

Comprehensive investigation of plant phytoremediation mechanisms for the removal of various pollutants from soil

Received: 19 December 2024, Accepted: 27 January 2025

Gholam Hossain Safari¹, Samira Bahrami Valeh², Mohammad Darvishmotevalli^{3,4}, Hossein faraji⁵, Akbar Eskandari^{1*}

¹ Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

² Department of Public Health, School of Public Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

³ Research Center for Health, Safety and Environment (RCHSE), Alborz University of Medical Sciences, Karaj, Iran

⁴ Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Alborz University of Medical Sciences, Karaj, Iran

⁵ Tropical and Communicable Diseases Research Center, Iranshahr University of Medical Sciences, Iranshahr, Iran

***Corresponding Author:**
 scandari12@yahoo.com

How to Cite This Article:

Safari GH, Gheitasian P, Darvishmotevalli M, Faraji H, Eskandari A. Comprehensive investigation of plant phytoremediation mechanisms for the removal of various pollutants from soil. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(1):65-81.

DOI:
[10.61882/jehe.13.1.65](https://doi.org/10.61882/jehe.13.1.65)

ABSTRACT

Background: From the global point of view, the soil is considered as the third major component of the environment, and its pollution is currently one of the most important challenges for environmental organizations worldwide, as well as the most significant environmental problems for countries. Therefore, the present study aims to comprehensively investigate the mechanisms of phytoremediation as an effective and sustainable tool for the purification of various pollutants from the soil.

Materials and Methods: This study was a descriptive review conducted in 2024 to report the process of search, documentation, and screening of the PRISMA checklist for systematic reviews. The search method included articles from 2000 to 2023 using the English keywords Phytoremediation, bioremediation, soil contamination, Heavy metals in soil, and their corresponding Persian equivalents on reputable websites such as PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Magiran, and SID.

Results: After searching with relevant keywords, a total of 1021 studies were found, and based on the criteria of input and output, 50 articles were used. According to the results, the main pollutants in soil are heavy metals, BTEX pollutants, and petroleum substances, which can be effectively remediated through various phytoremediation mechanisms, including hydraulic control, phytodegradation, phytoextraction, phytostabilization, phytovolatilization, rhizosphere degradation, and rhizofiltration, as a novel technology for addressing these contaminations.

Conclusion: The high costs of physical and chemical methods of soil remediation have led to the utilization of phytoremediation as a more cost-effective and simple approach for soil purification. The main advantage of this method over others is its affordability and simplicity, while its disadvantages include the potential accumulation of metals in bioaccumulating plants and the consumption of contaminated plant biomass by animals, limited climatic conditions, incomplete understanding of this technology, and its lengthy duration.

Keywords: phytoremediation, soil pollution, heavy metals, bioremediation

بررسی جامع مکانیسم‌های گیاه‌پالایی برای حذف آلاینده‌های مختلف از خاک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

غلامحسین صفری^۱، سمیرا بهرامی‌واله^۲، محمد درویش متولی^۳، حسین فرجی^۴، اکبر اسکندری^{۵*}

^۱ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۲ گروه بهداشت عمومی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

^۳ مرکز تحقیقات بهداشت، ایمنی و محیط، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران

^۴ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران

^۵ مرکز تحقیقات بیماری‌های واگیر و گرمسیری، دانشگاه علوم پزشکی ايرانشهر، ايرانشهر، ایران

چکیده

زمینه و هدف: از دیدگاه جهانی خاک سومین جزء عمده محیط‌زیست تلقی می‌شود که آلودگی آن در حال حاضر از مهم‌ترین چالش‌های سازمان‌های محیط‌زیست در جهان و همچنین مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی کشورها است لذا مطالعه حاضر باهدف بررسی جامع مکانیسم‌های گیاه‌پالایی به‌عنوان یک ابزار کارآمد و پایدار برای پاک‌سازی آلاینده‌های مختلف از خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه، یک مطالعه مروری - توصیفی در سال ۲۰۲۴ بود که به‌منظور گزارش فرایند جست‌وجو، مستندسازی و غربالگری از چک‌لیست پریزما برای بررسی‌های سیستماتیک استفاده شد. روش کار با جست‌وجو مقالات از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با کلید واژه‌های انگلیسی *Phytoremediation*، *bioremediation*، *Heavy metals in soil*، *soil contamination* و معادل فارسی مربوطه در سایت‌های معتبر *PubMed*، *Scopus*، *Web of Science*، *Google Scholar*، *Magiran* و *SID* بود.

یافته‌ها: بعد از جست‌وجو با کلید واژه‌های مرتبط تعداد ۱۰۲۱ مطالعه یافت شد و براساس معیارهای ورود و خروج ۵۰ مقاله مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج آلاینده‌های اصلی خاک فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های BTEX و مواد نفتی است و با مکانیسم‌های مختلف گیاه‌پالایی از جمله کنترل هیدرولیک، تجزیه توسط گیاهی، گیاه استخراجی، گیاه تثبیتی، تصعید توسط گیاه، تجزیه توسط ریزوسفر، ریزوفیلتراسیون به عنوان یک فناوری نوین در رفع این آلودگی‌ها موثر واقع شوند.

نتیجه‌گیری: هزینه‌های گزاف روش‌های فیزیکی و شیمیایی تصفیه خاک سبب شده تا استفاده از روش گیاه‌پالایی برای پاک‌سازی و تصفیه خاک بکار گرفته شود بزرگ‌ترین مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها، ارزان بودن و سادگی آن و معایب این روش خطرناک بودن بیومس گیاهان تجمع‌کننده فلزات و مصرف بیومس گیاهی آلوده شده توسط حیوانات، فاکتور محدود کننده شرایط آب و هوایی، عدم درک کامل این تکنولوژی و طولانی بودن آن است.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، آلودگی خاک، فلزات سنگین، زیست‌پالایی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

scandari12@yahoo.com

نحوه استناد به این مقاله:

Safari GH, Gheitasian P, Darvishmotevalli M, Faraji H, Eskandari A. Comprehensive investigation of plant phytoremediation mechanisms for the removal of various pollutants from soil. *Journal of Environmental Health Engineering*. 2025;13(1):65-81.

DOI:

[10.61882/jehe.13.1.65](https://doi.org/10.61882/jehe.13.1.65)

مقدمه

خاک بستری است که بقای میلیون‌ها انسان بدان وابسته است و از دیدگاه جهانی، خاک سومین جزء عمده محیط زیست تلقی می‌شود^۱ که نقش مهمی در کارکردهای اکوسیستم از قبیل ترسیب کربن، چرخه مواد غذایی و کنترل فرسایش دارد اما ممکن است به دلیل فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری بیش از حد از طبیعت، مقدمات تجزیه و آلودگی خاک ایجاد شود^۲ به عنوان نمونه مقادیر بالای فلزات سنگین^۱ در نتیجه فعالیت‌های انسانی از قبیل استفاده از مواد شیمیایی، اصلاح کننده‌های آلی، کودهای حیوانی، بهسازی‌های معدنی، لجن فاضلاب و ضایعات حاصل از صنایع آهن و فولاد، معدن کاوی، حمل و نقل جاده‌ای و غیره باعث آلوده شدن خاک می‌شود^۳.

آلودگی خاک در حال حاضر از مهمترین چالش‌های سازمان‌های محیط زیست در جهان و همچنین مهمترین معضلات زیست محیطی کشورها است چنانچه خاک آلوده، پاکسازی و تصفیه نشود و آلاینده‌های موجود در آن حذف و تجزیه نشود، آلاینده‌ها به تدریج در عمق خاک نفوذ کرده و افزون بر آلودگی خاک، باعث آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود که یکی از مهمترین منابع تأمین آب در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران است^۱. با توجه به اهمیت خاک، پاکسازی خاک‌های

آلوده در حال حاضر یکی از اولویت‌های جوامع محسوب می‌گردد که دلیل آن بالا رفتن استانداردهای حیات و آگاهی بیشتر با مسائل زیست محیطی است^۴. قانون حفاظت از خاک، با عنوان رسمی «قانون حفاظت، بهسازی و بهره‌برداری از خاک‌های کشور»، در سال ۱۳۹۸ توسط مجلس شورای اسلامی تصویب شده است. این قانون شامل ۴۴ ماده و ۱۲۷ تبصره است و هدف آن ارتقای مدیریت بهینه خاک‌های کشور، حفاظت از تنوع زیستی و تثبیت خاک‌های مهم مزارع و مراتع، بهبود کیفیت خاک و ارتقای سلامت محیط زیست است^۵.

از نظر تعریف آلودگی خاک به عنوان تجمع ترکیبات سمی پایدار، مواد شیمیایی، نمک‌ها، مواد رادیواکتیو یا عوامل بیماری‌زا در خاک تعریف می‌شود که اثرات نامطلوبی بر رشد گیاهان و سلامت حیوانات دارند^۶ منابع عمده آلودگی خاک عبارت است از بقایای کشاورزی، محصولات جانبی، آلاینده‌های هوا، آبیاری، سیل، نشت نفتی تصادفی، مدیریت ناکافی پسماندهای شهری و فاضلاب، فلزات سنگین و رسوب هیدروکربن^۷. در یک تقسیم بندی دیگر در سراسر جهان منابع اصلی آلودگی خاک شامل فرآورده‌های نفتی، آفت کش‌ها، زباله‌های شهری، جنگ‌های شیمیایی و بیولوژیکی گزارش شده است (جدول شماره ۱).

جدول ۱. منابع اصلی آلودگی خاک در دنیا^۷

جنگ بیولوژیکی	منابع کشاورزی	منابع شهری	جنگ شیمیایی	مشتقات نفتی
ویروس‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها و سموم	حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و نشت سوخت در مزارع	انتشارات تولید انرژی، آلودگی خاک توسط حمل و نقل و تولید، آلودگی خاک توسط پسماندها و لجن‌های حاصل از تصفیه فاضلاب	آلاینده‌ها، ترکیبات شیمیایی سمی، و بازوها، آلودگی زمینی ناشی از عملیات ارتش جنگ سرد	اکتشاف، تولید، پالایش حمل و نقل و مصرف

1. Heavy metals

آلاینده‌های اصلی خاک شامل فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلین^۱ و آلاینده‌های نفتی خاک است که در زیر به شرح هریک از این آلاینده‌ها پرداخته شده است:

(۱) فلزات سنگین: فلزات سنگین از آلاینده‌های غیرآلی پایدار با پایین‌ترین سطح تجزیه بیولوژیکی محسوب می‌شوند به همین دلیل در بدن موجودات زنده تجمع می‌یابند^۸ آلودگی فلزات سنگین در خاک پدیده‌ای رو به گسترش در سطح جهان است که مورد توجه بسیاری از دولت‌ها و نهادهای نظارتی قرار گرفته است. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالت متحده آمریکا^۲ فلزات سنگین سرب (Pb)، آرسنیک (Ar)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، مس (Cu)، روی (Zn)، سلنیوم (Se)، وانادیوم (V)، کادمیوم (Cd) و جیوه (Hg) را از جمله جدی‌ترین آلاینده خاک معرفی کرده است این فلزات می‌توانند منجر به بروز اختلالات در سلامتی انسان و بروز عوارضی همچون سرطان‌ها و موجب کوتاه شدن طول عمر انسان و نیز خطرات جدی برای سلامتی گیاهان و حیوانات شوند^{۱۰-۸}. فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های انسانی مانند استخراج معدن، حمل و نقل، دفع فاضلاب، و کوددهی تهدیدی مداوم برای سلامت خاک هستند این فلزات علاوه بر تجزیه محیط زیست، در سطح خاک رسوب می‌کنند و سپس در بافت سبزیجات و محصولات کشاورزی جذب می‌شوند^{۹، ۸}.

(۲) گروه آلاینده‌های بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلین: از میان آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های نفتی از مهمترین آلاینده‌ها آلی محیط زیست هستند که بدلیل سمی بودن^۳، سرطان‌زای^۴ و ایجاد تغییرات موتاژنتیکی^۵ (تغییرات جهش‌زایی) وجود آنها در طبیعت، نگرانی‌های بسیاری را سبب شده است مهمترین قسمت آلاینده‌های نفتی، بخش

محلول آنها از قبیل BTEX است و شامل بنزن، اتیل بنزن، تولوئن و سه ایزومر زایلین است^{۱۱}. BTEX برای محیط زیست بسیار سمی است سمیت بالای BTEX زیستگاه طبیعی گیاهان و جانوران را تجزیه می‌کند و باعث مهاجرت گیاهان و جانوران به یک زیستگاه جدید می‌شود. محتوای BTEX در یک موجود زنده می‌تواند به دلیل انباشتگی و فرآیند بزرگنمایی زیستی افزایش یابد و اثر سمی BTEX هنگامی که مقدار زیادی از BTEX در موجودات انباشته شود، ارگانسیم‌ها را از بین می‌برد^{۱۲}.

(۳) آلاینده‌های نفتی خاک: فرآورده‌های نفتی باعث ویرانی بزرگی در اکوسیستم‌های خاک و آب می‌شود^{۱۳}. شایع‌ترین مسیر آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی ناشی مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی است که توسط پمپ بنزین-ها، مجتمع‌های تجاری، صنعتی و مسکونی استفاده می-شود^{۱۴} نشت نفت از لوله‌های انتقال و سرریز شدن مخازن نفت خام و رهاسازی ضایعات و مواد نفتی پالایشگاه باعث آلودگی خاک به مواد نفتی می‌شود^{۱۵} پتانسیل نشت نفت بسیار قابل توجه است و اثرات نفت ریخته شده بارها تهدیدهای جدی برای محیط زیست است. نشت مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی، دفع نامناسب ضایعات نفتی و نشت‌های تصادفی از مسیرهای اصلی آلودگی خاک و آب-های زیرزمینی به فرآورده‌های نفتی هستند^{۱۴} از دیگر منبع اصلی آلودگی احتمالی توسط انسان هیدروکربن‌ها میادین نفتی از جمله چاه‌ها، پایانه‌های نفتی، واحدهای تصفیه نفت، مشعل‌های گاز، خطوط لوله و پالایشگاه‌های نفت هستند^{۱۶}.

1. Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene

2. United States Environmental Protection Agency

3. toxic

4. Carcinogenic

5. Mutagenetic changes

روش کار

این مطالعه، یک مطالعه مروری - توصیفی بوده که در سال ۲۰۲۴ انجام شد که به منظور گزارش فرایند جست و جو، مستندسازی و غربالگری مطالب مطابق شکل ۱، از چک لیست پریمما^۱ برای بررسی‌های سیستماتیک استفاده شد. برای شناسایی مطالعات مرتبط، جست‌وجو مقالات از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با کلید واژه‌های انگلیسی soil, bioremediation, Phytoremediation، Heavy metals in soil، contamination و معادل فارسی مربوطه درسایت‌های معتبر PubMed، Google Scholar، Web of Science، Scopus، Magiran و SID بود و جهت ارزیابی مقالات توجه به اعتبار مجله، نویسندگان، روش‌شناسی و نوآوری مد نظر قرار گرفت.

در نمودار ۱ به صورت گرافیکی از مرحله جمع‌آوری اولیه مقالات تا رسیدن به مجموعه نهایی مقالات مورد استفاده برای تحلیل، نشان داده شده است مراحل اصلی فرآیند مستندسازی و غربالگری و همچنین رفع تناقضات به شرح زیر بود:

✓ جمع‌آوری اولیه مقالات: در این مرحله، مقالات از طریق جستجو در پایگاه‌های داده و سایر منابع جمع‌آوری شدند.

✓ حذف مقالات تکراری: مقالات تکراری از لیست حذف شدند تا از شمارش مجدد جلوگیری شود.

✓ غربالگری اولیه: در این مرحله، مقالات بر اساس معیارهایی مانند مرتبط بودن با موضوع پژوهش، تاریخ انتشار، نوع مطالعه غربال شدند.

✓ مطالعه کامل مقالات: مقالاتی که از غربالگری اولیه عبور کرده‌اند، به طور کامل مطالعه شدند تا اطمینان حاصل شود که برای پژوهش مناسب هستند.

✓ حذف مقالات نامناسب: مقالاتی که پس از مطالعه کامل، نامناسب تشخیص داده می‌شوند، از لیست حذف شدند.

✓ انتخاب مقالات نهایی: مقالات باقی‌مانده، مقالات نهایی بودند که برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند.

معیارهای ورود و خروج مطالعه حاضر:

تعداد ۱۰۲۱ مطالعه که در پایگاه‌های داده ذکر شده جمع‌آوری و ۵۰ مورد از آن‌ها انتخاب شدند. که شامل بررسی مطالعات منتشر شده به عنوان مقالات اصلی، بررسی مقالات منتشر شده به زبان‌های فارسی و انگلیسی که متن کامل آن در دسترس بود، بررسی مطالعات منتشر شده در رابطه با مکانیسم‌های گیاه پالایی، آلاینده‌های مختلف خاک، بررسی مطالعاتی که قوی‌ترین ارتباط موضوعی با عنوان مطالعه حاضر را داشتند و همچنین خروج سایر مطالعات از جمله بررسی مقالات منتشر شده به سایر زبان‌ها، بررسی مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود و بررسی‌های منتشر شده به صورت پایان‌نامه، کتاب، نامه به سردبیر، سمینار، کنفرانس، گزارش و مطالعات غیرمرتبط.

مطالعات انتخاب شده در وهله اول شامل بررسی مکانیسم‌های گیاه‌پالایی^۲ و ثنایا، آلودگی خاک و روش‌های حذف آلاینده‌های مختلف از خاک با مکانیسم‌های گیاه-پالایی بودند. معیارهای انتخاب مقالات در دسترس بودن، توجه به مکانیسم‌ها و فرایندهای گیاه‌پالایی برای آلاینده-های اصلی خاک شامل فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های

1.PRISMA

2.Phytoremediation

یافته‌ها

بعد از جست‌وجو با کلید واژه‌های ذکرشده مطابق شکل ۱ تعداد ۱۰۲۱ مطالعه یافت شد. پس از حذف موارد تکراری و غیرمرتبط تعداد ۴۲۱ مقاله مورد بررسی قرارگرفت. بعد از بررسی سوابق با حذف مطالعات شامل کتاب و گزارش و کنفرانس در نهایت تعداد ۱۱۷ مقاله بررسی شد. در آخر براساس معیارهای ورود و خروج، از داده‌های به‌کار رفته در ۵۰ مقاله استفاده شد. موارد استخراج شده از مطالعات بررسی شده شامل مکانیسم‌های گیاه‌پالایی و انواع آلاینده-های خاک بود. براساس نتایج آلودگی اصلی خاک با فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های BTEX و مواد نفتی است و با مکانیسم گیاه‌پالایی می‌تواند در رفع این آلودگی‌ها موثر واقع شوند پس از جست‌وجو و واردکردن داده‌ها به نرم افزار End Note، مراحل غربالگری مطالعات، مطابق با معیارهای ورود و خروج انجام شد و برای رفع تناقض مقالات ارزیابی شد و مقالاتی که معیار ورود به مطالعه را داشتند به طور دقیق بررسی شدند. در نمودار ۲ مطالعات انتخاب شده براساس موضوع را نشان داده شده است.

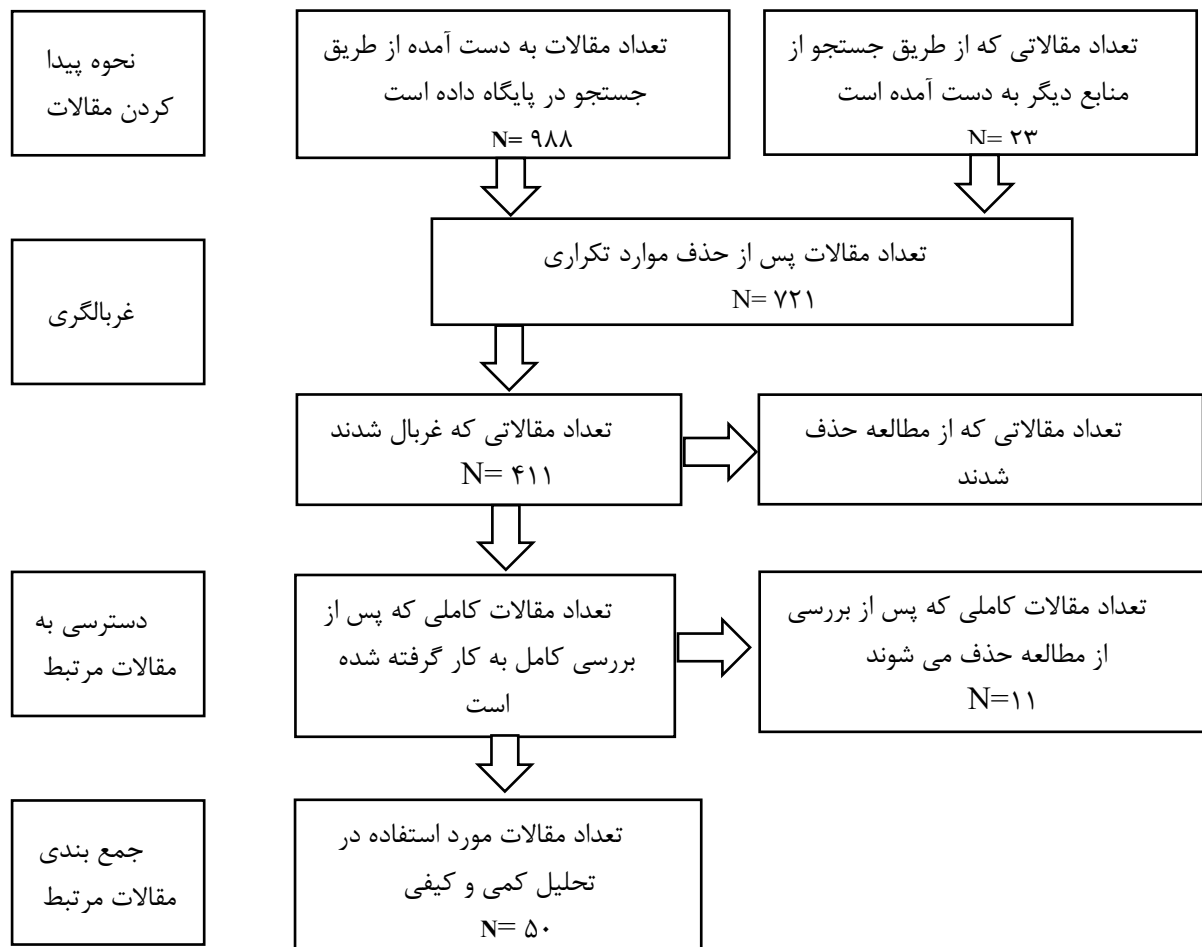
BTEX و آلاینده‌های نفتی خاک بود. پس از انتخاب مقالات، ابتدا به بررسی مکانیسم‌های گیاه‌پالایی در محیط‌زیست و سپس آلاینده‌های اصلی خاک در منابع زیست محیطی پرداخته شد.

ویژگی‌های مطالعات انتخاب شده:

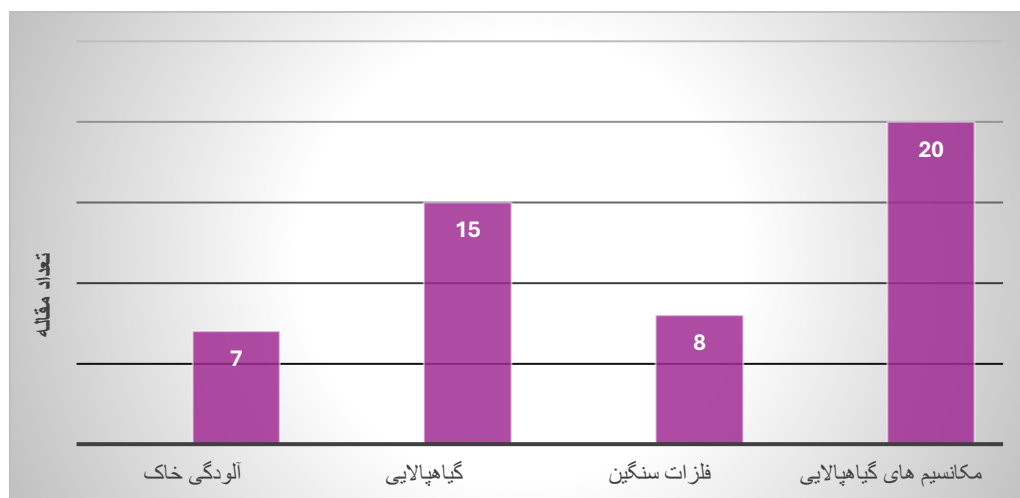
مطالعات انتخاب شده شامل مطالعات پژوهشی و مروری و نیز مطالعاتی که به بررسی مکانیسم‌های گیاه‌پالایی و آلاینده‌های مختلف از خاک پرداخته بود، انتخاب شد.

استخراج داده‌ها:

پس از جست‌وجو و واردکردن داده‌ها به نرم افزار End Note، مراحل غربالگری مطالعات، مطابق با معیارهای ورود و خروج انجام شد و برای رفع تناقض مقالات ارزیابی شد و مقالاتی که معیار ورود به مطالعه را داشتند به طور دقیق بررسی شدند.



نمودار ۱. جریان پریزما برای گنجاندن مقالات مرتبط



نمودار ۲. مطالعات انتخاب شده براساس موضوع

به طور کلی روش‌های پاک سازی خاک‌های آلوده فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، تجزیه گرمایی، تثبیت خاک و زیستی است.^{۱۷} هزینه‌های گزاف برخی از این روش‌های مانند فرایندهای فیزیکی، شیمیایی سبب شده تا تلاش در جهت دستیابی به روش‌های ارزانتری انجام گردد و بدین ترتیب از منابع بیولوژیک محیط زیست جهت پاکسازی نقاط آلوده به انواع آلاینده‌ها کمک گرفته شد، از جمله این روش‌ها زیست‌پالایی^۱ است. استفاده از برخی گیاهان و میکروارگانیسم‌هایی که سبب کاهش آلودگی محیط زیست و تجزیه آلاینده‌های محیطی به اشکال کمتر سمی می‌شود به زیست‌پالایی معروف است.^{۱۸، ۱۹} طبق تعریف عملیاتی، زیست‌پالایی استفاده از موجودات زنده برای تجزیه آلاینده‌های محیطی به اشکال کمتر سمی است. این موجودات شامل باکتری‌ها و قارچ‌ها یا گیاهان طبیعی است تا مواد مضر برای سلامت انسان را تجزیه یا سم‌زدایی کنند ترکیبات آلاینده توسط موجودات زنده از طریق واکنش‌ها تبدیل می‌شوند که به عنوان بخشی از فرایندهای متابولیک آنها انجام می‌شود.^{۲۰}

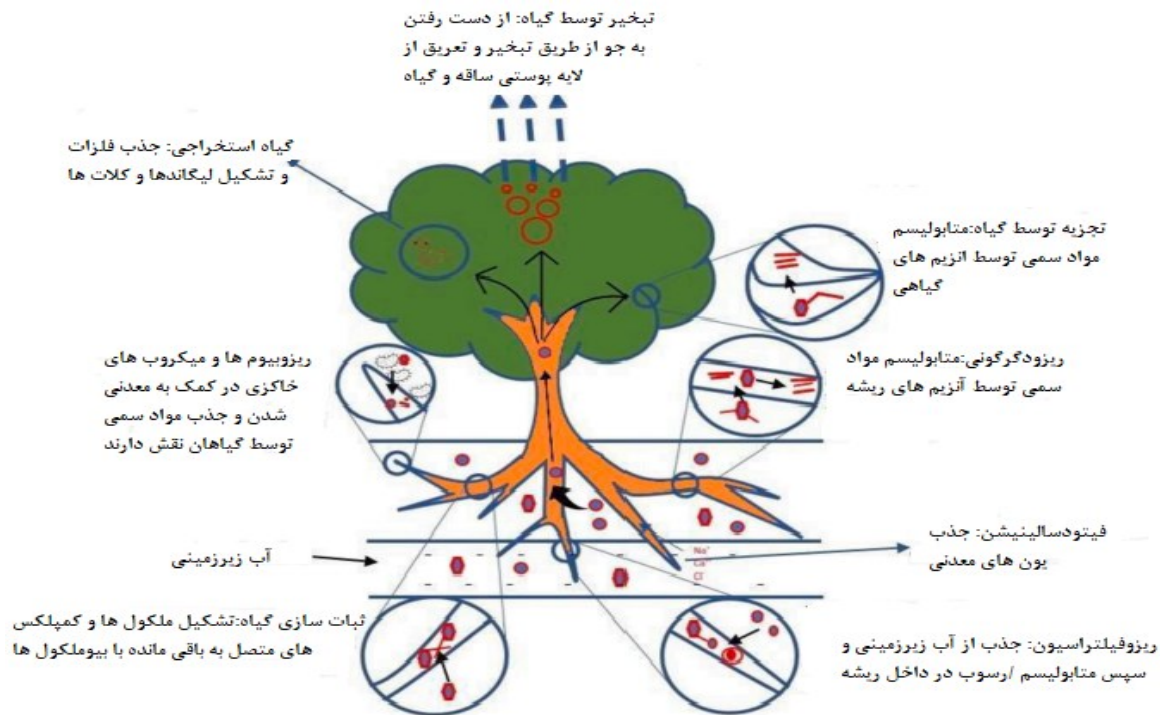
از نظر تاریخچه، استفاده از میکروب‌ها در زیست‌پالایی مدرن تا حدی به جورج رابینسون نسبت داده شده است او از میکروب‌ها برای مصرف نشت نفت در امتداد ساحل سانتا باربارا، کالیفرنیا در اواخر دهه ۱۹۶۰ استفاده کرد. از سال ۱۹۸۰، پاکسازی زیستی نشت نفت و سایر زباله‌های خطرناک مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.^{۲۱} زیست‌پالایی که یک روش جدید، مقرون به صرفه، کارآمد، سازگار با محیط زیست، قابل اجرا در محل و با استراتژی

خورشید محور است^{۲۲، ۲۳} که به طور گسترده در خاک‌های مختلف آلوده برای حذف، تجزیه، جذب، متابولیسم یا سم‌زدایی فلزات و آلاینده‌های آلی استفاده شده است.^{۲۴} در این روش از قابلیت گیاهان، باکتری‌ها، قارچ‌ها، گل‌سنگ‌ها، جلبک‌ها آب‌های شیرین و غیره جهت پاکسازی و رفع آلودگی و پاکسازی خاک، آب و هوا از آلاینده‌ها استفاده می‌شود.^{۱۸}

بعضی از گیاهان می‌توانند به طور کامل و یا جزئی مواد آلاینده موجود در خاک، لجن، رسوبات، آب‌های زیرزمینی و سطحی و هوا را در خود جمع کنند، که این فرآیند انباشت گیاهی یا گیاه‌پالایی^۲ گویند.^{۱۸} گیاه‌پالایی در واقع یک فناوری نسبتاً نوین پالایش خاک مناسب جهت آلوده است که در آن از گیاهان مقاوم و مناسب جهت حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های معدنی، رادیواکتیو و آلی به ویژه ترکیبات نفتی از محیط زیست استفاده می‌شود.^{۲۵} در گیاه‌پالایی، گیاهان معمولاً آلاینده‌ها را جذب، اندوخته و یا متصاعد می‌کنند.^{۲۶} این گیاهان از فرایندهای بیولوژیک متنوع گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی خود در جهت کمک به کاهش و رفع آلودگی استفاده می‌کنند، که همچنین به آن Green remediation و Agroremediation، Botano – remediation و remediation Vegetative نیز می‌گویند.^{۱۸} در شکل ۱ انواع فرایند و مکانیسم‌های گیاه‌پالایی نشان داده شد است.

1. Bioremediation

2. Phytoremediation



شکل ۱. فرایند و مکانیسم های گیاه پالایی^{۲۷}

عناصر مورد نیاز است. علاوه بر هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن، حدود ۹۵ درصد وزن سلول ها را تشکیل می دهد. فسفر و گوگرد با ۷۰ درصد باقی مانده سهم دارند. نیاز غذایی نسبت کربن به نیتروژن ۱۰:۱ و کربن به فسفر ۳۰:۱ است^{۲۸}. اگرچه میکروارگانیسم ها در خاک های آلوده وجود دارند، اما لزوماً نمی توانند قدرت مورد نیاز برای پاکسازی زیستی محل را داشته باشند. رشد و فعالیت آنها باید تحریک شود. تحریک زیستی معمولاً شامل افزودن مواد مغذی و اکسیژن برای کمک به میکروارگانیسم های بومی است. این مواد مغذی بلوک های اساسی زندگی هستند و به میکروب ها اجازه می دهند تا آنزیم های لازم را برای تجزیه آلاینده ها ایجاد کنند^{۲۸}. در جدول شماره ۲ پارامترها و شرایط محیطی برای فعالیت میکروبی نشان داده شده است.

الزامات زیست محیطی بر گیاه پالایی: رشد و فعالیت میکروبی به راحتی تحت تأثیر pH، دما و رطوبت قرار می گیرد. اگرچه میکروارگانیسم ها در شرایط شدید نیز جدا شده اند، اما بیشتر آنها در یک محدوده باریک رشد بهینه دارند، به طوری که دستیابی به شرایط بهینه مهم است. اگر خاک بیش از حد اسید داشته باشد، می توان با افزودن آهک، PH را افزایش داد. دما بر سرعت واکنش های بیوشیمیایی تأثیر می گذارد و سرعت بسیاری از آنها به ازای هر ۱۰ درجه سانتی گراد افزایش دما دو برابر می شود. با این حال، بالاتر از یک دمای معین، سلول ها می میرند علاوه بر تأثیر pH و دما، آب برای همه موجودات زنده ضروری است و آبیاری برای رسیدن به سطح رطوبت مطلوب مورد نیاز است^{۲۸}.

فاکتورهای محیطی موثر بر گیاه پالایی: کربن اساسی ترین عنصر اشکال زنده است و به مقدار بیشتری نسبت به سایر

جدول ۲. پارامترها و شرایط محیطی فعالیت میکروبی^{۱۹}

پارامتر	شرایط لازم برای فعالیت میکروبی	ارزش بهینه برای تجزیه روغن
رطوبت خاک	۲۵-۲۸ درصد ظرفیت نگهداری آب	۳۰-۹۰٪
pH خاک	۵/۸-۵/۸	۵-۸/۶
محتوای اکسیژن	هوازی. حداقل فضای منافذ پر از هوا ۱۰٪	۴۰-۱۰٪
محتوای مواد مغذی	N و P برای رشد میکروبی	C:N:P = ۱۰۰:۱۰:۱
دما (°C)	۴۵-۱۵	۲۰-۳۰
آلاینده‌ها	خیلی سمی نباشد	هیدروکربن ۵-۱۰ درصد وزن خشک خاک
فلزات سنگین	محتوای کل ppm ۲۰۰۰	۷۰۰۰ ppm
نوع خاک	مقدار کم رس یا سیلت	

بحث

مطابق مطالعات انجام شده مکانیسم‌های مختلفی در گیاه‌پالایی نقش دارند. گیاه پالایی بسته به نوع آلاینده، از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله تجزیه زیستی، تبخیر، فیلتراسیون و غیره رخ می‌دهد^{۲۹} که در زیر به شرح هر یک از مکانیسم‌های گیاه پالایی پرداخته شده است:

■ کنترل هیدرولیک^۱: کنترل هیدرولیک شکلی از مهار و استفاده از گیاهان به منظور جذب سریع همراه با مصرف زیادی آب است که باعث مهاجرت یون‌های فلزی با آب می‌گردد و به آن فیتوهیدرولیک نیز می‌گویند^{۲۰،۳۰}. پروژدهای گیاه‌پالایی با استفاده از کنترل هیدرولیکی معمولاً از درختان و گیاهان فراتوفیتی^۲ استفاده می‌کنند که توانایی تعرق حجم زیادی از آب را دارند و در نتیجه تعادل آب موجود را تحت تأثیر قرار می‌دهند^{۳۱}.

■ تجزیه توسط گیاهی^۳: تجزیه مواد آلاینده توسط فرایندهای متابولیسمی گیاه و یا تجزیه مترادف با تغییر

شکل توسط گیاه و در اثر ترشح ترکیبات گیاه مانند

آنزیم‌ها است^{۳۰}.

■ گیاه استخراجی^۴: این روش بهترین رویکرد نوظهور برای برداشت مواد آلوده کننده از خاک و جداسازی آن بدون تجزیه ساختمان و حاصلخیزی خاک با کمترین هزینه است این فناوری اشاره دارد که گیاهان فلزات را از خاک جذب کرده و آنها را به شاخه‌های قابل برداشت منتقل می‌کنند^{۳۲،۳۴} این روش به Phytoaccumulation نیز معروف است دو استراتژی اصلی این روش شامل موارد زیر است: الف) Phytoextraction با کمک کلات یا ب) Phytoextraction القاء شده، در این روش کلات‌های مصنوعی برای افزایش تحرک و جذب مواد آلوده کننده اضافه می‌شود

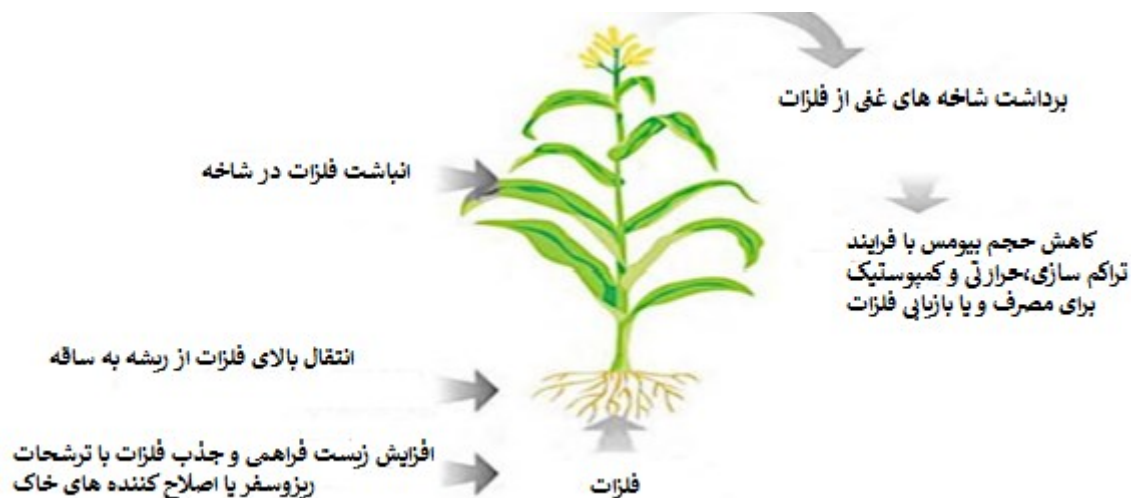
1.control Hydraulic

2.phreatophytic

3.Phyto-degradation

4.Phytoextraction

ب) Phytoextraction: متمادی و پیوسته، در این روش برداشت فلزات وابسته به توانایی طبیعی گیاه برای ترمیم می‌باشد.^{۳۳}



شکل ۲. فرایند فیتواکستراکشن^{۳۴}

تراوش شده از طریق ماتریکس خاک است که ممکن است منجر به تشکیل تراوشات خطرناک شود بنابراین از فرسایش خاک و توزیع مواد سمی به سایر نواحی جلوگیری می‌شود تثبیت گیاهی یک تکنیک مناسب برای احیای Cr و Zn , As , Cu , Cd است.^{۳۳، ۳۲}

■ گیاه تثبیتی^۲: تثبیت گیاهی فلزات سنگین با استفاده از گیاهان سبز امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است زیرا روشی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهد و علاوه بر این از نظر زیبایی شناختی نیز خوشایند است.^{۳۵} تثبیت گیاهی که به آن غیرفعال سازی در محل گفته می‌شود، در درجه اول برای اصلاح خاک، رسوبات و لجن‌ها استفاده می‌شود.^{۳۲} مکانیسم اساسی تثبیت گیاهی، کمپلکس شدن یون‌های فلزی با ترشحات ریشه یا با دیواره‌های سلولی و همچنین اتصال با مولکول‌های متصل‌کننده فلز مانند فیتوکلاتین‌ها و متالوتیونین‌ها و در نهایت جدا کردن آنها به واکوئل ریشه است.^{۳۵} این روش وابسته به توانایی ریشه برای دور ساختن و کاهش قابلیت دسترسی زیستی مواد آلوده کننده در خاک است. این روش از بصورت جذب، رسوب، ایجاد کمپلکس و یا کاهش تعادل فلزی انجام می‌گیرد. هدف اولیه گیاهان کاهش مقدار آب

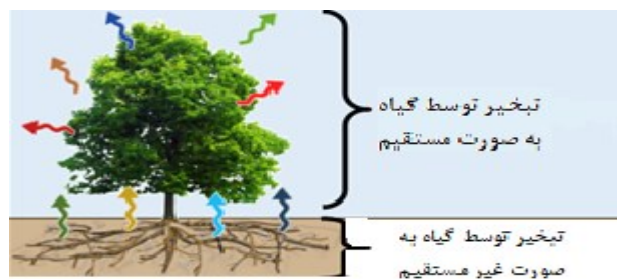
1. Phytoextraction
2. Phytostabilization



شکل ۳. فرایند گیاه تثبیتی^{۲۲}

است و در این روش به طور کلی برای اغلب آلاینده رقیق شدن قابل توجه و فروپاشی فتوشیمیایی در جو اتفاق می‌افتد^{۳۶}.

■ تبخیر توسط گیاه^۱: اشاره به جذب و انتقال عناصر آلاینده و یا تغییر ترکیبات و سپس رها کردن در اتمسفر دارد^{۳۰}. تبخیر شدن گیاهی به طور گسترده برای تعدادی از آلاینده‌ها آلی و هم غیر آلی مشاهده شده



شکل ۴. تبخیر توسط گیاه^{۲۶}

(ریزوسفر) یا با میکروارگانیسم‌های مرتبط موجود در ریشه (ریزوپلان) دارند و ثانیا فعل و انفعالات داخلی، که با میکروارگانیسم‌هایی که قادر به نفوذ بین سلولی (اندوفیت‌ها) یا درون سلولی (همزیست‌ها) در بافت های گیاهی هستند، ایجاد می‌کنند^{۳۷}.

■ تجزیه توسط ریزوسفر^۳: تجزیه آلاینده‌ها توسط جمعیت‌های میکروبی که در نزدیکی ریشه فعالیت دارند و باعث جذب آلاینده‌ها از محلول خاک اطراف ریشه به درون ریشه و یا رسوب آنها روی سطح ریشه می‌شود^{۳۰}. گیاهان با میکروارگانیسم‌های مختلف تعامل برقرار می‌کنند و با توجه به نزدیکی آنها به ریشه، دو مورد طبقه بندی مطرح است اولاً گیاهان دارای فعل و انفعالات خارجی با میکروارگانیسم‌های آزاد در خاک

1. Phytovolatilization

2. Phytovolatilization

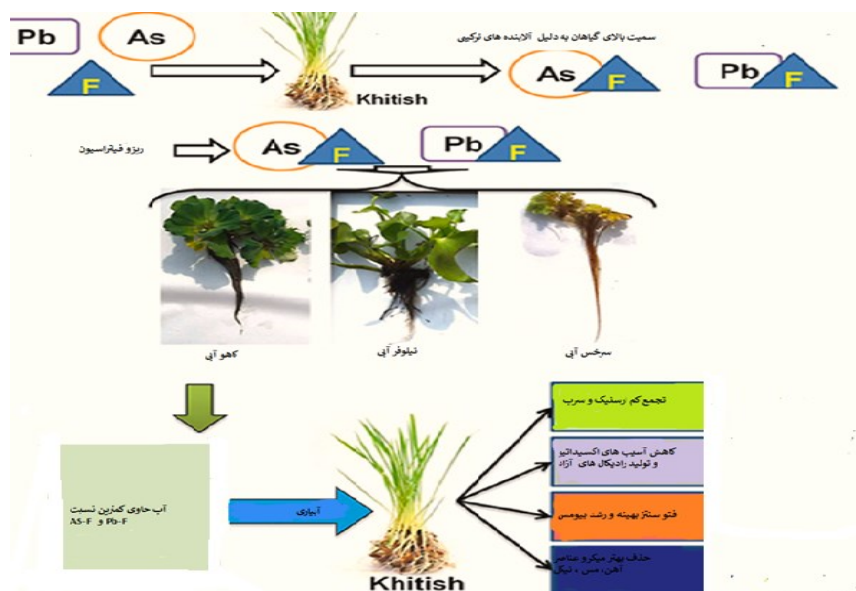
3. degradation-Rhizo

- طبق مطالعات چمن‌های بیش از حد انباشته توانایی جذب مقادیر غیر معمول بالایی از فلزات سمی را دارند
- و تجمع چنین فلزاتی می‌تواند مقاومت گیاه خواری را در بافت‌های بالای زمین ایجاد کند ^{۳۸}.



شکل ۵. تجزیه توسط ریزوسفر ^{۳۹}

- ریزوفیلتراسیون^۲: شامل استفاده از گیاهان برای تمیز کردن محیط‌های مختلف آبی است گیاهان به منظور جذب، تغلیظ و رسوب مواد آلوده کننده آنها و نیز حذف ترکیبات خطرناک را توسط ریشه‌های‌شان از چرخه
- انتقال خارج کرده و تجمع می‌دهند این عمل برای فلزاتی چون کادمیوم، مس، کروم، سرب و روی نیکل صورت می‌گیرد که عمدتاً در ریشه ها باقی می‌مانند ^{۳۲، ۳۳، ۴۰}.



شکل ۶. ریزوفیلتراسیون ^{۴۱}

- 1.degradation-Rhizo
- 2.Rhizofiltration
- 3.Rhizofiltration

در مطالعه Hazrat و همکاران در خصوص گیاه‌پالایی برای حذف فلزات سنگین مشخص شد که استفاده از گیاهان مانند فیتولاکا دیوکور و تردبلیدوس موشی می‌تواند به‌طور مؤثر فلزات سنگین مانند سرب و کادمیوم را از خاک جذب کند همچنین این فرآیند به بهبود کیفیت خاک کمک می‌کند و به عنوان یک راه حل پایدار برای بازسازی محیط‌زیست مطرح شده است.^{۴۲} در مطالعه محسن زاده و همکاران مشخص شد گیاه وتیور توانایی رشد در شرایطی مانند آلوده خاک به وسیله پالایشگاه‌ها را دارا است و قادر است میزان آلودگی هیدروکربن‌های نفتی کل و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش دهد.^{۴۳} گلشن حسینی و همکاران در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که گیاهان گندم و آفتابگردان در خاک‌های معدنی بندر عباس قابلیت رشد دارند و قادر به جذب رادیوم را دارند.^{۴۴} در مطالعه صالحی و متینی‌زاده تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بر فرآیند پالایش سبز خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با بررسی و تفسیر نتایج به دست آمده مشخص شد با توجه به زمان بر بودن فرایند گیاه‌پالایی، می‌توان از توانایی قارچ‌های در تشدید فرایند گیاه‌پالایی استفاده کرد.^{۴۵}

گیاه‌پالایی اثرات طولانی‌مدتی نیز دارد مطالعات نشان می‌دهند که فرایند گیاه‌پالایی می‌تواند به بهبود ساختار و کیفیت خاک‌های آلوده کمک کند و با رشد گیاهان، فعالیت میکروبی در خاک افزایش می‌یابد که به تجزیه مواد آلاینده کمک می‌کند.^{۴۶} گیاه‌پالایی به مدت طولانی می‌تواند باعث کاهش تجمع آلاینده‌ها در سطح خاک و آب‌های زیرزمینی شود که این فرایند می‌تواند به حداقل رساندن اثرات منفی این آلاینده‌ها بر اکوسیستم‌های محلی بینجامد.^{۴۷} همچنین گیاه‌پالایی می‌تواند به کاهش

هزینه‌های پاک‌سازی در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی کمک کند. این فرایند نه تنها آلاینده‌ها را حذف می‌کند بلکه ممکن است سود اقتصادی از طریق محصولات گیاهی نیز فراهم کند.^{۴۲}

مزایای گیاه‌پالایی ارزان و سازگار با محیط زیست برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است. این روش با استفاده از گیاهان، خاک را بهبود بخشیده، از فرسایش آن جلوگیری می‌کند و هزینه‌های پاک‌سازی را کاهش می‌دهد. همچنین، این روش به دلیل سادگی و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، مورد استقبال قرار گرفته است.^{۳۰، ۴۸، ۴۹} از معایب و محدودیت‌های گیاه‌پالایی مشکلاتی مانند عدم شناخت کافی، ناهماهنگی با قوانین، محدودیت در عمق و شدت آلودگی، زمان‌بر بودن، تولید مواد جانبی خطرناک، وابستگی به شرایط آب و هوایی، خطرناک بودن گیاهان آلوده، عدم کارایی برای همه مواد شیمیایی، طولانی بودن پروسه، مشکل دفع پسماند و احتمال مصرف توسط حیوانات مواجه است.^{۳۰، ۳۲، ۵۰-۴۸}

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی، روشی نوین و سازگار با محیط زیست برای پاک‌سازی آلودگی‌های خاک، آب و هوا است که از توانایی ذاتی گیاهان در جذب، تجزیه یا تثبیت آلاینده‌ها بهره می‌برد. در این روش، گیاهان با جذب آلاینده‌ها از طریق ریشه‌های خود و انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی یا ذخیره در بافت‌های خود، نقش یک فیلتر طبیعی را ایفا می‌کنند. مکانیسم‌های گیاه‌پالایی شامل جذب، تخریب، تثبیت، تبخیر و تجزیه توسط ریزوسفر است. گیاه‌پالایی مزایای متعددی از جمله هزینه پایین، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، سازگاری با محیط زیست و امکان بازیابی زمین‌های آلوده برای کشاورزی را دارد. با این حال، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به زمان‌بر

حمایت مالی

در اجرای این پژوهش هیچ نوع حمایت مالی دریافت نشده است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت نموده‌اند.

مشارکت نویسندگان

نگارش و ایده مقاله: غلامحسین صفری، اکبر اسکندری

جمع‌آوری مقالات: سمیرا بهرامی‌واله، حسین فرجی

بازبینی متن مقاله: محمد درویش متولی

بودن فرایند، وابستگی به نوع گیاه و شرایط محیطی اشاره کرد. انتخاب گیاه مناسب برای هر نوع آلودگی و ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاهان از عوامل مهم موفقیت گیاه‌پالایی است. به طور کلی، گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری امیدبخش برای پاکسازی محیط زیست مطرح است و با تحقیقات بیشتر می‌توان از پتانسیل کامل آن بهره برد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز نهایت تشکر را دارند.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در این پژوهش هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

References

- Hejazi R, Taheri M, Islami K. Indicating Environmental Costs in Soil Pollution. *Journal of Health Accounting* 2014;3(1): 42-60.
- Valinejad Tabrizi F, Arbaby A, Borna R. Investigating the concentration of heavy metals and soil pollution indicators in west of Tehran. *Natural Ecosystems of Iran* 2023;14(2): 39-53 (in Persian).
- Sistani N, Moeinaddini M, Khorasani N, et al. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iranian Journal of Health and Environment* 2017;10(1).
- Sabeti Mohammadi S, Hamidian AH, Khorasani N, et al. Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons contaminated soil by some fungal species. *Journal of Natural Environment* 2020;73(1): 1-11 (in Persian).
- Mazhari M. A curious look at Article 15 of the Law on Protection of Soil regarding the elimination and remediation of soil pollution sources. *Journal of Plant and Biotechnology of Iran* 2023 18(3): 1-13 (in Persian).
- Havugimana E, Bhople BS, Kumar A, et al. Soil pollution-major sources and types of soil pollutants. *Environmental science and engineering* 2017;11: 53-86.
- Sales da Silva IG, Gomes de Almeida FC, Padilha da Rocha e Silva NM, et al. Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies* 2020;13(18): 4664.
- Shamsoddini A, Esmaceli S. Modelling of Soil Heavy Metal contamination using Machine learning techniques and spectroscopic data. *The Journal of Spatial Planning* 2023;26(4): 139-60 (in Persian).
- Karimipour Fard H. Nematodes as bioindicators of soil pollution with heavy metals. *Land Management Journal* 2018;5(2): 113-24 (in Persian).
- Calderon JL, Kaunda RB, Sinkala T, et al. Phytoremediation and phytoextraction in Sub-Saharan Africa: Addressing economic and social challenges. *Ecotoxicology and environmental safety* 2021;226: 112864.
- Vaezihir A, Qobadian S, Golmohamadi A. The study of oil-contamination groundwater due to Shazand Refinery. *Journal of environmental science and technology* 2020;22(6): 49-59 (in Persian).
- Kristanti RA, Ngu WJ, Yuniarto A, Hadibarata T. Rhizofiltration for removal of inorganic and organic pollutants in groundwater: a review. *Biointerface Res Appl Chem* 2021;11: 12326-47.
- Kaczyńska G, Borowik A, Wyszowska J. Soil dehydrogenases as an indicator of contamination of the environment with petroleum products. *Water, Air, & Soil Pollution* 2015;226: 1-11.
- Nadim F, Hoag GE, Liu S, et al. Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2000;26(1-4): 169-78.
- Besalatpour A, Hajabbasi M, Khoshgoftarmansh A, Afyuni M. Responses of selected plants to petroleum contamination in soils around the Tehran oil refinery. *JWSS-Isfahan University of Technology* 2008;12(44): 13-25 (in Persian).
- Zhichkina L, Nosov V, Zhichkin K, et al., editors. Analysis of anthropogenic contamination of soils by petroleum products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2020: IOP Publishing.
- Bor Muslim YKD. soil pollutants and their cleaning methods. The first national civil engineering conference 2013 (in Persian).
- REZVANI M, NOURMOHAMMADI G, Zafarian F. Cleaning up of contaminated soil, ground water and air by plants. *Journal of Agricultural Sciences* 2005;11(1): 7-25 (in Persian).
- Kensa VM. Bioremediation-an overview. *Journal of Industrial Pollution Control* 2011;27(2): 161-8.
- Sharma S, Pathak H. Basic techniques of phytoremediation. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 2014;5(4): 584-604.
- Adams GO, Fufeyin PT, Okoro SE, Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation* 2015;3(1): 28-39.
- Hosseinniaee S, Mirzaei E. Phytoremediation-Promising Green Technology for Remediation of Heavy Metal Contaminated Lands. *Zist Sepehr Student Magazine* 2022;15(1): 37-44 (in Persian).
- Tonelli FCP, Tonelli FMP, Lemos MS, de Melo Nunes NA. Mechanisms of phytoremediation. *Phytoremediation: Elsevier*; 2022. p. 37-64.
- Li Y, Ma J, Li Y, et al. Nitrogen addition facilitates phytoremediation of PAH-Cd cocontaminated dumpsite soil by altering alfalfa growth and rhizosphere communities. *Science of The Total Environment* 2022;806: 150610.
- Besalatpour A, Hajabbasi M, Khoshgoftarmansh A, Sheikholeslam F. Decision Making Using Genetic Algorithm to Select the Best Plant Genotype for Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soils. *Iranian Journal of Soil Research* 2011;25(1): 61-70 (in Persian).
- Khosravinodeh M, Abbaspour A, Ebrahimi S, Asghari H. Phytoremediation of a fuel oil-contaminated soil using alfalfa and grass with pseudomonas putida bacterium. *Journal of water and soil protection research* 2013;20(2): 219-34 (in Persian).
- Kafle A, Timilsina A, Gautam A, et al. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances* 2022;8: 100203.
- Zeyaulah M, Atif M, Islam B, et al. Bioremediation: A tool for environmental cleaning. *African Journal of Microbiology Research* 2009;3(6): 310-4.
- Koshlaf E, Ball AS. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS microbiology* 2017;3(1): 25.
- Kamare E FM. New plant treatment technology to create a sustainable environment. *Journal of Biosafety* 2012;5(2): 107-21 (in Persian).
- Etim E. Phytoremediation and its mechanisms: a review. *Int J Environ Bioenergy* 2012;2(3): 120-36.
- Moosavi SG, Seghatolaslami MJ. Phytoremediation: a review. *Advance in Agriculture and Biology* 2013;1(1): 5-11.
- NEISI A, Vosoughi M, Mohammadi M, et al. Phytoremediation of by Helianthus plant. *Journal of Torbat Heydariyeh University of Medical Sciences* 2014;2(2): 55-65 (in Persian).

34. Robinson B, Anderson C, Dickinson N. Phytoextraction: where's the action? *Journal of Geochemical Exploration* 2015;151: 34-40.
35. Shackira A, Puthur JT. Phytostabilization of heavy metals: understanding of principles and practices. *Plant-metal interactions* 2019: 263-82.
36. Limmer M, Burken J. Phytovolatilization of organic contaminants. *Environmental Science & Technology* 2016;50(13): 6632-43.
37. Breton-Deval L, Guevara-García A, Juárez K, et al. Role of rhizosphere microbiome during phytoremediation of heavy metals. *Microbial biodegradation and bioremediation: Elsevier*; 2022. p. 263-91.
38. Brereton N, Gonzalez E, Desjardins D, et al. Co-cropping with three phytoremediation crops influences rhizosphere microbiome community in contaminated soil. *Science of the Total Environment* 2020;711: 135067.
39. Agarwal P, Giri BS, Rani R. Unravelling the role of rhizospheric plant-microbe synergy in phytoremediation: a genomic perspective. *Current Genomics* 2020;21(5): 334-42.
40. Chatterjee S, Mitra A, Datta S, Veer V. Phytoremediation protocols: an overview. *Plant-based remediation processes* 2013: 1-18.
41. Banerjee A, Roychoudhury A. Rhizofiltration of combined arsenic-fluoride or lead-fluoride polluted water using common aquatic plants and use of the 'clean' water for alleviating combined xenobiotic toxicity in a sensitive rice variety. *Environmental Pollution* 2022;304: 119128.
42. Ali H, Khan E, Sajad MA. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere* 2013;91(7): 869-81.
43. Mohsenzadeh S, Keshtvarz M, Mohsenzadeh M, et al. Treatment of contaminated soil to petroleum hydrocarbons with Vetiver phytoremediation. *Journal of Environmental Science Studies* 2023;8(1): 6084-91 (in press).
44. Hoseini SG, Rahimnejad M, Sadighzadeh A, Zokhtareh R. Evaluation of Wheat and Sunflower Plants Efficiency in Phytoremediation of Radium Contaminated Soils. *Journal of Environmental Science Studies* 2021;6(1): 3452-8 (in press).
45. Salehi A, Matiniazadeh M. Effect of symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation processes in the soils contaminated with heavy metals. *Iranian Journal of Biology* 2020;1(1): 57-66 (in Persian).
46. Ghosh M, Singh S. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ* 2005;6(4): 18.
47. Pivetz BE. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development ...; 2001.
48. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2016;32: 1-18.
49. GH H. Bioremediation is a way to clean the soil and water environment. *Ecology* 2016;20: 86 - 92 (in Persian).
50. Sharma J. Advantages and limitations of in situ methods of bioremediation. *Recent Adv Biol Med* 2019;5(2019): 10941.