JEHE Alborz University of Medical Sciences Journal of Environmental Health Engineering , 2025; 13(1):65-81 Systematic Review Article

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

Received: 19 December 2024, Accepted: 27 January 2025

Gholam Hossain Safari[1], Samira Bahrami Valeh[2] , Mohammad Darvishmotevalli[3, 4], Hossein faraji[5], 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:

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

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Alborz University of Medical Sciences
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).Non-commercial uses of the work are permitted,provided the original work is properly cited.

JEHE
مجله مهندسی بهداشت محیط، دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صفحات ۶۵ تا ۸۱
Alborz University of Medical Sciences
مقاله مرور ساختار یافته

بررسی جامع مکانیسم‌های گیاه‌پالایی برای حذف آلاینده‌های مختلف از خاک

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

غلامحسین صفری[۱]، سمیرا بهرامی واله[۲]، محمد درویش متولی[۳،۴]، حسین فرجی[۵] اکبر اسکندری[۱*]

[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 بیماری های واگیر و گرمسیری، دانشگاه علوم پزشکی ایرانشهر، ایرانشهر، ایران

***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:

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 آلاینده های 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 ، soil contamination، Heavy metals in soil و معادل فارسی مربوطه درسایت‌های معتبر PubMed، Scopus، Web of Science، Google Scholar، Magiran و SID بود.

یافته ها: 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 مکانیسم های 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.

نتیجه گیری: ی 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 تجمع کننده 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.

واژه های کلیدی: گیاه‌پالایی، آلودگی خاک، فلزات سنگین، زیست‌پالایی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

مقدمه

خاک بستری است که بقای میلیون‌ها انسان بدان وابسته است و از دیدگاه جهانی، خاک سومین جزء عمده محیط زیست تلقی می‌شود [1] 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 [2] به عنوان نمونه مقادیر بالای فلزات سنگین [1]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 [3].

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 [1]. 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 [4]. 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 [5].

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 [6] 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 [7]. دریک 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 [7]

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

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

آلاینده‌های اصلی خاک شامل فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن[1] 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 [8] 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 ایاالت متحده آمریکا[2] 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 [8-10]. 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 [8 9].

۲) گروه آلاینده‌های بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن: از میان آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های نفتی از مهمترین آلاینده‌ها آلی محیط زیست هستند که بدلیل سمی بودن[3]، سرطان‌زای[4] و ایجاد تغییرات موتاژنتیکی[5] (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 زایلن است [11] . 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 می تواند به دلیل انباشتگی و فرآیند بزرگنمایی زیستی افزایش یابد و اثر سمی BTEX هنگامی که مقدار زیادی از BTEX در موجودات انباشته شود، ارگانیسم ها را از بین می‌برد [12].

۳) آلاینده‌های نفتی خاک: فرآورده‌های نفتی باعث ویرانی بزرگی در اکوسیستم‌های خاک و آب می‌شود [13]. شایع‌ترین مسیر آلودگی خاک و آب های زیرزمینی نشتی مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی است که توسط پمپ بنزین-ها، مجتمع‌های تجاری، صنعتی و مسکونی استفاده می-شود [14] 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 [15] 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 [14] 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 [16].

1.Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene
2.United States Environmental Protection Agency
3.toxic
4.Carcinogenic
5. Mutagenetic changes

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

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 شکل۱، از چک لیست پریزما [1] برای بررسی‌های سیستماتیک استفاده شد. برای شناسایی مطالعات مرتبط، جست‌وجو مقالات از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با کلید واژه‌های انگلیسی Phytoremediation، bioremediation، soil، contamination، Heavy metals in soil و معادل فارسی مربوطه درسایت‌های معتبر PubMed، Scopus، Web of Science، Google Scholar، 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 وخروج 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[2] و ثانیا، آلودگی خاک و روش‌های حذف آلاینده‌های مختلف از خاک با مکانسیم‌های گیاه-پالایی بودند. معیارهای انتخاب مقالات در دسترس‌بودن، توجه به مکانسیم‌ها و فرایندهای گیاه‌پالایی برای آلاینده-های اصلی خاک شامل فلزات سنگین، گروه آلاینده‌های

1.PRISMA
1.Phytoremediation

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

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.

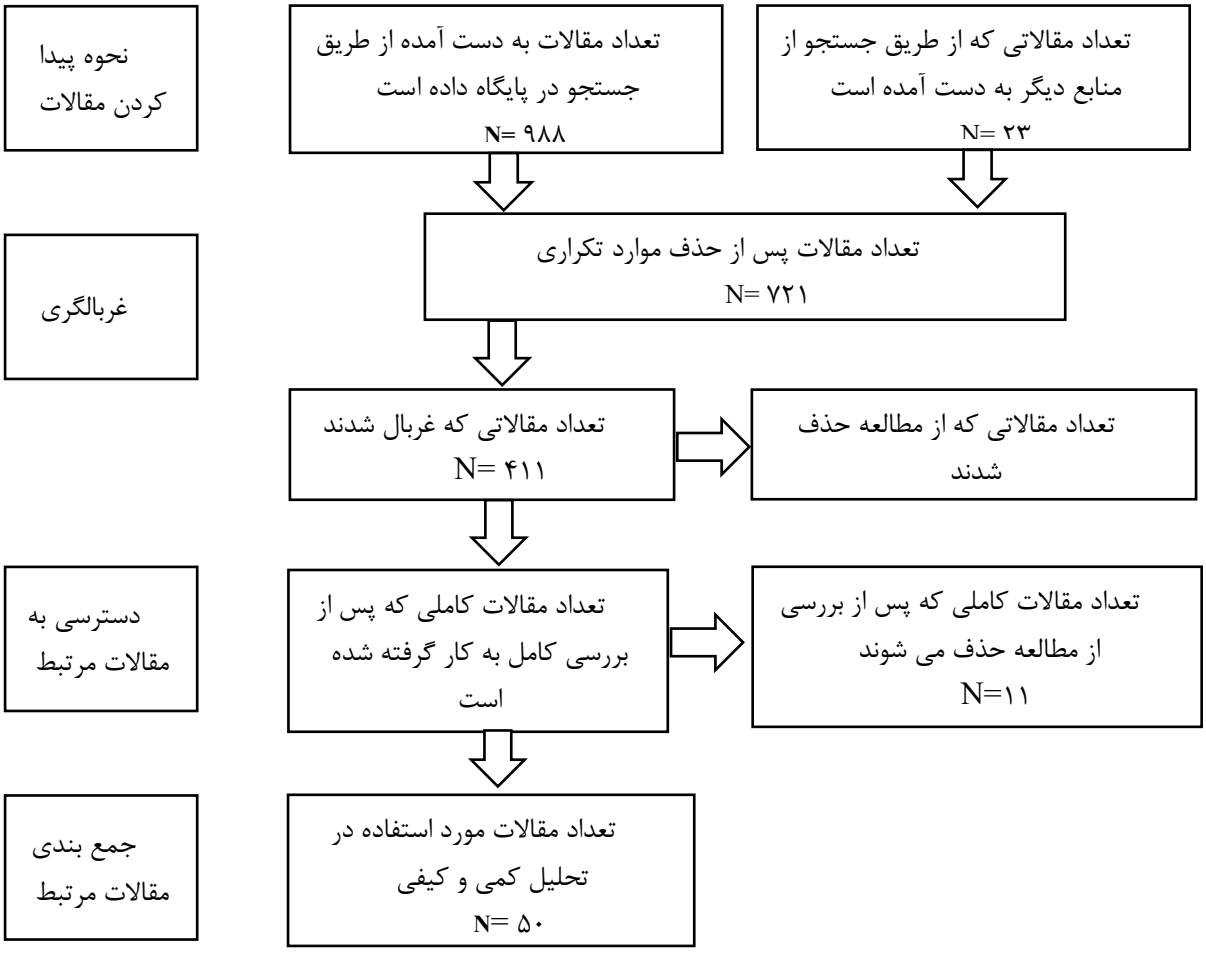
استخراج داده‌ها:

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

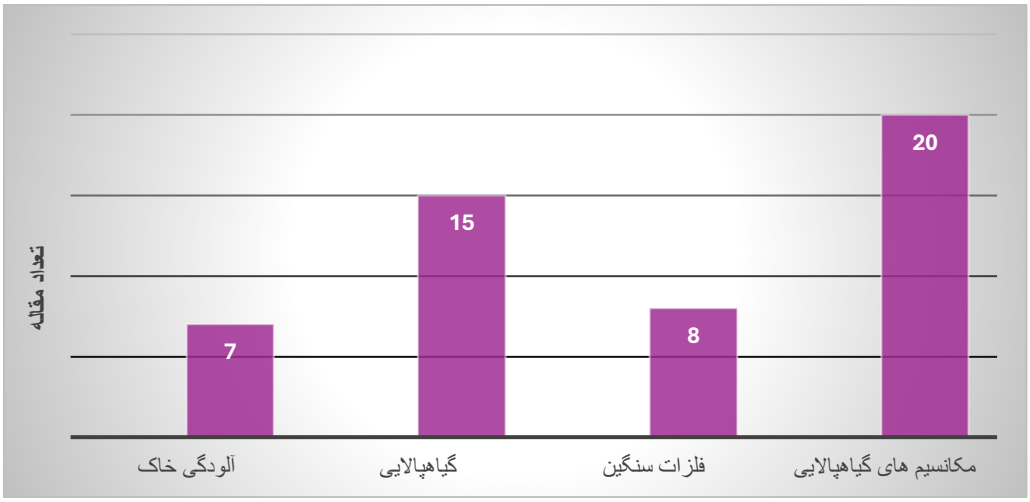
یافته‌ها

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 گیاه پالایی 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 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.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]



نمودار ۱. جریان پریزما برای گنجاندن مقالات مرتبط



نمودار ۲. مطالعات انتخاب شده براساس موضوع

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

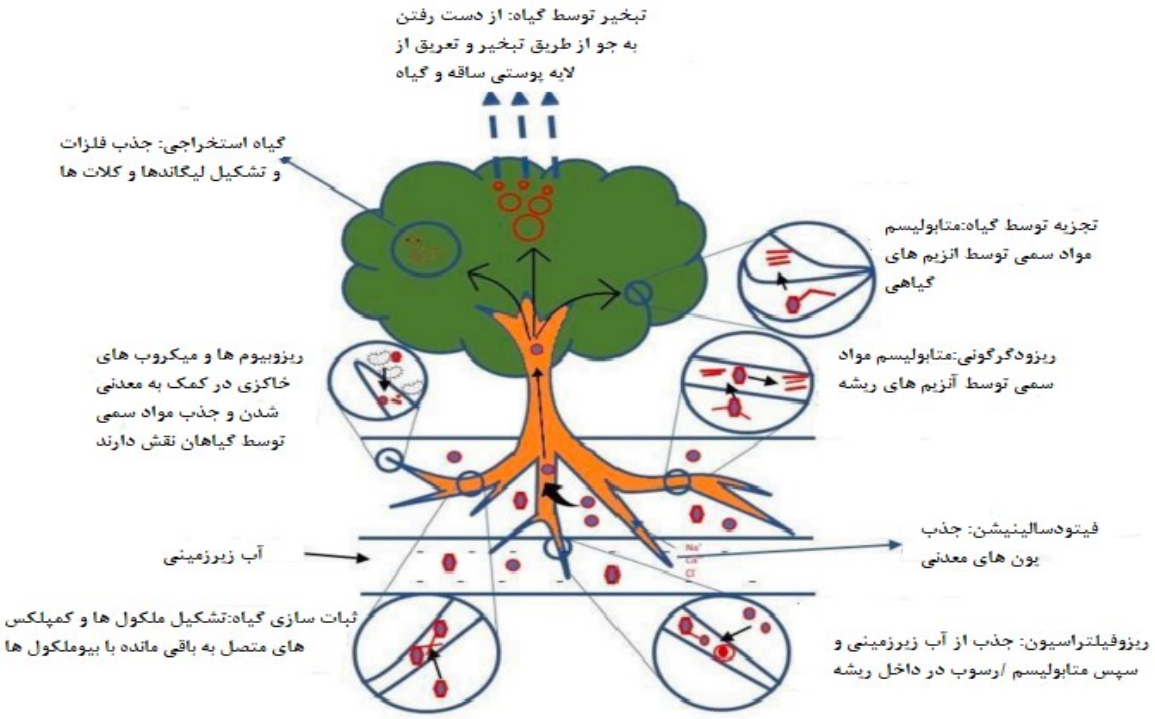
به طور کلی روش‌های پاک سازی خاک‌های آلوده فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، تجزیه گرمایی، تثبیت خاک و زیستی است [17] هزینه‌های گزاف برخی از این روش‌های مانند فرایندهای فیزیکی، شیمیایی سبب شده تا تلاش در جهت دستیابی به روش‌های ارزانتری انجام گردد و بدین ترتیب از منابع بیولوژیک محیط زیست جهت پاکسازی نقاط آلوده به انواع آلاینده‌ها کمک گرفته شد، از جمله این روش‌ها زیست‌پالایی[1] است. استفاده از برخی گیاهان و میکروارگانیزم‌هایی که سبب کاهش آلودگی محیط زیست و تجزیه آلاینده های محیطی به اشکال کمتر سمی می‌شود به زیست پالایی معروف است [19،18] طبق تعریف عملیاتی، زیست پالایی 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 واکنش ها تبدیل می شوند که به عنوان بخشی از فرآیندهای متابولیک آنها انجام می‌شود [20].

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 [21]. زیست پالایی که یک روش جدید، مقرون به صرفه، کارآمد، سازگار با محیط زیست، قابل اجرا در محل و با استراتژی خورشید محور است [22،23] که به طور گسترده در خاک های مختلف آلوده برای حذف، تجزیه، جذب، متابولیسم یا سم زدایی فلزات و آلاینده های آلی استفاده شده است [24] 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 [18].

بعضی از گیاهان می‌توانند به طور کامل و یا جزیی مواد آلاینده موجود در خاک، لجن، رسوبات، آب‌های زیرزمینی و سطحی و هوا را در خود جمع کنند، که این فرآیند انباشت گیاهی یا گیاه پالایی[2] گویند [18]. گیاه‌پالایی در واقع یک فناوری نسبتاً نوین پالایش خاک مناسب جهت‌های 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 [25]. در گیاه‌پالایی، گیاهان معمولاً آلاینده‌ها را جذب، اندوخته و یا متصاعد می‌کنند [26] 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، Botano – remediation، Agroremediation و Vegetative remediationنیز می‌گویند [18] در شکل ۱ انواع فرایند و مکانیسم‌های گیاه‌پالایی نشان داده شد است.

1.Bioremediation
2.Phytoremediation

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]



شکل ۱. فرایند و مکانیسم‌های گیاه پالایی [۲۷]

الزامات زیست محیطی بر گیاه‌پالایی: رشد و فعالیت میکروبی به راحتی تحت تأثیر pH، دما و رطوبت قرار می‌گیرد. اگرچه میکروارگانیسم‌ها در شرایط شدید نیز جدا شده‌اند، 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 واکنش‌های بیوشیمیایی تأثیر می‌گذارد و سرعت بسیاری از آنها به ازای هر ۱۰ درجه سانتی گراد افزایش دما دو برابر می‌شود. با این حال، بالاتر از یک دمای معین، سلول‌ها می‌میرند 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 گیاه‌پالایی: کربن اساسی‌ترین عنصر اشکال زنده است و به مقدار بیشتری نسبت به سایر عناصر مورد نیاز است. علاوه بر هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن، حدود ۹۵ درصد وزن سلول‌ها را تشکیل می‌دهد. 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 میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های آلوده وجود دارند، اما لزوماً نمی‌توانند 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 میکروارگانیسم‌های بومی است. این مواد مغذی بلوک‌های اساسی زندگی هستند و به میکروب‌ها اجازه می‌دهند تا آنزیم‌های لازم را برای تجزیه آلاینده ها ایجاد کنند [۲۸]. در جدول شماره ۲ پارامترها و شرایط محیطی برای فعالیت میکروبی نشان داده شده است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

جدول ۲. پارامترها و شرایط محیطی فعالیت میکروبی [۱۹]

پارامتر	شرایط لازم برای فعالیت میکروبی	ارزش بهینه برای تجزیه روغن
رطوبت خاک	۲۸-۲۵ درصد ظرفیت نگهداری آب	٪ ۹۰-۳۰
pH خاک	۵/۸-۵/۸	۶/۸-۵
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	۳۰-۲۰
آلاینده‌ها	خیلی سمی نباشد	هیدروکربن ۵-۱۰ درصد وزن خشک خاک
فلزات سنگین	محتوای کل ppm ۲۰۰۰	ppm ۷۰۰۰
نوع خاک	مقدار کم رس یا سیلت	

بحث

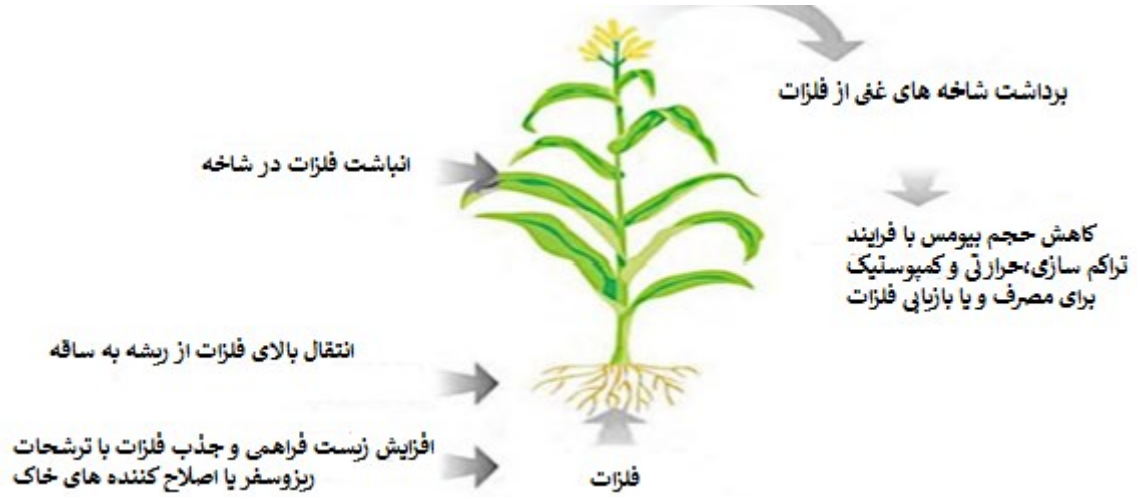
مطابق مطالعات انجام شده مکانیسم‌های مختلفی در گیاه‌پالایی نقش دارند. گیاه پالایی بسته به نوع آلاینده، از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله تجزیه زیستی، تبخیر، فیلتراسیون و غیره رخ می دهد [۲۹] که در زیر به شرح هر یک از مکانیسم‌های گیاه پالایی پرداخته شده است:

- کنترل هیدرولیک[1]: 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]. پروژه‌های گیاه‌پالایی با استفاده از کنترل هیدرولیکی معمولاً از درختان و گیاهان فراتوفیتی[2]استفاده می‌کنند که توانایی تعرق حجم زیادی از آب را دارند و در نتیجه تعادل آب موجود را تحت تأثیر قرار می دهند [۳۱].
- تجزیه توسط گیاهی[3]: تجزیه مواد آلاینده توسط فرایندهای متابولیکی گیاه و یا تجزیه مترادف با تغییر شکل توسط گیاه و در اثر ترشح ترکیبات گیاه مانند آنزیم‌ها است [۳۰].
- گیاه استخراجی[4] : 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 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

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

ب) Phytoextraction متمادی و پیوسته، در این روش برداشت فلزات وابسته به توانایی طبیعی گیاه برای ترمیم می‌باشد [۳۳].



شکل ۲. فرایند فیتواکستراکشن[۱] [۲۲]

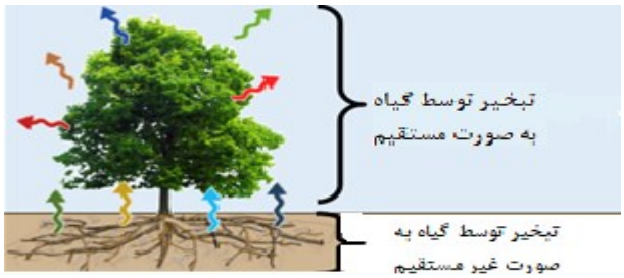
- گیاه تثبیتی[۲] : تثبیت گیاهی فلزات سنگین با استفاده از گیاهان سبز امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است زیرا روشی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهد و علاوه بر این از نظر زیبایی شناختی نیز خوشایند است [۳۵]. تثبیت گیاهی که به آن غیرفعال سازی در محل گفته می‌شود، در درجه اول برای اصلاح خاک، رسوبات و لجن‌ها استفاده می شود [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 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 Cd، Cu، As، Zn و Cr است. [۳۲، ۳۳].

1.Phytoextraction
2.Phytostabilization

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

شکل ۳. فرایند گیاه تثبیتی [۲۲]

- تبخیر توسط گیاه[1]: اشاره به جذب و انتقال عناصر آلاینده و یا تغییر ترکیبات و سپس رها کردن در اتمسفردارد [۳۰]. تبخیر شدن گیاهی به طور گسترده برای تعدادی از آلاینده‌ها آلی و هم غیر آلی مشاهده شده است و در این روش به طور کلی برای اغلب آلاینده رقیق شدن قابل توجه و فروپاشی فتوشیمیایی در جو اتفاق می‌افتد [۳۶].



شکل ۴. تبخیرتوسط گیاه[2] [۳۶]

- تجزیه توسط ریزوسفر[3] : 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 اولا گیاهان دارای فعل و انفعالات خارجی با میکروارگانیسم‌های آزاد در خاک (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].

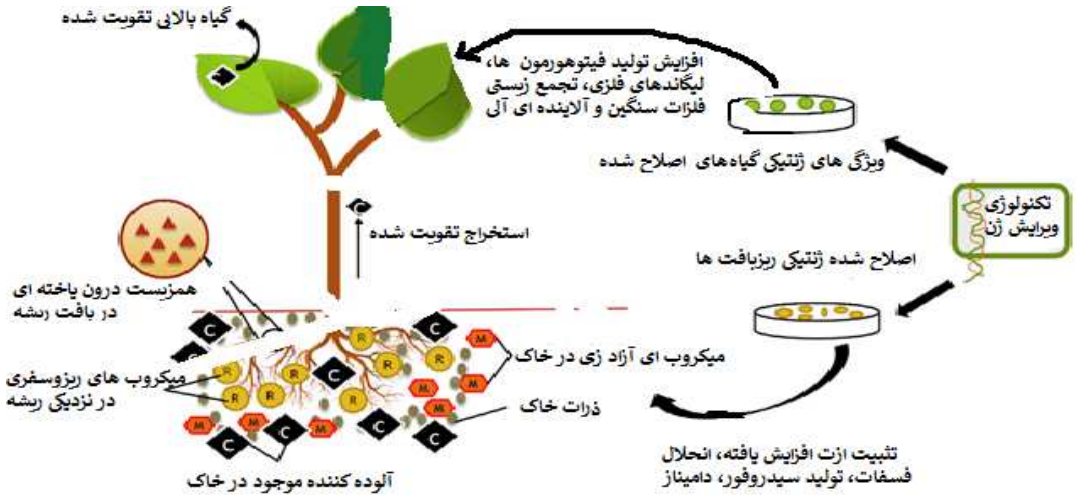
1.Phytovolatilization

2.Phytovolatilization

3.degradation-Rhizo

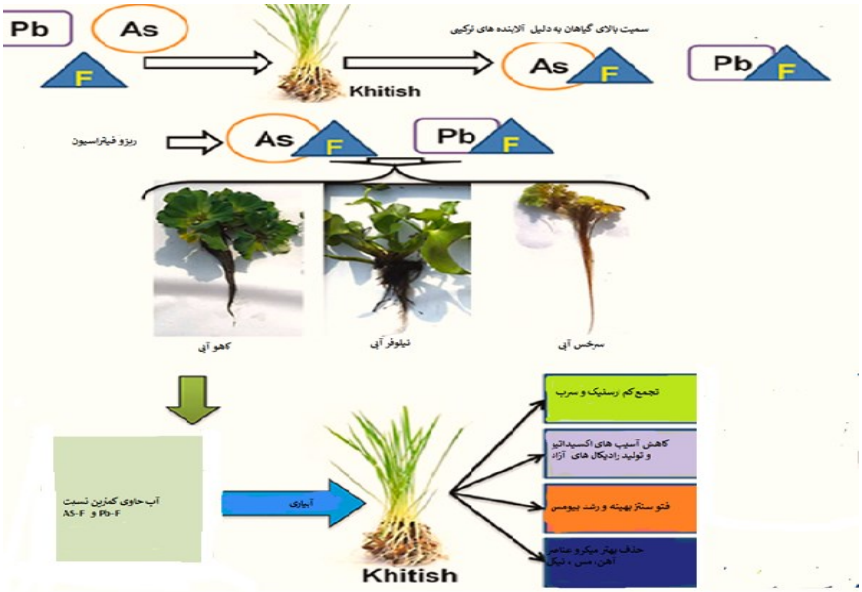
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

- طبق مطالعات چمن‌های بیش از حد انباشته توانایی جذب مقادیر غیرمعمول 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[۱] [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[۳] [۴۱]

1.degradation-Rhizo

2.Rhizofilteration

3.Rhizofilteration

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

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 مایکوریز 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 گیاه پالایی 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، ۴۸-۵۰].

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

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

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 می کنند که در این پژوهش هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

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 نموده اند.

مشارکت نویسندگان

نگارش و ایده مقاله: غلامحسین صفری، اکبر اسکندری

جمع آوری مقالات: سمیرا بهرامی‌واله، حسین فرجی

بازبینی متن مقاله: محمد درویش متولی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

References

1. Hejazi R, Taheri M, Islami K. Indicating Environmental Costs in Soil Pollution. Journal of Health Accounting 2014;3(1): 42-60.
2. 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).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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.
7. 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.
8. Shamsoddini A, Esmaeili 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 persion).
9. Karimipour Fard H. Nematodes asbioindicators of soil pollutionwith heavy metals. Land Management Journal 2018;5(2): 113-24 (in Persian).
10. 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.
11. 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 pertion).
12. 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.
13. Kaczyńska G, Borowik A, Wyszkowska J. Soil dehydrogenases as an indicator of contamination of the environment with petroleum products. Water, Air, & Soil Pollution 2015;226: 1-11.
14. 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.
15. Besalatpour A, Hajabbasi M, Khoshgoftarmanesh 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 persion).
16. 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.
17. Bor Muslim YKD. soil pollutants and their cleaning methods. The first national civil engineering conference2013 (in Persian).
18. 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).
19. Kensa VM. Bioremediation-an overview. Journal of Industrial Pollution Control 2011;27(2): 161-8.
20. Sharma S, Pathak H. Basic techniques of phytoremediation. International Journal of Scientific & Engineering Research 2014;5(4): 584-604.
21. Adams GO, Fufeyin PT, Okoro SE, Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmention: a review. International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation 2015;3(1): 28-39.
22. 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).
23. Tonelli FCP, Tonelli FMP, Lemos MS, de Melo Nunes NA. Mechanisms of phytoremediation. Phytoremediation: Elsevier; 2022. p. 37-64.
24. 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.
25. Besalatpour A, Hajabbasi M, Khoshgoftarmanesh 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).
26. 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 persion).
27. Kafle A, Timilsina A, Gautam A, et al. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. Environmental Advances 2022;8: 100203.
28. Zeyaullah M, Atif M, Islam B, et al. Bioremediation: A tool for environmental cleaning. African Journal of Microbiology Research 2009;3(6): 310-4.
29. Koshlaf E, Ball AS. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. AIMS microbiology 2017;3(1): 25.
30. Kamare E FM. New plant treatment technology to create a sustainable environment. Journal of Biosafety 2012;5(2): 107-21 (In pertion).
31. Etim E. Phytoremediation and its mechanisms: a review. Int J Environ Bioenergy 2012;2(3): 120-36.
32. Moosavi SG, Seghatoleslami MJ. Phytoremediation: a review. Advance in Agriculture and Biology 2013;1(1): 5-11.
33. 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 persion).

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]

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, Juarez 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 pertion(
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 persion).
45. Salehi A, Matinizadeh 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 pertion).
50. Sharma J. Advantages and limitations of in situ methods of bioremediation. Recent Adv Biol Med 2019;5(2019): 10941.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-07-16]