، دانش جوامع محلی را افزایش می‌دهد تا یاد بگیرند که چگونه گیاه‌پالایی را در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین به کار گیرند تا از فرصت‌های اقتصادی حاصله استفاده کنند (لی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از جنبه‌های کلیدی برای اجرای موفق گیاه‌پالایی، انتخاب مناسب‌ترین گونه‌های گیاهی است که باید نسبت به غلظت بالای فلزات بردبار بوده و با آب و هوای محلی سازگار باشند. با توجه به نوع آلودگی، گیاه و هدف می‌توان از استراتژی‌های گیاه‌پالایی مختلفی استفاده کرد. گیاهان بومی که به‌طور خود به خود در مناطق معدنی رشد می‌کنند، معمولاً با فلزات سنگین سازگار هستند و می‌توانند برای اهداف گیاه‌پالایی در نظر گرفته شوند. تا به حال، بیش از ۴۰۰ گونه متعلق به ۴۵ خانواده گیاهی از مناطق معتدل و گرمسیری گزارش شده است که دارای تحمل و تجمع عناصر کمیاب و فلزات سنگین هستند (باکر و همکاران، ۲۰۲۰). قابلیت گیاه‌پالایی گونه‌های بومی بر اساس خاک، محتوای فلزات سنگین و آب و هوای هر منطقه متفاوت است (خالد و همکاران، ۲۰۱۷) و در وهله اول گونه‌هایی که در طول زمان با اقلیم منطقه سازگار شده‌اند بایستی به منظور اهداف گیاه‌پالایی به کار برده شوند.

تکنولوژی گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی به عنوان یک راه‌حل سبز برای مشکل آلودگی با فلزات سنگین

گیاه‌پالایی در واقع استفاده از گیاهان و میکروب‌های خاک برای کاهش غلظت یا اثرات سمی آلودگی‌های محیطی می‌باشد (گریپسون، ۲۰۱۱). می‌توان از آن برای حذف فلزات سنگین، رادیونوکلئیدها و همچنین آلاینده‌های آلی (مانند آروماتیک چند هسته‌ای، هیدروکربن‌ها، بی‌فنیل‌های پلی‌کلره و آفت‌کش‌ها) استفاده کرد. گیاه‌پالایی یک روش جدید، مقرون به صرفه، کارآمد، سازگار با محیط‌زیست، قابل اجرا در محل و با استراتژی خورشید محور است (منوج و همکاران، ۲۰۲۰). گیاهان به‌طور کلی بدون تأثیر منفی بر خاک سطحی فرآیند حذف آلودگی از خاک را انجام می‌دهند، در نتیجه باروری خاک نیز ممکن است با ورود مواد آلی ناشی از گیاهان بهبود یابد (منج و همکاران، ۲۰۰۹).

اصطلاح گیاه‌پالایی (Phytoremediation) از کلمه یونانی Phyto به معنی گیاه و کلمه لاتین Remediation به معنی اصلاح یا حذف آلودگی گرفته شده است. گیاهان سبز توانایی بسیار زیادی در جذب آلاینده‌ها از محیط‌زیست و انجام سم‌زدایی آن‌ها با مکانیسم‌های مختلف دارند. فناوری گیاه‌پالایی یک فناوری نسبتاً جدید است و در سه دهه اخیر تحقیقات بیشتری بر روی آن انجام شده است (۱۹۹۰ به بعد). مفهوم گیاه‌پالایی (به عنوان گیاه‌استخراجی یا Phytoextraction) توسط چانی (۱۹۸۳) پیشنهاد شد. ایده گیاه‌پالایی از نظر زیباشناختی به دلیل ایجاد منظره مناسب، جالب و مورد قبول عموم مردم است. از طرفی این تکنولوژی مناسب برای مقیاس وسیع می‌باشد؛ در حالی که سایر روش‌های پاکسازی مقرون به صرفه و یا عملی نیستند (لپزایچارت، ۲۰۲۰). این روش هزینه اجرا و نگهداری بسیار پایینی در مقایسه با سایر روش‌های پالایش آلودگی‌ها دارد و کمتر از ۵٪ روش‌های جایگزین هزینه‌بردار است (پراساد، ۲۰۰۳). هزینه گیاه‌پالایی در مقایسه با روش‌های فیزیکو-شیمیایی حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر کمتر است (کونینقام و همکاران، ۱۹۹۵). به‌طوری که هزینه آن حدود ۱۰ تا ۳۵ دلار در تن برآورده شده است (اسکونور، ۲۰۰۲).

از نقطه نظر اقتصادی هدف از گیاه‌پالایی زمین‌های آلوده را می‌توان سه مورد زیر دانست (وانگرنسولد و همکاران، ۲۰۰۹):

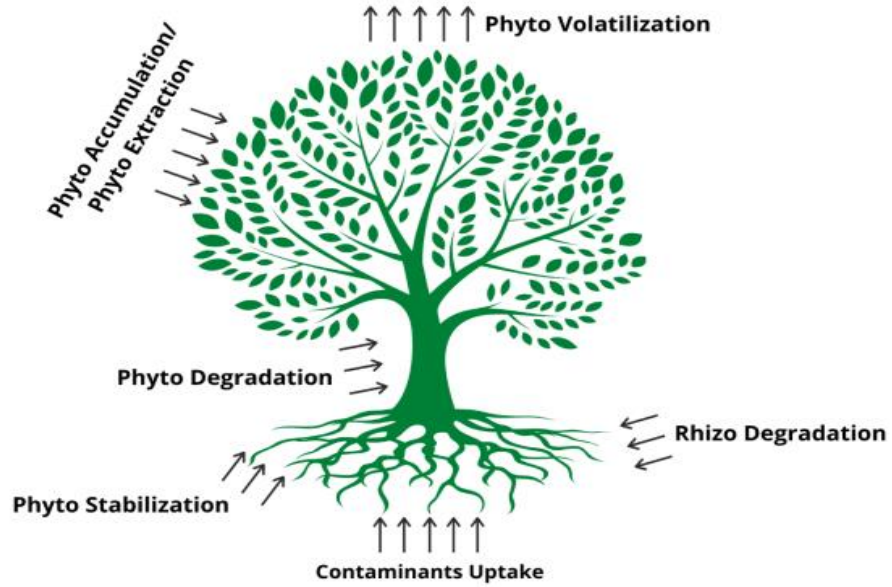
(۱) مهار خطر (گیاه‌تثبیتی یا Phytostabilization).

(۲) Phytoextraction یا گیاه‌استخراجی فلزات با ارزش تجاری مانند Ni، Tl و Au.

(۳) مدیریت پایدار سرزمین که در آن گیاه‌استخراجی به تدریج کیفیت خاک را جهت کشت محصولات با ارزش دیگر بهبود می‌بخشد.

استراتژی‌های گیاه‌پالایی

تکنیک‌های مختلف گیاه‌پالایی با توجه به نوع آلودگی، نوع گیاه و هدف به کار می‌روند (افنسو و همکاران، ۲۰۲۰) و شامل گیاه‌استخراجی (Phytoextraction)، فیلتراسیون گیاهی (Phytofiltration)، گیاه‌تثبیتی (Phytostabilization)، تبخیر گیاهی (Phytovolatilization) و تخریب گیاهی (Phytodegradation) است (شکل ۱).



شکل ۱ – استراتژی‌های مختلف گیاه‌پالایی

گیاه‌استخراجی (Phytoextraction)

این تکنیک که با نام‌های دیگری همچون تجمع گیاهی (Phytoaccumulation)، جذب گیاهی (Phytoabsorption) و تثبیت گیاهی (Phytosequestration) شناخته می‌شود، در واقع جذب آلاینده‌ها از خاک یا آب توسط ریشه گیاه و انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی گیاه است؛ که این آلاینده‌ها در زیست توده بالای زمین، یعنی شاخه‌ها انباشته می‌شوند (آل‌تهانی و یاسین، ۲۰۲۰). انتقال فلز به اندام‌های هوایی یک فرآیند بیوشیمیایی حیاتی و مطلوب در این روش می‌باشد، چرا که برداشت بیومس اندام زیرزمینی (ریشه) به‌طور کلی امکان‌پذیر نیست (زاچینی و همکاران، ۲۰۰۹). در سال‌های اخیر Phytoextraction به عنوان مهم‌ترین تکنیک گیاه‌پالایی برای حذف فلزات سنگین و متالوئیدها از خاک‌های آلوده شناخته شده است (سرور و همکارن، ۲۰۱۷). برخلاف Phytostabilization که گیاهان به طور موقت حاوی فلزات سنگین هستند، و این فلزات سنگین هنوز هم در زیر زمین باقی مانده‌اند، Phytoextraction یک راه حل دائمی برای حذف فلزات سنگین از خاک آلوده است. بنابراین، برای کاربردهای تجاری مناسب‌تر است. این روش شامل چندین مرحله است (علی و همکاران، ۲۰۱۲):

۱- متحرک‌سازی فلزات سنگین در ریزوسفر

۲- جذب فلزات سنگین توسط ریشه

۳- انتقال فلزات از ریشه به اندام هوایی

۴- تثبیت و بخش‌بندی کردن فلزات در بافت‌های گیاه (ساقه، شاخه و برگ)

کارایی گیاه‌استخراجی به چندین عامل از جمله انتخاب گیاه، عملکرد گیاه، زیست‌فراهمی فلزات سنگین، خاک و شرایط ریزوسفر بستگی دارد. انتخاب گونه گیاهی بسیار حیاتی می‌باشد و گونه انتخابی بایستی شرایط زیر را دارا باشد (ست، ۲۰۱۲).

۱ – تحمل بالا نسبت به شرایط سمیت فلزات سنگین و توانایی رشد در این شرایط

۲ – توانایی استخراج و انتقال فلزات سنگین به اندام‌های هوایی و توانایی انباشت سطح بالایی از فلزات در اندام‌های هوایی

۳ – سریع‌الرشد و دارای زیست توده بالا

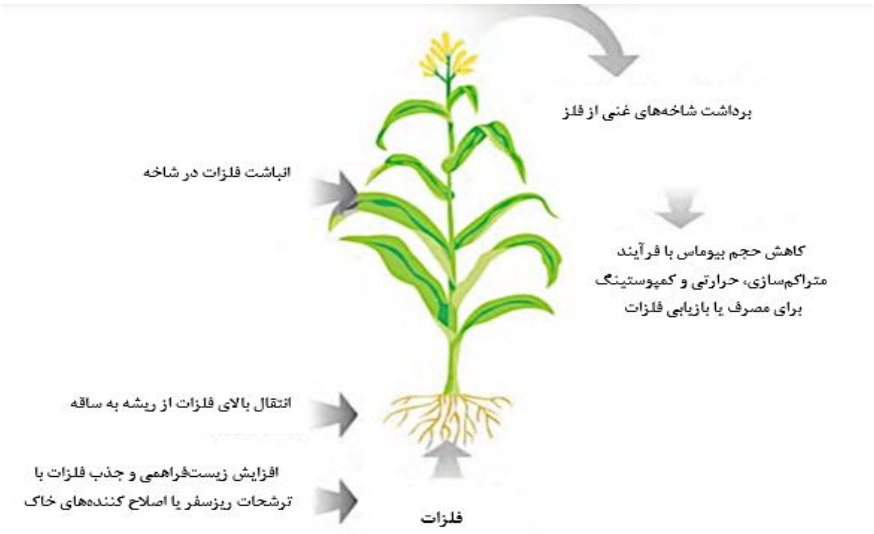
۴ – دارای شاخه‌های فراوان و سیستم ریشه‌ای گسترده

۵ – توانایی سازگار شدن به محیط غالب، کشت و برداشت آسان، توانایی رشد در خاک‌های فقیر

۶ – مقاومت بالا در برابر عوامل بیماری‌زا و آفت‌ها و عدم خوش‌خوراکی بالا برای علفخوان به منظور جلوگیری از ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی

گونه‌های چوبی در مقایسه با علفی‌ها و بوته‌ای‌ها می‌توانند مقدار بسیار زیادی زیست توده تولید کنند که تجمع فلزات سنگین را تسهیل کرده و باعث انباشت سطوح بالای فلزات سنگین در زیست توده هوایی آن‌ها می‌شود. همچنین با سیستم ریشه عمیق و گسترده از فرسایش خاک و پراکندگی خاک‌های آلوده به محیط اطراف جلوگیری می‌کنند (سومان و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، درختان به دلیل دارا بودن ویژگی‌های غیر خوراکی، که احتمال ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی را کاهش می‌دهند، نسبت به گیاهان زراعی برای گیاه‌پالایی ترجیح داده می‌شوند (بورگس و همکاران، ۲۰۱۸). به‌طور کلی دو رویکرد متفاوت در زمینه گیاه‌استخراجی وجود دارد: (۱) استفاده از گیاهان بیش‌اندوزگر که مقدار زیادی فلزات سنگین را انباشت می‌کنند (۲) استفاده از گیاهانی که اگرچه بیش‌اندوز نیستند اما با توجه به

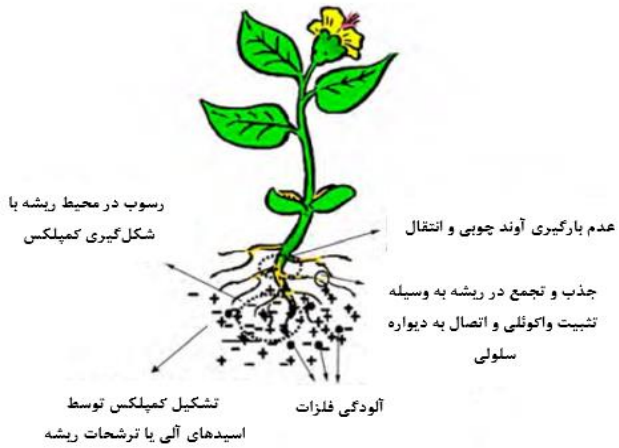
بیومس بالا، از نظر تجمع فلزات سنگین قابل مقایسه با گیاهان بیش‌اندوز هستند. با این حال خصوصیت بیش‌اندوزی و بردباری زیاد در برابر فلزات سنگین، نسبت به تولید زیست توده بالا ارجحیت دارد؛ چرا که فرآیند برداشت و دفع ایمن گیاهان با زیست توده بالا نسبت به گیاهان بیش‌اندوز با حجم بیومس کمتر، دشوار و پرهزینه‌تر است (علی و همکاران، ۲۰۱۳). شکل (۲) شماتیکی از فرآیند گیاه‌استخراجی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فرآیند فیتواکستراکشن (Phytoextraction) (ناسسیمنتو، ۲۰۰۶)

گیاه‌تثبیتی (Phytostabilization)

گیاه‌تثبیتی یا بی‌حرکت‌سازی گیاهی (Phytoimmobilization) فرآیندی است که در آن از گیاهان خاصی برای تثبیت آلاینده‌ها استفاده می‌شود (سینگ، ۲۰۱۲). این روش در واقع برای کاهش تحرک و زیست‌فراهمی آلاینده‌ها در خاک است که در نتیجه از ورود آن‌ها به آب‌های زیرزمینی و زنجیره غذایی ممانعت می‌کند (اراخرومن، ۲۰۰۷). در این روش گیاهان می‌توانند فلزات سنگین خاک را از طریق جذب و رسوب در ریشه، ایجاد کمپلکس یا کاهش ظرفیت فلزی در ریزوسفر بی‌حرکت کنند؛ و در نتیجه از انتقال آن‌ها به مناطق دیگر جلوگیری می‌شود. از مزایای این روش این است که برای دفع و حذف مواد خطرناک لازم به استفاده از گیاهان با زیست توده بالا نمی‌باشد؛ و همچنین در مواقعی که نیاز فوری به بی‌حرکت‌سازی آلودگی به منظور جلوگیری از ورود آن‌ها به منابع آبی زیرزمینی و سطحی باشد این روش بسیار کارا و مؤثر می‌باشد. فلزات با ظرفیت‌های مختلف از نظر سمیت متفاوت می‌باشند. در روش گیاه‌تثبیتی، گیاهان با استفاده از آنزیم‌های ردوکس ویژه به طرز ماهرانه‌ای فلزات را از حالت‌های بسیار خطرناک به حالت سمیت نسبتاً پایین‌تری تبدیل می‌کنند و تنش و آسیب‌های فلزی را کاهش می‌دهند. برای مثال کاهش Cr(VI) به Cr(III) به طور گسترده‌ای توسط گیاهان انجام می‌شود؛ که دومی هم تحرک کمتر و هم سمیت پایین‌تری دارد (وو و همکاران، ۲۰۱۰). این روش تجمع فلزات سنگین در بیوتا (موجودات زنده) را محدود می‌کند اما نمی‌تواند به عنوان یک روش دائمی مطرح باشد و بیشتر یک روش مدیریتی برای غیرفعال‌سازی (تثبیت) آلاینده‌های بالقوه سمی می‌باشد (وانگرنسولد و همکاران، ۲۰۰۹)؛ زیرا فلزات سنگین در خاک باقی می‌مانند و فقط حرکت آن‌ها محدود شده‌است. تکنیک فیتواستابیلیزیشن بیشتر برای پاکسازی مناطق معدنی که تحت تأثیر فرسایش آبی و بادی می‌باشند و سایت‌های سوپرفاند (مکان‌هایی که به شدت آلوده می‌باشند و پاکسازی آن‌ها نیاز به مدت زمان طولانی دارد) استفاده می‌شود. در زیر فرآیند گیاه‌تثبیتی با شکل نشان داده شده است (شکل ۳).



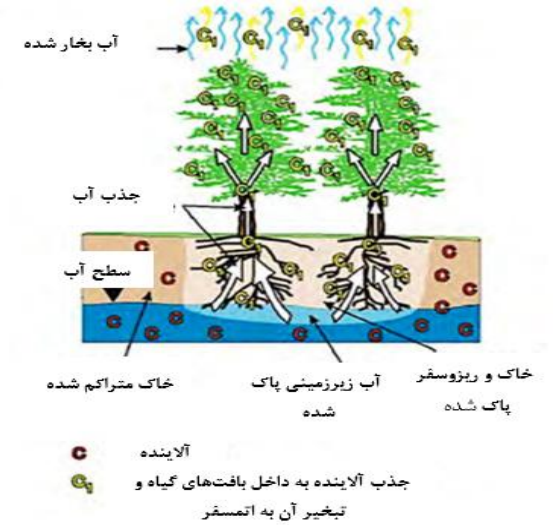
شکل ۳ – فرآیند گیاه تثبیتی (Phytostabilization) (پادماواتیما و لی، ۲۰۰۷).

فیلتراسیون گیاهی (Phytofiltration)

فیتوفیلتراسیون فرآیند حذف آلاینده‌ها از آب‌های سطحی آلوده و یا پساب‌های آلوده با استفاده از گیاهان می‌باشد. این روش شامل ریزوفیلتراسیون (Rhizofiltration)، بلاستوفیلتراسیون (Blastofiltration) و کولوفیلتراسیون (Caulofiltration) می‌باشد. ریزوفیلتراسیون گیاه با استفاده از ریشه‌ها، بلاستوفیلتراسیون با استفاده از گیاهچه و کولوفیلتراسیون با استفاده از شاخه‌های بریده شده گیاه است. در فیتوفیلتراسیون آلودگی‌ها بر روی گیاهان جذب و یا توسط گیاه جذب می‌شوند. ترشحات ریشه می‌تواند با تغییر pH ریزوسفر باعث رسوب فلزات سنگین و آلودگی بر روی ریشه گیاهان شود (جاود، ۲۰۱۹)؛ بنابراین حرکت آن‌ها به آب‌های زیرزمینی به حداقل می‌رسد.

تبخیر گیاهی (Phytovolatilization)

تبخیر گیاهی، جذب آلاینده‌ها از خاک توسط گیاهان، تبدیل آن‌ها به شکل فرار و انتشار آن‌ها به اتمسفر است (شکل ۴). این تکنیک را می‌توان برای آلاینده‌های آلی و برخی فلزات سنگین مانند Hg و Se و As مورد استفاده قرار داد (ماهار و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال، استفاده از آن محدود به این واقعیت است که آلاینده را به طور کامل حذف نمی‌کند، بلکه فقط از یک بخش (خاک) به قسمت دیگر (اتمسفر) منتقل می‌شوند. مزیت این روش این است که این عناصر ممکن است به حالت‌های کمتر سمی تبدیل شوند و از طرفی نیاز به برداشت و دفع گیاهان نمی‌باشد. اما در هر صورت دوباره با بارندگی بازیافت شده و به دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها برمی‌گردند و توسط باکتری‌های بی‌هوازی وارد چرخه تولید می‌شوند. بنابراین ارزیابی ریسک قبل از اجرای این روش لازم است. Phytovolatilization بحث برانگیزترین تکنیک در میان روش‌های گیاه‌پالایی است (پادماواتیما و لی، ۲۰۰۷).



شکل ٤ – فرآیند فیتوولاتیلیزیشن (phytovolatilization) فلزات

گیاه‌تخریبی (Phytodegradation) و ریشه‌تخریبی (Rhizodegradation)

فیتودگردایشن یا تخریب گیاهی در واقع تخریب آلاینده‌های آلی توسط گیاهان با کمک آنزیم‌هایی مانند دی‌هالوژناز و اکسیژناز می‌باشد و به میکروارگانیسم‌های ریزوسفری وابسته نیست. گیاهان می‌توانند مواد آلی مضر (Xenobiotics) را از محیط آلوده جمع و از طریق فعالیت‌های متابولیکی سم‌زادیی کنند؛ بنابراین از این دیدگاه گیاهان سبز به عنوان کبد زنده زیست‌کره عمل می‌کنند. این روش فقط برای آلاینده‌های آلی کاربرد دارد چرا که فلزات سنگین زیست‌تخریب ناپذیر هستند. اخیرا دانشمندان مطالعاتی را بر روی حذف آلاینده‌های آلی مانند علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها به خصوص با استفاده از گیاهان اصلاح شده (تراریخته) انجام داده‌اند.

ریزودگرادیشن در واقع تجزیه آلاینده‌های آلی در خاک توسط میکروارگانیسم‌های موجود در ریشه می‌باشد (مخوپادهای و مایتی، ۲۰۱۰). ریزوسفر در اطراف ریشه گیاه گسترش می‌یابد و تحت تأثیر فعالیت‌های گیاه است. دلیل اصلی افزایش میزان تخریب در ریزوسفر، افزایش تعداد و فعالیت‌های متابولیکی میکروب‌ها در این ناحیه است. گیاهان می‌توانند فعالیت‌های میکروبی در ریزوسفر را با ترشحات حاوی کربوهیدرات، آمینو اسیدها و فلاونوییدها ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش دهند؛ همچنین ترشح مجدد مواد غذایی توسط ریشه، منابع نیتروژن و کربن را در اختیار میکروارگانیسم‌های موجود در ریزوسفر قرار می‌دهد و یک محیط غنی جهت تحریک و افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های ریزوسفری ایجاد می‌شود.

مزایای گیاه‌پالایی

به طور کلی از مزایای گیاه‌پالایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

– قابل استفاده برای طیف وسیعی از ترکیبات آلی و معدنی می‌باشد.

– کاربردهای In-situ مقدار تخریب خاک را در مقایسه با روش‌های معمولی کاهش می‌دهد و گسترش آلودگی از طریق آب و هوا را کاهش می‌دهد.

– نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و افراد متخصص ندارد و تخمین‌های اولیه در گیاه‌پالایی نشان می‌دهد این روش نسبت به روش‌های سنتی دارای مزیت صرفه‌جویی در انرژی است.

– در مقایسه با تکنولوژی‌های متداول از قبیل استخراج اسیدی و خاک‌شویی، اثر مخربی در حاصل‌خیزی ساختار خاک ندارد. این در حالی است که حضور گیاهان باعث اصلاح وضعیت کلی خاک (بدون توجه به درجه‌ی کاهش آلودگی) می‌شود.

– گیاهان از فرسایش خاک جلوگیری نموده و مانع انتشار ذرات گردوغبار می‌گردند.

محدودیت‌های گیاه‌پالایی

اگرچه گیاه‌پالایی یک روش امیدوار کننده برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است، اما با مشکلاتی مواجه است. برخی محدودیت‌ها عبارتند از:

– نیاز به زمان طولانی برای پاکسازی خاک‌های آلوده.

– کارایی گیاه‌پالایی بسیاری از بیش‌اندوزگرها به دلیل رشد آهسته و زیست توده پایین محدود است.

– مشکل تحرک کم فلزات و آزادسازی بخش محکم باند شده یون‌های فلزی به خاک که باعث محدودیت دسترس‌پذیری آلودگی‌ها در خاک شده است.

– برای مکان‌هایی با سطوح آلودگی کم تا متوسط قابل استفاده است، زیرا رشد گیاه در خاک‌های به شدت آلوده به فلزات سنگین نمی‌تواند پایدار باشد.

– خطر آلودگی زنجیره غذایی در صورت مدیریت نامناسب و عدم تمهیدات مناسب.

سرنوشت گیاهان بعد از استفاده برای گیاه‌استخراجی

یکی از موضوعات مهم در فرآیند گیاه‌استخراجی سرنوشت گیاهان مورد استفاده است. این گیاهان را پس از سوزاندن می‌توان به صورت ایمن در محل‌های مخصوص دفع زباله‌های خطرناک مدفون کرد. احتراق یک فرآیند خام است که باعث کاهش حجم بیوماس به ۲ تا ۵ درصد شده و خاکستر باقیمانده را به راحتی می‌توان دفع کرد؛ و به علاوه در صورت امکان فلزات را از خاکستر باقیمانده بازیابی نمود. همچنین در صورت صرفه اقتصادی می‌توان بیوماس را برای بازیابی زیستی فلزات گران‌بها و نیم‌گران‌بها مورد استفاده قرار داد (فرآیند فیتومایننگ) (شیوران و همکاران، ۲۰۱۰).

کمپوست و متراکم کردن بیوماس گیاهی یکی از روش‌های مدیریت پس از برداشت در گیاه‌پالایی می‌باشد. کمپوست و تراکم به طرز قابل توجهی حجم بیوماس را کاهش داده و فرآیند دفع راحت‌تر خواهدشد؛ همچنین فرآیند حمل و نقل بیوماس گیاهی و هزینه‌ها کاهش می‌یابد. البته بایستی شیرابه حاصل جمع‌آوری و تصفیه گردد (بلای لوک، ۲۰۰۰).

یکی دیگر از روش‌های امیدوار کننده، استفاده از بیوماس گیاهی از طریق فرآیند گازی‌سازی (Gasification) به عنوان منبع انرژی است که یک روش تجاری‌سازی می‌باشد. بیوماسی که

تحت فرآیند تبدیل انرژی حرارتی شیمیایی به منظور تولید انرژی قرار می‌گیرد نمی‌تواند برای مصارف دیگر همچون خوراک و یا کود استفاده شود. در فرآیند گازیفیکاسیون، بیوماس تحت حرارات بالا به دلیل یک سری تغییرات شیمیایی به یک منبع انرژی حرارتی یا الکتریکی پاک تبدیل می‌شود.

نتیجه‌گیری

آلودگی فلزات سنگین باتوجه به اثرات سمی آن‌ها و تجمع‌شان در محیط‌زیست یک مشکل اساسی و جدی برای سلامت غذایی است. به منظور جلوگیری یا کاهش آلودگی این فلزات و احیاء خاک‌های آلوده، انواع تکنیک‌های مختلف توسعه یافته است؛ که در این میان گیاه‌پالایی به عنوان روش امیدوار کننده که مزایای زیادی نسبت به روش‌های فیزیکی-شیمیایی دارد در سال‌های اخیر مورد توجه محققان و موسسات بوده است. کاربرد بیش‌اندوزگرهای فلزی، ساده‌ترین رویکرد در گیاه‌پالایی است و تا به حال صدها گونه گیاهی بیش‌انباشتگر شناخته شده است. گیاه‌پالایی دارای روش‌های مختلفی است که از میان آن‌ها گیاه تثبیتی یا تثبیت در محل و گیاه‌استخراجی دو فرآیند مهم این تکنیک می‌باشند. با وجود مزایای متعدد گیاه‌پالایی، این روش دارای محدودیت‌هایی از جمله سرعت آهسته در پاکسازی آلاینده‌ها و مشکلات مربوط به فرآیند پس از برداشت گیاهان می‌باشد؛ که در این راستا راه‌کارهایی همچون استفاده از بیوماس گیاهان برای تولید انرژی و کمپوست کردن آن‌ها به منظور دفع آسان‌تر مناسب می‌باشد.

منابع

1. Afonso, T.F., Demarco, C.F., Pieniz, S., Quadro, M.S., Camargo, F.A. and Andreazza, R., 2020. Bioprospection of indigenous flora grown in copper mining tailing area for phytoremediation of metals. *Journal of environmental management*, *256*, p.109953.
2. Ali, H., Khan, E. and Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, *91*(7), pp.869-881.
3. Ali, H., Naseer, M. and Sajad, M.A., 2012. Phytoremediation of heavy metals by Trifolium alexandrinum. *International Journal of Environmental Sciences*, *2*(3), pp.1459-1469.
4. Al-Thani, R.F. and Yasseen, B.T., 2020. Phytoremediation of polluted soils and waters by native Qatari plants: Future perspectives. *Environmental Pollution*, *259*, p.113694.
5. Alvernia, P. and Soesilo, T.E.B., 2019, November. Phytoremediation as a Sustainable Way for Land Rehabilitation of Heavy Metal Contamination. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1381, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
6. Assunção, A.G.L., Martins, P.D.C., De Folter, S., Vooijs, R., Schat, H. and Aarts, M.G.M., 2001. Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator Thlaspi caerulescens. *Plant, Cell & Environment*, *24*(2), pp.217-226.
7. Baker, A.J., McGrath, S.P., Reeves, R.D. and Smith, J.A.C., 2020. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. Phytoremediation of contaminated soil and water, pp.85-107.
8. Bastow, E.L., Garcia de la Torre, V.S., Maclean, A.E., Green, R.T., Merlot, S., Thomine, S. and Balk, J., 2018. Vacuolar iron stores gated by NRAMP3 and NRAMP4 are the primary source of iron in germinating seeds. *Plant Physiology*, *177*(3), pp.1267-1276.
9. Blaylock, M.J., 2000. Phytoextraction of metals. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment, pp.53-70.
10. Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Aboudrar, W., Ouhammou, A. and Morel, J.L., 2006. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants. *Chemosphere*, *63*(5), pp.811-817.
11. Burges, A., Alkorta, I., Epelde, L. and Garbisu, C., 2018. From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites. *International journal of phytoremediation*, *20*(4), pp.384-397.
12. Chaney, R.L., 1983. Plant uptake of inorganic waste. Land treatment of hazardous wastes.
13. Cunningham, S.D., Berti, W.R. and Huang, J.W., 1995. Phytoremediation of contaminated soils. Trends in biotechnology, 13(9), pp.393-397.
14. Erakhrumen, A.A. and Agbontalor, A., 2007. Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educational Research and Review*, *2*(7), pp.151-156.
15. Gautam, P.K., Gautam, R.K., Banerjee, S., Chattopadhyaya, M.C. and Pandey, J.D., 2016. Heavy metals in the environment: fate, transport, toxicity and remediation technologies. *Nova Sci Publishers*, *60*, pp.101-130.

Hussain, S., 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, *171*, pp.710-721.
27. Seth, C.S., 2012. A review on mechanisms of plant tolerance and role of transgenic plants in environmental clean-up. *The Botanical Review*, *78*(1), pp.32-62.
28. Sheoran, V., Sheoran, A.S. and Poonia, P., 2010. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. Critical Reviews in *Environmental Science and Technology*, 41(2), pp.168-214.
29. Singh, S., 2012. Phytoremediation: a sustainable alternative for environmental challenges. *Int J Gr Herb Chem*, *1*, pp.133-139.
30. Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J. and Macek, T., 2018. Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment?. *Frontiers in plant science*, *9*, p.1476.
31. Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K. and Sutton, D.J., 2012. Heavy metal toxicity and the environment. Molecular, clinical and environmental toxicology, pp.133-164.
32. United Nations, 2015. UN Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform Our World. http://www.un.org/sustainabledevelopment.
33. Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E. and van der Lelie, D., 2009. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, *16*(7), pp.765-794.
34. Weir, E. and Doty, S., 2016. Social acceptability of phytoremediation: The role of risk and values. *International journal of phytoremediation*, *18*(10), pp.1029-1036.
35. Williams, L.E. and Mills, R.F., 2005. P1B-ATPases–an ancient family of transition metal pumps with diverse functions in plants. *Trends in plant science*, *10*(10), pp.491-502.
36. Zacchini, M., Pietrini, F., Mugnozza, G.S., Iori, V., Pietrosanti, L. and Massacci, A., 2009. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water, Air, and Soil Pollution*, *197*(1), pp.23-34.
16. Greipsson, S., 2011. Phytoremediation. Nat. Educ. Knowl. 2, 7.
17. Gul, I., Manzoor, M., Kallerhoff, J. and Arshad, M., 2020. Enhanced phytoremediation of lead by soil applied organic and inorganic amendments: Pb phytoavailability, accumulation and metal recovery. *Chemosphere*, *258*, p.127405.
18. Javed, M.T., Tanwir, K., Akram, M.S., Shahid, M., Niazi, N.K. and Lindberg, S., 2019. Phytoremediation of cadmium-polluted water/sediment by aquatic macrophytes: role of plant-induced pH changes. In Cadmium toxicity and tolerance in plants (pp. 495-529). Academic Press.
19. Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I. and Dumat, C., 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, *182*, pp.247-268.
20. Lee, J., Kaunda, R.B., Sinkala, T., Workman, C.F., Bazilian, M.D. and Clough, G., 2021. Phytoremediation and phytoextraction in Sub-Saharan Africa: Addressing economic and social challenges. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *226*, p.112864.
21. Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R. and Zhang, Z., 2016. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, *126*, pp.111-121.
22. Manoj, S.R., Karthik, C., Kadirvelu, K., Arulselvi, P.I., Shanmugasundaram, T., Bruno, B. and Rajkumar, M., 2020. Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of environmental management*, *254*, p.109779.
23. Mench, M., Schwitzguébel, J.P., Schroeder, P., Bert, V., Gawronski, S. and Gupta, S., 2009. Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. *Environmental Science and Pollution Research*, *16*(7), pp.876-900.
24. Nascimento, C.W.A.D. and Xing, B., 2006. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Scientia agricola*, *63*(3), pp.299-311.
25. Padmavathiamma, P.K. and Li, L.Y., 2007. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, *184*(1), pp.105-126.
26. Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M.R., Ishaque, W., Kamran, M.A., Matloob, A., Rehim, A. and