جذب فلزهای سنگین خاک با ریشه‌های خوراکی

فاطمه شفاهی، مژگان بصیری، طاهره رحمانپور

چکیده

فلزهای سنگین به‌طور معمول عناصری با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۲۰ و چگالی بیشتر از ٤ تعریف می‌شوند. بیشترین آلاینده‌های فلزهای سنگین شامل کادمیم، کروم، مس، جیوه، سرب و روی هستند. آبیاری زمین‌های کشاورزی با آب‌های آلوده به زباله‌ها و فاضلاب‌های صنعتی، خاک را آلوده می‌کند. گیاهانی مانند تربچه، هویج و سیب‌زمینی و ... در مراحل رشد خود این فلزها را جذب می‌کنند. این فلزها در گیاهان انباشته شده، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در انسان، منجر به بیماری می‌شوند. کادمیم یک آلایندهٔ مشترک در خاک‌هاست که به‌راحتی توسط بیشتر گیاهان جذب می‌شود. این فلز سمّی در انسان باعث بیماری‌های ریه و سرطان می‌شود.

در روشی به‌نام گیاه‌پالایی، با استفاده از برخی گونه‌های گیاهی خاص، غلظت این آلاینده‌ها در خاک کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها

فلزهای سنگین، ریشه‌های خوراکی، گیاه‌پالایی

مقدمه

امروزه آلودگی خاک‌ها با فلزهای سنگین در اثر فعالیت‌های بشری یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی برای گیاهان است که می‌تواند منجر به تولید انواع اکسیژن فعال از جمله پراکسیدهیدروژن شود. خاک، منبع اصلی تغذیهٔ معدنی گیاهان است. گیاهان از اولین موجودات زنده‌ای هستند که وقتی شرایط خاک تغییر می‌کند، واکنش نشان می‌دهند و این امر آن‌ها را به‌عنوان نشانگرهای زیستی عالی در مورد تغییرات نامطلوب، مانند انباشتگی فلزهای سنگین در خاک، درمی‌آورد. فلزهای سنگین از آلاینده‌های مهم محیط‌زیست به‌شمار می‌روند و عمدتاً از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی بشر منشأ می‌گیرند. حضور آن‌ها در هواکره، آب و خاک، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، و انباشته شدن این آلاینده‌ها در زنجیرهٔ غذایی می‌تواند زندگی بشر را به خطر بیندازد. حضور فلزهای سنگین در منطقهٔ ریزوسفر و ورود آن‌ها به گیاه باعث کاهش رشد می‌شود و سوخت‌وساز سلولی را برهم می‌زند. بنابراین روی فرایندهای مهمی مانند انتقال آب، فوتوسنتز و مقدار کلروفیل اثر منفی می‌گذارد. با این حال برخی گیاهان بیش‌انباشت‌کننده که در خاک‌های آلوده با فلزهای سنگین رشد می‌کنند این توانایی را دارند که این فلزها را از راه ریشه جذب کرده، در بخش‌های مختلف خود انباشته کنند. گیاه‌پالایی فناوری نوینی است که در آن از گیاهان برای حذف آلاینده‌های محیطی مانند فلزهای سنگین استفاده می‌شود. گیاهانی در این زمینه استفاده می‌شوند که دارای ویژگی‌هایی به این شرح باشند:

- تحمل سطوح بالای غلظت در محیط رشد؛

– انباشته کردن سطوح بالای فلز به‌صورتی که قابل برداشت باشد؛
– رشد سریع؛
– به‌راحتی مانند یک فراوردهٔ کشاورزی رشد کند و کاملاً قابل برداشت باشد.

در میان گیاهان مطالعه شده در این زمینه خانوادهٔ شب‌بو[1]، و از این خانواده چند سروده به‌عنوان بهترین انباشت‌کننده‌ها شناخته شده‌اند. با توجه به موارد یاد شده گونه‌های انباشت‌کنندهٔ فلزهای سنگین متعلق به خانوادهٔ شب‌بو که به آسانی کاشت و برداشت می‌شوند مانند تربچه و کلزا برای فناوری گیاه‌پالایی پیشنهاد شده‌اند. ریشهٔ گیاهانی یک‌ساله از خانوادهٔ این گیاهان در انواع خوراکی آن ستبر و به رنگ‌های سفید، سرخ و سیاه است و در ایران سه گونه دارد. گونهٔ خوراکی آن به‌نام تربچه به‌عنوان سبزی خوردن در مناطق مختلف ایران کاشته می‌شود. بخش خوراکی ریشهٔ تربچه در تماس مستقیم با خاک قرار می‌گیرد. بنابراین ممکن است فلزهای سنگین از راه ریشه وارد ریشهٔ خوراکی آن شوند و از آنجایی که این ریشه‌ها محل ذخیرهٔ مواد غذایی است، فلزهای سنگین همراه مواد غذایی فوتوسنتزی، ذخیره می‌شوند و به این ترتیب می‌توانند اثرهای ناگوار بر سلامتی انسان داشته باشند. یکی از آسیب‌های مهم بافتی که به‌دنبال قرارگیری گیاهان در معرض فلزهای سنگین ایجاد می‌شود افزایش انباشته شدن انواع مختلف اکسیژن‌های واکنشگر است. دستگاه دفاعی گیاهان در مقابل این اکسیژن‌های رادیکالی، فعال می‌شوند که از آن جمله، فعالیت آنزیم‌های پاداکسنده مانند سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز است. آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز اولین سد دفاعی را تشکیل می‌دهد که رادیکال‌های سوپر اکسید را به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند. سپس پراکسید هیدروژن می‌تواند از سه راه تجزیه شود: توسط آنزیم آسکوربات پراکسیداز که در کلروپلاست عمل می‌کند، توسط پراکسیداز در دیوارهٔ سلولی و سیتوپلاسم، یا توسط کاتالاز در پراکسیزوم و میتوکندری [۱].

در میان فلزهای سنگین تعدادی از آن‌ها به‌عنوان ریزمغذی[2] برای سوخت‌وساز گیاهی با اهمیت هستند مانند: (V, Cu, Ni, Zn, Mn, Mo, Fe, Cr, W, Co). اگر این عنصرها، بیش از حد معمول در محیط رشد گیاه باشند برای گیاه مسمومیت‌زا هستند. عنصرهای دیگری که خاصیت مسمومیت‌زایی بسیار بالایی برای گیاهان دارند عبارت‌اند از: Cd, Sb, Ag, Hg, As, Pb. به‌جز منابع طبیعی (معادن)، درحال حاضر منابع رهاسازی این فلزها در طبیعت عبارت‌اند از: ترافیک شهری، دورریزهای خانگی، پساب‌های صنعتی، غبار کارخانجات و کودهای فسفاتی حاوی کادمیم.

جدول ۲ مقادیر CEC (میلی‌اکی‌والان در هر کیلوگرم زیست توده) ریشه و ریشهٔ خوراکی

تربچه	هویج	سیب‌زمینی شیرین	محل جذب
۵۴	۳۱۱	۱۹۰	ریشه
۱۲/۵	۱۰/۸	۴۹/۳	ریشهٔ خوراکی

نام و نماد شیمیایی	منابع عمدهٔ آلودگی	عددهای اکسایش متداول	ترکیب‌های متداول	برخی ویژگی‌ها
آرسنیک (As)	ترکیب‌های معدنی محافظ چوب و ترکیب‌های آلی در آفت‌کش‌ها	+۵، ۳، ۰، −۳	As_2O_3, $AsNO_3$, $AsCl_3$, $As(OH)_3AsO_2OH^-$	– سمی‌ترین ماده برای انسان و موجودات – سمی‌تر بودن ترکیب‌های آرسنیت (As^{3+}) نسبت به ترکیب‌های آرسنات (As^{5+}) و برعکس، پایداری ترمودینامیکی بیشتر آرسنات‌ها – وجود آرسنات در آب‌های زیرزمینی و عامل سرطان در انسان
سرب (Pb)	فاضلاب‌های حاوی سرب در صنایع، مراکز نساجی، مصرف سوخت‌های فسیلی سرب‌دار	+۴، +۲	$Pb(NO_3)_2$, $PbCl_2$, $Pb(ClO_3)_2$	– سمّی‌بودن بسیار زیاد آن در محیط برای گیاهان، حیوانات و موجودات زندهٔ ذره‌بینی – ایجاد آسیب‌های مغزی و عقب‌ماندگی ذهنی – اختلال در زیست‌ساخت هموگلوبین و کم‌خونی ناشی از آن – آسیب رساندن به کلیه – ایجاد اختلال در دستگاه عصبی
جیوه (Hg)	دماسنج، فشارسنج، ضد کپک در رنگ‌های نقاشی، کاتالیزگر، لامپ‌های جیوه‌ای	+۲، +۱	Hg_2Cl_2, HgO	– مختل کردن فوتوسنتز و سوخت‌وساز اکسایش از راه دخالت در کلروپلاست و میتوکندری – ایجاد اختلال‌های عصبی و کلیه‌ای
کروم (Cr)	آبکاری با کروم، دفع مواد زائد حاوی کروم	+۳، +۶	سنگ معدن کرومیت $FeCr_2O_4$	– Cr^{3+} سمّی‌تر و متحرک‌تر از Cr^{6+} است – رسوب Cr^{6+} وابسته به یون‌های کرومات و دی‌کرومات با Ag^+ و Pb^{2+} و Ba^{2+}
کادمیم (Cd)	آبکاری با کادمیم، دفع مواد زائد حاوی کادمیم، هوازدگی سنگ‌ها آتش‌سوزی جنگل‌ها و آتش‌فشان‌ها و کودهای فسفات مصنوعی	+۲	CdS, $CdCO_3$	– آسیب رساندن به دستگاه‌های گوارش، عصبی، ایمنی و استخوان – تجمع زیاد آن در کاهو، شوید، شاهی، اسفناج، ریحان، کدو، تربچه، هویج، پیاز، کلم و تجمع کمتر آن در غلات – انتقال به‌صورت یون‌های آبپوشیده در آب‌های زیرزمینی – تشکیل کمپلکس در شرایط اسیدی بالیگاندهای آلی – جذب سطحی در شرایط بازی توسط اکسیدهای معدنی – جذب از خاک رس با سازوکار ظرفیت تبادل کاتیونی
روی (Zn)	پوشش روی فولاد و آهن	+۲	سنگ معدن ZnO	– آسیب زدن به استخوان، کبد، کلیه و پروستات – پرمصرف‌ترین فلز بعد از فولاد، آلومینیم و مس – پرتحرک‌ترین فلز در آب – تشکیل کمپلکس با آمینواسیدها و اسیدهای آلی
مس (Cu)	فعالیت‌های معدنی	+۲، +۱	سنگ معدن CuS, CuO	– محلول بودن مس کربنات در سامانه‌های هوازی و قلیایی – تشکیل کمپلکس‌های محلول با اسیدهای آلی در محیط

جدول ۱

ویژگی‌های چند فلز سنگین در جدول ۱ آمده است [۲ و ۳].

عوارض فلزهای سنگین

در بین فلزهای سنگین کادمیم بیشتر از بقیه جذب گیاهان می‌شود. در میان فراورده‌های کشاورزی، سبزی‌های خوردنی تعداد زیادی از فراورده‌های گیاهی را تشکیل می‌دهند. کشت این گیاهان به‌طور گسترده در بیشتر مناطق کشور انجام می‌شود و آبیاری آن‌ها باید در حجم وسیعی انجام شود و در این میان ممکن است آبیاری این گیاهان با فاضلاب صورت گیرد که احتمال آلودگی این گیاهان را به فلزهای سنگین افزایش می‌دهد.

یکی از اساسی‌ترین مشکلات فلزهای سنگین عدم سوخت‌وساز آن‌ها در بدن است. این فلزها در بافت‌هایی مانند چربی، ماهیچه، استخوان و مفاصل رسوب می‌کنند و باعث بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی می‌شوند. عمده‌ترین مشکلات مربوط به آن‌ها بروز اختلال‌های عصبی است. فلزهای سنگین، همچنین جایگزین دیگر نمک‌ها و موادمعدنی مورد نیاز بدن می‌شوند برای نمونه، در صورت کمبود روی، کادمیم جایگزین آن می‌شود. تجمع فلزهای سنگین در بدن دارای عوارضی به این قرار است: اختلال تعادل، سرد شدن پاها، نقص ایمنی، تحریک‌های پوستی، مشکلات گوارشی، خستگی، ناراحتی‌های قلبی و افزایش فشار خون، تحریک‌پذیری، ایجاد حساسیت، فراموشی و گیجی [٤].

برخی گیاهان بیش‌انباشت‌کننده که در خاک‌های آلوده با فلزهای سنگین رشد می‌کنند این توانایی را دارند که این فلزها را از راه ریشه جذب کرده، در بخش‌های مختلف خود انباشته کنند. گیاه‌پالایی فناوری نوینی است که در آن از گیاهان برای حذف آلاینده‌های محیطی مانند فلزهای سنگین استفاده می‌شود

سازوکار جذب و تجمع فلزهای سنگین

بافت خوراکی ریشه‌های هویج، سیب‌زمینی شیرین و تربچه، غلظت کمتری نسبت به ظرفیت تبادل کاتیونی[۳]، CEC، بافت همان ریشه‌ها دارد. یعنی در تمام این گیاهان ظرفیت تبادل کاتیونی بافت ریشه نسبت به فلزهای سنگین، بیشتر از غلظت تجمعی کادمیم در بافت ریشهٔ خوراکی این گیاهان است. ارتباط مستقیم ریشهٔ گیاهان با خاک، باعث می‌شود که فلزهای سنگین از راه جذب آب و مواد غذایی وارد گیاه شوند. تبادل یونی در دیوارهٔ سلولی و دیگر اندامک‌های گیاهی، سازوکاری پیچیده دارد. اگر مقدار کادمیم خاک، کمتر از ظرفیت تبادل کاتیونی ریشه باشد کادمیم به آسانی جذب ریشهٔ خوراکی نمی‌شود. از راه تبادل یون، کادمیم به‌صورت مستقیم جذب ریشهٔ خوراکی می‌شود و در ساقه و برگ‌ها تجمع می‌یابد. جیوه به‌دلیل فرّار بودن، به‌راحتی می‌تواند از راه اندام‌های هوایی مانند ساقه و برگ، جذب گیاه شود. بنا به مطالعات، فلزهای سنگین ابتدا از راه تبادل کاتیونی به دیوارهٔ سلولی ریشه جذب می‌شوند و سپس به‌تدریج توسط شیرهٔ گیاهی و به کمک فرایند انتشار در برگ و ساقه توزیع می‌شوند. با این حال غلظت فلزهای سنگین در ریشه، نسبت به ساقه و برگ بیشتر است[۵].

درمان گیاهان با اسیدهای آلی

بافت ریشهٔ گیاهان ممکن است اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم مانند استیک‌اسید، اکسالیک‌اسید، فوماریک‌اسید، سیتریک‌اسید و تارتاریک‌اسید را آزاد کند. با حضور این اسیدها، ترکیب‌ها و کی‌لیت‌هایی با فلزهای سنگین به‌صورت محلول تشکیل می‌شود که باعث تغییر در انتقال و تحرک آسان‌تر فلزها می‌شود.

سیتریک‌اسید با کم کردن pH باعث کاهش جذب سرب و کادمیم در گیاه تربچه می‌شود و تأثیر آن روی کادمیم بیشتر از سرب است. حضور سیتریک‌اسید باعث کاهش سمّیت این دو فلز و افزایش حمل آن از ریشه به ساقه می‌شود. در حضور سیتریک‌اسید مقدار سرب در ریشه و برگ کاهش می‌یابد یعنی جذب سرب توسط تربچه مهار می‌شود و این به‌دلیل کاهش pH و تشکیل مقداری کمپلکس است. بنابراین اثر سمّیت آن کاهش یافته و با افزایش سیتریک‌اسید رشد گیاه بهبود می‌یابد [٦].

فرایند تجمع کادمیم در هویج، سیب‌زمینی و تربچه

این سه گیاه می‌توانند بالاترین غلظت کادمیم را در ریشهٔ خود داشته باشند. غلظت کادمیم در ریشه، ساقه و برگ‌ها به مرور با رشد گیاه افزایش می‌یابد. زمانی‌که ریشهٔ خوراکی شروع به رشد می‌کند غلظت کادمیم تجمع یافته در بافت ریشه، به بالاترین مقدار خود می‌رسد. در اواخر دورهٔ رشد که

جرم کل ریشه، ساقه و برگ‌ها کاهش می‌یابد کادمیم تجمع‌یافته نیز کم می‌شود. در مراحل ابتدایی رشد، غلظت کادمیم ریشهٔ خوراکی، بسیار کمتر از خود ریشه است. تربچه در مراحل اولیهٔ کاشت، به‌دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی پایین، در بافت ریشه‌اش کادمیم کمی دارد. زمانی‌که ریشهٔ خوراکی در مرحلهٔ رشد است ریشه به‌سرعت کادمیم را از خاک جذب می‌کند. در این مرحله ریشه حاوی بیشترین مقدار کادمیم است و در زمان برداشت مقدار کادمیم در بخش ریشه کاهش و در بخش ریشهٔ خوراکی افزایش می‌یابد. کادمیم ابتدا از راه ریشه جذب و سپس وارد برگ و ساقه شده، ضمن غذاسازی گیاه، در ریشهٔ خوراکی ذخیره می‌شود. جدول ۲ نشان می‌دهد که CEC ریشه بسیار بیشتر از CEC ریشهٔ خوراکی است [۵].

در حضور سیتریک‌اسید مقدار سرب در ریشه و برگ کاهش می‌یابد یعنی جذب سرب توسط تربچه مهار می‌شود

کاهش سمّیت و تحرک فلزهای سنگین

از فرایندهای شیمیایی و زیست‌شناختی می‌توان به‌منظور تغییر شکل آلودگی‌های فلزی و آلاینده‌های آلی استفاده کرد. واکنش‌های شیمیایی سه دسته‌اند: واکنش‌های اکسایش، کاهش و خنثی‌سازی.

تغییر عدد اکسایش فلزهای سنگین، می‌تواند خاصیت سمّی آن‌ها را از بین ببرد یا باعث رسوب آن‌ها شود. رایج‌ترین درمان شیمیایی برای از بین بردن آلودگی‌های فاضلاب، کاهش Cr(VI) به Cr(III) و سرانجام رسوب دادن Cr(III) با هیدروکسید در محدودهٔ وسیعی از pH است. واکنش اکسایش دیگر، تبدیل آرسنیت به آرسنات است. گفتنی است خاصیت سمّی آرسنات As(V)، کمتر از آرسنیت و تحرک آن بیشتر است.

از خنثی‌سازی شیمیایی همراه با تنظیم pH خاک و آب‌ها می‌توان برای رسوب دادن نمک‌های فلزی در آب‌های آلوده استفاده کرد.

فرایندهای زیست‌شناختی: در فرایندهای زیست‌شناختی طبیعی از برخی گیاهان و موجودات زندهٔ ذره‌بینی برای کمک به جذب فلزها استفاده می‌شود. این فرایندها از طریق انواع سازوکارها شامل واکنش‌های اکسایش، کاهش و متیل‌دار شدن انجام می‌شوند.

تجمع زیست‌شناختی شامل جذب فلزهای آلاینده به‌وسیلهٔ موجودات زنده، مرده یا زیست‌توده[۴] غیرفعال است. گیاهان و موجودات زندهٔ فعال، فلزها را به کمک فرایندهای سوخت‌وساز طبیعی، از راه تبادل یونی و واکنش‌های تشکیل کمپلکس در دیواره‌های سلولی یا واکنش‌های تشکیل کمپلکس و رسوب در خارج و داخل سلول جذب می‌کنند.

فرایندهای زیست‌شیمیایی: واکنش‌های اکسایش و کاهش میکروبی می‌توانند در بازیافت فلزها مورد استفاده واقع شوند. برخی از موجودات زندهٔ بسیار ریز می‌توانند آلاینده‌های فلزی را به‌طور مستقیم اکسید یا احیا کنند. آلاینده‌های جیوه و کادمیم به کمک موجودات زندهٔ بسیار ریز میکروبی اکسید می‌شوند و آرسنیک و آهن با فرایندهای میکروبی کاهش می‌یابند. واکنش متیل‌دار شدن یکی از همین واکنش‌هاست. متیل‌دار شدن به‌معنی اتصال گروه‌های متیل به ترکیب‌های معدنی یون‌های فلزی، برای تشکیل ترکیب‌های آلی فلزی است، هر چند ترکیب‌های آلی فلزی، سمّی‌تر و متحرک‌تر از انواع فلزی هستند و ممکن است آب‌های سطحی و زیرزمینی را بیشتر آلوده کنند [۲].

گیاه‌پالایی

در این فناوری، از گیاهان سبز و ارتباط آن‌ها با موجودات زندهٔ ذره‌بینی خاک برای کاهش آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. این فناوری می‌تواند برای رفع هر دو نوع آلایندهٔ خاک یعنی معدنی و آلی به‌کار رود. بررسی‌ها نشان می‌دهد کاربرد روش‌های فیزیکوشیمیایی سبب از میان رفتن موجودات زندهٔ مفید خاک مانند تثبیت‌کننده‌های نیتروژن می‌شود که در نتیجه، فعالیت‌های زیست‌شناختی خاک را ضعیف می‌کند و در مقایسه با روش گیاه‌پالایی بسیار هزینه‌بر است.

گیاه‌پالایی[۵] شامل مراحل زیر است، شکل ۱:

- **استخراج گیاهی:** آلاینده‌های موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی می‌توانند جذب بافت‌های گیاهی شوند.
- **صاف کردن گیاهی:** آلاینده‌های موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی می‌توانند جذب ریشهٔ گیاه شوند.
- **تغییر گیاهی:** آنزیم‌های گیاهی می‌توانند آلاینده‌های

جذب شده در بافت‌های گیاهی را تغییر دهند.

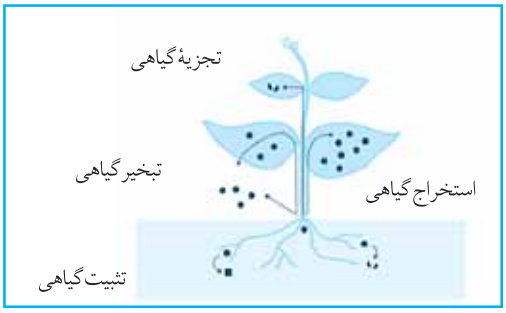
– **تثبیت گیاهی**: آلودگی‌ها می‌توانند وارد ساختار گیاه شوند.

– **تبخیر گیاهی**: آلودگی‌ها ممکن است از سطح گیاه تبخیر شوند.

– **نورکافت گیاهی**: آلودگی‌ها توسط نور تخریب می‌شوند.

– **تجزیهٔ گیاهی**: آلاینده‌ها توسط باکتری‌های موجود در ریشه تخریب می‌شوند [۷].

یکی از موانع اجرای تجاری گیاه‌پالایی چگونگی مصرف گیاهان آلوده است. پس از برداشت، آلودگی خاک توسط گیاه کاهش یافته اما مقدار زیادی زیست‌تودهٔ خطرناک تولید شده است. تولید کمپوست و متراکم کردن، دو روشی است که بسیاری از پژوهشگران برای مدیریت زیست‌تودهٔ گیاهان آلوده پیشنهاد کرده‌اند اما بهترین روش برای مصرف زیست‌توده‌های تولید شده از راه گیاه‌پالایی، تغییر و تبدیل‌های ترموشیمیایی است که در این روش زیست‌توده به‌عنوان یک منبع انرژی، به‌کار می‌رود. این زیست‌توده شامل کربن، هیدروژن و اکسیژن است که با عنوان هیدروکربن‌های اکسیژن‌دار شناخته می‌شود. سوزاندن و تولید گاز از روش‌های مهم برای تولید انرژی گرمایی و الکتریکی از گیاهان آلوده است.



شکل ۱

نتیجه‌گیری

عنصرهایی که خاصیت مسمومیت‌زایی بسیار بالایی دارند عبارت‌اند از: سرب، آرسنیک، جیوه، نقره، آنتیموان و کادمیم. مقدار کادمیم نسبت به دیگر آلاینده‌ها در خاک‌های کشاورزی بیشتر است زیرا این فلز در ساختار کودهای شیمیایی حاوی فسفات وجود دارد. یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش میزان کادمیم در فراورده‌های کشاورزی، جلوگیری از ورود آن به خاک و اقدامات مدیریتی جهت کاهش غلظت این فلز در محلول خاک است تا جذب و انتقال کادمیم توسط گیاهان کاهش داده شود. از آنجا که کاهو، تربچه، هویج و سیب‌زمینی شیرین می‌توانند مقدار کادمیم زیادی در بخش‌های خوراکی زیرزمینی خود ذخیره کنند، باید در مصرف آن‌ها احتیاط کرد.

از آنجا که کاهو، تربچه، هویج و سیب‌زمینی شیرین می‌توانند مقدار کادمیم زیادی در بخش‌های خوراکی زیرزمینی خود ذخیره کنند، باید در مصرف آن‌ها احتیاط کرد

یکی از فناوری‌های جدید به‌منظور برطرف کردن مشکل آلودگی ناشی از فلزهای سنگین در خاک و آب‌های زیرزمینی، پالایش گیاهی، ترمیم گیاهی یا گیاه‌پالایی است که با استفاده از برخی گونه‌های گیاهی خاص، غلظت این آلاینده‌ها در خاک کاهش می‌یابد.

1. brassica ceae
2. trace elements
3. cationic exchange capacity, CEC
4. biomass
5. phytoremediation

۱. مجلهٔ علوم دانشگاه تهران، جلد سی‌وپنجم (۱۳۸۸) شمارهٔ ۱.
2. Cynthia, R. E.; Ph. D. and Dzombak, D. A.; Ph. D., P. E. "Remediation of Metals- Contaminated Soils and Groundwater" Carnegie Mellon University Department of Civil and Environmental Engineering Pittsburgh, (1997).
3. Tangahu, BV.; Sheikh Abdullah, SR.; Basri, H.; Idris, M.; Anuar, N.; and Mukhlisin, M., "A Review on HeavyMetals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation" International J. Chem. Engineering, (2011), 1-31.
4. Suruchi,; Khanna, P.; "Assesment of Heavy Metal Contamination in Ddifferent Vegetables Grown in and Around Urban Areas" Research J. Environmental Toxicology, 5(3), (2011), 162-179.
5. Cheng, S.F.; Huang, C. Y.; "Accumulation of Cadmium Uptake From Soil In The Edible Root Of Root Vegetables": J. Environ. Eng. Manage.; 17(2), (2007), 137-142.
6.Chen, Y. X.; Lin, Q.; Luo, Y. M.; He, Y. F.; Zhen, S. J.; Yu, Y. L.; Tian, G. M.; Wong, M. H.; "The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil" J. Chemosphere, 50(6), (2003), 807-811.
7. www.avanmz.ir