

Novel Bioremediation Strategies: Enhancing Polluted Soil and Protecting the Environment through Omics Technologies and Microbial Approaches

Nayer Azam Khoshkholghsima^{*1}, Fatemeh Loni², Mohammad Reza Ghaffari³

1. Corresponding Author, Department of Systems and Synthetic Biology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: ksima@abrii.ac.ir
2. Department of Systems Biology, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Karaj, Iran. E-mail: fatemeloni95@gmail.com
3. Department of Systems Biology, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Karaj, Iran. E-mail: ghaffari@abrii.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Review Article	Bioremediation is a crucial strategy in combating environmental pollution, particularly in soil. The escalation of industrial and agricultural activities, coupled with the introduction of non-degradable and toxic pollutants, has exacerbated soil contamination. Heavy metals, such as lead and zinc, resistant to degradation over time, potentially accumulating in the food chain and posing persistent threats to both the environment and human health. Similarly, chemical compounds like herbicides and insecticides present challenges due to their prolonged stability and persistence. Although various chemical and physical methods exist for soil remediation, the biological approach gains more attention due to its sustainability and minimal impact on native ecosystems. Bioremediation leverages natural organisms to transform hazardous substances into less harmful forms. Microorganisms play a pivotal role in this process. Furthermore, plants can enhance bioremediation efficiency through symbiotic relationships with bacteria, accelerating the degradation of pollutants and accelerating soil productivity restoration. The use of native plants and microorganisms, especially in countries with high biodiversity such as Iran, is an important step towards the sustainable use of this technology. Native plants and microorganisms have the ability to make better use of environmental conditions and are most efficient with minimal environmental changes. Recent advancements in 'omics' technologies, such as genomics, proteomics, and metabolomics, have opened new avenues for the exploration and application of bioremediation techniques. These advance technologies enable molecular-level studies of organisms by generating big data to identify the most effective microorganisms for specific pollutants. Bioremediation can be applied in two primary ways: in situ or ex situ. In-situ bioremediation addresses contaminated soil directly on-site, whereas ex-situ bioremediation involves the removal of contaminated soil to another location for remediation. Each approach has its advantages and limitations, necessitating careful consideration prior to implementation. The integration of phytoremediation and microbial bioremediation methods can enhance efficiency and reduce costs, making the process economically viable. This study aims to serve as a comprehensive guide to understanding the diverse methodologies in bioremediation. Furthermore, it proposes sustainable and effective strategies to transform non-arable polluted lands into arable areas, offering
Article history: Received: 11.05.2023 Revised: 03.03.2024 Accepted: 04.30.2024	
Keywords: Bioremediation, Contaminated soil, Environment, Microorganisms, Omics	

environmental and economic benefits for future land reuse. Finally, what is ahead of bioremediation is turning bioremediation into a central tool in sustainable development. In addition, from the decomposition of industrial pollutants to the restoration of damaged natural environments, bioremediation can play an important role in providing a better and healthier life for future generations. This multifaceted and expandable approach can be one of the keys to success in sustainable environmental management in the 21st century.

Cite this article: Khoshkholghsima, Nayer Azam, Loni, Fatemeh, Ghaffari, Mohammad Reza. 2024. Novel Bioremediation Strategies: Enhancing Polluted Soil and Protecting the Environment through Omics Technologies and Microbial Approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 33-55.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/jwsc.2024.21889.3692](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21889.3692)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

استراتژی‌های نوین زیست‌پالایی: بهبود خاک آلوده و حفاظت از محیط زیست از طریق فناوری‌های اومیکس و روش‌های میکروبی

نیر اعظم خوش‌خلق سیمما*^۱، فاطمه لونی^۲، محمدرضا غفاری^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه فیزیولوژی ملکولی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
رایانامه: ksima@abrii.ac.ir
۲. گروه زیست‌شناسی سیستم‌ها، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
رایانامه: fatemeloni95@gmail.com
۳. گروه زیست‌شناسی سیستم‌ها، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
رایانامه: ghaffari@abrii.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	زیست‌پالایی به عنوان یک استراتژی حیاتی در مبارزه با آلودگی محیطی، به ویژه خاک می‌باشد. افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و ورود آلاینده‌های دیرتخریب‌پذیر و سمی آلودگی‌های خاک را تشدید کرده است. فلزات سنگین مثل سرب و روی با گذشت زمان تجزیه نشده و می‌توانند در زنجیره غذایی تجمع یافته و یک خطر پایدار برای محیط و سلامت انسان‌ها ایجاد کنند. علاوه بر این ترکیبات شیمیایی مانند علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها، به دلیل پایداری و دوام بالا مشکل مشابهی ایجاد می‌کنند. در حالی‌که روش‌های شیمیایی و فیزیکی مختلفی برای بهبود خاک وجود دارند، رویکرد زیستی به دلیل پایداری بالا و اثر تخریبی پایین به اکوسیستم‌های بومی بیش‌تر مورد توجه می‌باشند. زیست‌پالایی به استفاده از موجودات طبیعی برای تجزیه مواد خطرناک به شکل‌های کم‌خطرتر می‌پردازد. میکروارگانیسم‌ها نقش اساسی در زیست‌پالایی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، گیاهان می‌توانند با همزیستی با باکتری‌ها کارایی فرایند زیست‌پالایی را بهبود بخشیده و با تجزیه سریع‌تر آلاینده‌ها مدت زمان مورد نیاز برای بازیابی بهره‌وری خاک را کاهش می‌دهد. استفاده از گیاهان و میکروارگانیسم‌های بومی، به‌خصوص در کشورهای با تنوع زیستی بالا چون ایران، یک گام مهم در جهت استفاده پایدار از این فناوری است. گیاهان و میکروارگانیسم‌های بومی توانایی استفاده بهتر از شرایط محیطی را دارند و با کم‌ترین تغییرات محیطی، بیش‌ترین کارایی را دارا می‌باشند. در حال حاضر پیشرفت‌های فناوری‌های "اومیکس" مانند ژنومیکس، پروتئومیکس، و متابولومیکس، مسیرهای جدیدی را برای مطالعه و استفاده از تکنیک‌های زیست‌پالایی فراهم کرده است. این
تاریخ دریافت: ۱۴/۰۸/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۳/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۱/۰۲/۰۳	
واژه‌های کلیدی: اومیکس، خاک آلوده، زیست‌پالایی، محیط زیست، میکروارگانیسم‌ها	

تکنولوژی‌های پیشرفته امکان مطالعه ارگانسیم‌ها را در سطح مولکولی با تولید کلان داده برای شناسایی مؤثرترین ریزجانداران‌ها برای انواع خاصی از آلاینده‌ها فراهم می‌کند. بر اساس نوع و میزان آلودگی، زیست‌پالایی می‌تواند به دو صورت در محل (in-situ) یا خارج از محل (ex-situ) اجرا شود. زیست‌پالایی در محل، خاک آلوده را در محل بهبود می‌دهد، در حالی که زیست‌پالایی خارج از محل شامل حذف خاک آلوده و بهبود وضعیت آن در مکان دیگری می‌شود. هر دو روش دارای مزایا و محدودیت‌هایی است که قبل از اجرا باید با دقت ارزیابی شوند. با این حال، استفاده از ترکیب روش‌های گیاه‌پالایی و زیست‌پالایی میکروبی کارایی را افزایش داده و با کاهش هزینه‌ها سبب می‌شود که کل فرآیند از نظر اقتصادی به راحتی قابل اجرا باشد. این مطالعه با هدف ارائه یک منبع جامع طراحی شده است تا به درک بهتری از روش‌های مختلف در زیست‌پالایی کمک کند. علاوه بر این راهبردهای پایدار و مؤثر برای تبدیل زمین‌های آلوده غیرقابل کشت به مناطق قابل کشت پیشنهاد می‌کند و مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی را برای استفاده مجدد از این زمین‌ها در آینده ارائه می‌دهد. در نهایت آنچه پیش روی زیست‌پالایی است، تبدیل زیست‌پالایی به یک ابزار محوری در توسعه پایدار می‌باشد. علاوه بر این، از تجزیه آلاینده‌های صنعتی گرفته تا احیای محیط‌های طبیعی آسیب‌دیده، زیست‌پالایی می‌تواند در تأمین یک زندگی بهتر و سالم‌تر برای نسل‌های آتی نقش مهمی ایفا کند. این رویکرد چندوجهی و توسعه‌پذیر می‌تواند یکی از کلیدهای موفقیت در مدیریت محیط زیست پایدار در قرن بیست و یکم باشد.

استناد: خوش‌خلق‌سیما، نیر اعظم، لونی، فاطمه، غفاری، محمدرضا (۱۴۰۳). استراتژی‌های نوین زیست‌پالایی: بهبود خاک آلوده و حفاظت از محیط زیست از طریق فناوری‌های اومیکس و روش‌های میکروبی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۲)، ۵۵-۳۳.

DOI: [10.22069/jwsc.2024.21889.3692](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21889.3692)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

محیط زیست از اجزای مختلفی مانند آب، هوا و خاک تشکیل شده و حیات موجودات زنده از جمله انسان‌ها، حیوانات، گیاهان و باکتری‌ها وابسته به استفاده درست از این منابع است (۱). خاک یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین منابع طبیعی و غیرقابل تجدید به‌شمار می‌رود و بدون آن حیات جوامع بشری بر روی زمین امکان‌پذیر نخواهد بود. با افزایش جمعیت و صنعتی شدن جوامع به‌منظور تامین غذا و انرژی هر ساله مقادیر زیادی از ترکیبات آلی و معدنی در نتیجه فعالیت‌های نادرست انسانی در محیط زیست منتشر می‌شود. فلزات سنگین از جمله روی، مس، کادمیوم، کروم و آرسنیک به‌طور گسترده در کشاورزی و صنعت استفاده می‌شود. این ترکیبات حتی در غلظت‌های پایین نیز برای انسان سمی می‌باشند (۲ و ۳).

براساس اعلام اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۸، دو و نیم میلیون ناحیه آلوده به فلزات سنگین و نیازمند به پاکسازی وجود داشت که حدود ۲۳۵ هزار تا ۳۵۵ هزار ناحیه آلوده در آمریکا و ۱۶/۱ درصد اراضی آلوده در چین می‌باشد (۴). سازمان حفاظت محیط زیست ایران لیستی از میزان آلودگی خاک‌های ایران براساس استانداردهای جهانی منتشر کرده، که در آن میزان آلودگی خاک به کادمیوم در شاهرود بسیار بالا گزارش شده است. همچنین میزان غلظت آنتیموان و آرسنیک در استان همدان، آرسنیک در قروه و بیجار در کردستان و کروم و مس در بیرجند خراسان جنوبی بسیار بالا گزارش شده است (۵). کشاورزی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین نامطلوب بوده زیرا محصولات پس از برداشت به‌علت دارا بودن سطوح بالای ترکیبات سمی غیرقابل استفاده می‌باشند (۶). جذب آلاینده‌ها و به‌ویژه فلزات سنگین توسط گیاهان موجب قرارگیری آن‌ها در زنجیره غذایی انسان و دام

شده که این امر می‌تواند با کاهش سطح سلامت اجتماعی، هزینه‌های اقتصادی سنگینی را بر کشورها تحمیل کند (۷).

بنابراین، پاک‌سازی خاک‌های آلوده امری ضروری است. برای از بین بردن آلودگی‌ها با در نظر گرفتن ماهیت آن‌ها از روش‌های مختلفی مانند پاکسازی فیزیکی استفاده می‌شود که شامل: استخراج توسط بخار^۱، سوزاندن^۲، جامدسازی^۳، دفع حرارتی^۴ شست و شوی خاک^۵ و تجزیه آنزیمی^۶ است. استفاده از این روش‌ها بسیار گران‌قیمت است (۸) و باعث از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی می‌شوند و تصویر ناخوشایندی پس از عملیات به‌ورزی خاک از طبیعت به جا می‌ماند. بنابراین استفاده از پالایش زیستی به‌دلیل ارزان و سازگار با محیط زیست بودن و همچنین استفاده از توانایی طبیعی میکروارگانیسم‌های موجود در خاک برای کاهش آلودگی خاک در دهه اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌است (۹). با توجه به شرایط محیطی، نوع آلودگی و میکروارگانیسم‌های موجود، زیست‌پالایی در انواع مختلفی از جمله پخش زیستی^۷، تحریک زیستی^۸، تجمع زیستی^۹، تهویه زیستی^{۱۰}، تضعیف طبیعی^{۱۱} و گیاه‌پالایی انجام می‌شود (۱۰).

در کنار بسیاری از میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌ها نیز قابلیت تجزیه ترکیبات هیدروکربنی و استفاده کربن موجود در این ترکیبات را دارند. آرکی‌باکتری‌ها^{۱۲} در

- 1- Vapor extraction
- 2- Incineration
- 3- Solidification
- 4- Thermal desorption
- 5- Soil leaching
- 6- Enzymatic degradation
- 7- Biosparging
- 8- Biostimulation
- 9- Bioaugmentation
- 10- Bioventing
- 11- Natural attention
- 12- Archaea

کنار باکتری‌های دیگر در زیست‌پالایی نقش مؤثری ایفا می‌نمایند. علاوه بر این، ریزجانداران در حذف ضایعات صنعتی، اسیدی و شور شدن خاک کاربرد دارند. هم‌چنین ریزجانداران با فعالیت آنزیمی به تجزیه زیستی و تبدیل آن‌ها به ترکیبات کم‌خطرتر نقش دارند. به‌طور مثال قارچ *آسپرژیلوس سیدوی*^۱ قادر به حذف ترکیبات باقی‌مانده از سموم ارگانوفسفاته‌مانند: کلرپیریفوس^۲ و متیل پاراتیون^۳ است (۱۱). امروزه استفاده از مهندسی ژنتیک در زیست‌پالایی مورد توجه پژوهش‌گران بسیاری قرار گرفته‌است، در مطالعه‌ای به منظور حذف اثرات سمی فلزات سنگین از خاک، پروتوپلاست جدا شده از *براسیکا جونسیا*^۴ به گیاه *نیکوتینا سرولسان*^۵ منتقل شد، به طوری که گیاه هیبرید حاصل دارای خاصیت جذب بیش‌تر فلزات سنگینی مانند روی و نیکل است. در پژوهشی دیگر گیاه *پاپولوس دلتوئیدس*^۶ از طریق مهندسی ژنتیک و انتقال نو ترکیبی به‌وسیله ای. کولای^۷، ژن مر آ^۸ که باعث تبدیل جیوه دوبار مثبت^۹ به جیوه یک بار مثبت^{۱۰} و ژن مر ب^{۱۱} که باعث تبدیل جیوه یکبار مثبت به جیوه دوبار مثبت می‌شود، برای تحمل بیش‌تر در برابر آلودگی و کاهش سمیت فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته است (۱۲).

ریزجانداران نقش مهمی در تخریب و سم‌زدایی آلاینده‌های آلی و معدنی حاصل از پساب‌های صنعتی دارند. با این حال، گاهی میکروارگانیسم‌های موجود در خاک قدرت کافی برای از بین بردن آلودگی را ندارند.

- 1- *Aspergillus sydowii*
- 2- Chlorpyrifos
- 3- Methyl parathion
- 4- *Brassica juncea*
- 5- *N. Caerulescens*
- 6- *Populus deltoides* Bartr. ex Marsh
- 7- *E. Coli*
- 8- merA
- 9- Hg²⁺
- 10- Hg⁺
- 11- merB

جهت رفع این مشکل می‌توان از میکروارگانیسم‌های غیروبی به‌منظور تقویت زیست‌پالایی استفاده کرد. با توجه به این‌که این یک روش تهاجمی است، ممکن است پس از آن میکروارگانیسم غیروبی مدت‌ها در خاک باقی‌مانده و اکوسیستم را تغییر دهند. از این‌رو درک درست از جوامع میکروبی درگیر در زیست‌پالایی و محرک‌های این فعالیت بر انتخاب روش درست زیست‌پالایی مؤثر است. امروزه استفاده از متاژنومیکس^{۱۲} به‌منظور مطالعه بهتر و شناخت جامعه میکروبی در طی فرآیند زیست‌پالایی رو به افزایش است. توالی‌یابی‌های نسل جدید (NGS)^{۱۳} اطلاعات قابل اعتمادی در مورد آنزیم‌ها و ژن‌های کلیدی دخیل در تخریب و سم‌زدایی آلاینده‌های موجود در خاک را در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد (۱۳).

در این مطالعه به بررسی جدیدترین پیشرفت‌ها و تعریف تکنیک‌های زیست‌پالایی و هم‌چنین استفاده از نتایج پژوهش‌های قبلی نگارنده‌گان در چگونگی تجزیه آلاینده‌های مختلف توسط میکروارگانیسم‌ها به‌منظور کاهش آلودگی خاک، پرداخته شده است. زیست‌پالایی یکی از نوآوری‌های زیست‌فناوری برای حذف مواد آلی پایدار و ترکیباتی است که به سختی حذف می‌شوند. بنابراین، آشنایی با فرآیندها و کاربردهای اخیر زیست‌پالایی امری ضروری است.

میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در زیست‌پالایی: تعادل بیولوژیکی تا حد زیادی با مشارکت میکروارگانیسم‌ها در زنجیره غذایی حفظ می‌شود. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند در دمای ۱۲۶/۵ تا ۶۴۸/۸۹ درجه سلسیوس رشد کنند. سازگاری بالا و ساختار بیولوژیکی ریزجانداران، آن‌ها را به گزینه‌های مناسب برای زیست‌پالایی تبدیل کرده‌است (۱۴).

- 12- Metagenomics
- 13- Next-Generation Sequencing

فعالیت در شرایط بی‌هوازی هستند (۲۱). در مطالعه‌ای که توسط عبادی و همکاران انجام شد به‌منظور افزایش راندمان تجزیه زیستی آلودگی‌های نفتی موجود در خاک، سویه‌های باکتریایی با عملکرد متنوع برای افزایش راندمان تجزیه زیستی نفت انتخاب شد. نتایج نشان داد در مقایسه با نمونه شاهد میزان تجزیه ترکیبات هیدروکربنی ناشی از آلودگی نفتی حدود ۲۸٪ بیش‌تر بود (۲۲). آلودگی فلزات سنگین منجر به ایجاد تنش فلزی در خاک شده که در اثر آن میزان کربن قابل دسترس میکروب‌ها کاهش می‌یابد که منجر به تغییرات قابل توجهی در جمعیت میکروبی می‌شود، به همین منظور، زیست‌پالایی در کاهش آلودگی فلزات سنگین نقش دارد و از دو طریق انجام زیست‌پالایی در محل و زیست‌پالایی خارج از محل انجام می‌شود. در زیست‌پالایی در محل: پالایش زیستی به طور مستقیم در محل آلودگی انجام می‌شود. در حالی‌که زیست‌پالایی خارج از محل، آلودگی از یک ناحیه انتخاب و در محل دیگری پالایش انجام می‌شود (۲۳). هم‌افزایی میان گیاهان و میکروارگانیسم‌ها به منظور سم‌زدایی، القا رشد و تحریک افزایش بیان ژن‌های تجزیه‌کننده آلاینده‌ها به فرآیند زیست‌پالایی کمک می‌کند. در پژوهشی با توجه به پتانسیل ارتباط میان گیاهان شورزی^{۱۴} و میکروارگانیسم‌های موجود در خاک به‌منظور زیست‌پالایی خاک‌های شور آلوده به ترکیبات نفتی، گیاهان کاندید، که همراه با باکتری‌های ریزوسفر/ اندوفیت که محرک رشد گیاه و تجزیه‌کننده ترکیبات نفتی بودند، شناسایی و معرفی شدند (۲۴).

فاکتورهای مؤثر بر زیست‌پالایی توسط ریزجانداران:

زیست‌پالایی فرآیندی است که در آن از موجودات زنده برای اصلاح و کاهش یا حذف آلودگی استفاده می‌شود. زیست‌پالایی نیازمند فعالیت آنزیمی میکروارگانیسم‌هاست، در نتیجه باید شرایط محیطی و

ریزجانداران تجزیه‌کننده آلاینده‌ها به‌طور طبیعی در خاک پراکنده هستند و از طریق باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها از بین می‌روند. از جمله ریزجانداران مورد استفاده در زیست‌پالایی می‌توان به *آلکالیژن‌ها*^۱، *زانتوباکترها*^۲، *آرتروباکترها*^۳، *سودوموناس‌ها*^۴، *باسیلوس*^۵، *مایکوباکتریوم*^۶، *کورینه باکتریوم*^۷، *فلابوباکتریوم*^۸، *نیتروزوموناس*^۹ اشاره کرد (۱۵).

بعضی از میکروارگانیسم‌ها مانند: *سودوموناس*، *باسیلوس*، *فلابوباکتریوم*، *رودوکوکوس*^{۱۰}، *مایکوباکتریوم*^{۱۱} و *نوکاردیا*^{۱۲} قادر به انجام فرآیند زیست‌پالایی در شرایط هوازی هستند (۱۶، ۱۷ و ۱۸). همچنین، علف‌کش‌ها، هیدروکربن‌های الکانی، ترکیبات پلی آروماتیک توسط این باکتری‌ها تجزیه می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها از ترکیبات موجود در این آلودگی‌ها به‌عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند. در میکروارگانیسم‌های هوازی اکسیژن به‌عنوان یک عامل محدودکننده محسوب می‌شود (۱۹). مطالعات متعددی به‌منظور بررسی حذف آلودگی‌ها توسط ریزجانداران مثل حذف آلاینده‌های الکانی، سیلوآلکانی و اروماتیک انجام شده‌است. آلودگی‌های نفتی با توجه به ترکیب سازنده آن‌ها پاسخ متفاوتی در پاسخ به تجزیه میکروبی نشان می‌دهند. بعضی از ریزجانداران قادر به حذف ترکیبات نفتی آلیفاتیک، مونوآروماتیک، پلی آروماتیک هستند و برخی تنها قادر به حذف ترکیباتی مانند رزین می‌باشند (۲۰). همچنین برخی باکتری‌ها مانند: *سودوموناس* و *آئروموناس*^{۱۳} قادر به

- 1- Alcaligenes
- 2- Xanthobacter
- 3- Arthrobacter
- 4- Pseudomonas
- 5- Bacillus
- 6- Mycobacterium
- 7- Corynebacterium
- 8- Flavobacterium
- 9- Nitrosomonas
- 10- Rhodococcus
- 11- Mycobacterium
- 12- Nocardia
- 13- Aeromonas

14- Halophyte

تعیین‌کننده‌ای در میزان انحلال و زیست فراهمی آلودگی برای میکروارگانیسم‌ها داشته باشند. مطالعه ۲۱۴ ایزوله باکتری جداسازی شده از خاک‌های شور بر میزان جذب نمک در کشت سالیکورنیا در غلظت‌های مختلف (۰-۲۰۰-۴۰۰-۶۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) نتایج نشان داد، در غلظت ۲۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم میزان رشد گیاه افزایش یافته درحالی‌که این گیاه در غلظت‌های ۴۰۰-۶۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم به ترتیب ۵/۸-۴۲/۹ درصد رشد کاهشی نشان داد. در ادامه با افزودن باکتری استافیلوکوکوس^۱ به محیط کشت گیاهان میزان رشد آن در غلظت ۲۰۰ میلی‌مولار یون کلرید سدیم، به‌ترتیب ۳۳/۲-۶۵/۲ درصد افزایش یافت (۲۷). فاکتورهای متفاوتی مانند شرایط محیطی (pH، دما، رطوبت) بر رشد میکروارگانیسم‌ها تأثیر دارد (۲۸) (جدول ۱).

تغذیه‌ای مناسب برای فعالیت فیزیوشیمیایی میکروارگانیسم‌ها فراهم شود. تامین کربن به عنوان منبع اصلی تغذیه میکروارگانیسم‌ها عامل کلیدی محسوب می‌شود. هم‌چنین، در آلودگی‌های هیدروکربنی میزان حضور منبع فسفر و نیتروژن برای رشد میکروارگانیسم‌ها موثر می‌باشد (۲۵).

کارایی زیست‌پالایی در کنسرسیوم‌های میکروبی که از گونه‌های میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده تا از همه بسترهای موجود به بهترین شکل استفاده کنند، در مقایسه با سیستم منفرد، در بعضی مواقع بیش‌تر است. در مطالعه‌ای که توسط (۲۶). انجام شد کنسرسیوم باکتریایی‌ها عموماً کارآمدتر از جدایه‌های منفرد بودند و مقدار قابل‌توجه و طیف وسیع‌تری از هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک نفت خام را تجزیه کردند. علاوه بر این، خصوصیات زیستی خاک و به‌ویژه جامعه میکروبی فعال خاک می‌تواند نقش

جدول ۱- فاکتورهای مؤثر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها.

Table 1. Critical factors for microbial bioremediation.

منابع References	ملاحظات Consideration	فاکتورها Factors
(۱۴، ۲۹ و ۳۰)	در دسترس بودن باکتری‌ها برای فرآیند زیست‌پالایی امری ضروری است. علاوه بر این، میکروارگانیسم‌های موجود در خاک برای ادامه فعالیت نیاز به منبع کربن دارند. از مهم‌ترین فاکتورهای بیولوژیک تعیین‌کننده برای زیست‌پالایی می‌توان به تعامل (رقابت، دریافت و جایگزینی)، اندازه جمعیت میکروارگانیسم‌ها اشاره کرد. The availability of bacteria is essential for the bioremediation process. In addition, microorganisms present in the soil require a source of carbon to sustain their activities. Among the most crucial biological factors determining bioremediation are interactions (competition, predation, and replacement) and the population size of microorganisms.	فاکتورهای بیولوژیکی Biological Factors
(۳۱)	به‌عنوان یک دریافت‌کننده الکترون در زیست‌پالایی هوازی نقش ایفا می‌کند. در آلودگی‌ها با منابع هیدروکربنی، برای فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی حضور اکسیژن ضروری است. As an electron acceptor, it plays a role in aerobic bioremediation. In pollutants with hydrocarbon sources, the presence of oxygen is essential for the activity of aerobic microorganisms.	اکسیژن Oxygen

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

منابع References	ملاحظات Consideration	فاکتورها Factors
(۳۰ و ۳۲)	میکروارگانیسم‌ها برای رشد و تکثیر نیاز به مواد غذایی دارند، که معمولاً در طبیعت وجود دارد اما می‌توان برای رشد و تکثیر و انجام بهتر فرآیند زیست‌پالایی این مواد را به طور مصنوعی به محیط اضافه کرد. میکروارگانیسم‌ها تجزیه‌کننده آلودگی‌های هیدروکربنی برای ادامه فعالیت نیاز به فسفر و نیتروژن نیز دارند. Microorganisms require nutrients for growth and reproduction, which are typically present in nature. However, for enhanced growth, reproduction, and improved bioremediation processes, these nutrients can be artificially added to the environment. Microorganisms, as decomposers of hydrocarbon pollutants, need phosphorus and nitrogen to sustain their activities.	مواد غذایی Nutritional substances
(۳۳ و ۳۴)	دما به دلیل تأثیر آن بر وضعیت فیزیکی نفت و ترکیب شیمیایی، متابولیسم میکروبی و ترکیب کنسرسیوم میکروبی تأثیر زیادی بر تجزیه هیدروکربن‌های نفتی دارد دما به‌عنوان یک عامل مؤثر بر فعالیت آنزیمی میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌شود. دما تأثیر زیادی بر تجزیه هیدروکربن‌های نفتی دارد، زیرا بر وضعیت فیزیکی نفت، متابولیسم میکروبی، و ترکیب میکروارگانیسم‌ها اثر می‌گذارد و به عنوان یک عامل مهم در فعالیت آنزیمی آن‌ها شناخته می‌شود. Temperature has a significant impact on the degradation of hydrocarbons in oil, as it affects the physical state of the oil, microbial metabolism, and the composition of microbial consortia. It is considered an important factor in the enzymatic activity of microorganisms.	دما Temperature
(۲۸ و ۳۵)	pH محیط بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها و حذف آلودگی‌ها نقش دارد، به طوری که در pH=۸، میزان حذف حشره‌کش‌ها افزایش و در pH=۴ فعالیت میکروارگانیسم‌ها کاهش یافت. The pH of the environment plays a role in the activity of microorganisms and the removal of pollutants. For instance, at pH=8, the removal efficiency of insecticides increases, while at pH=4, the activity of microorganisms decreases.	pH
(۳۶)	آلاینده‌های دارای ترکیبات نیتروژن، فسفر، آهن، پتاسیم و گوگرد، دارای ترکیباتی است که تامین‌کننده مواد اولیه ضروری برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌هاست. Pollutants containing nitrogen, phosphorus, iron, potassium, and sulfur compounds have compositions that serve as essential raw materials for the growth and reproduction of microorganisms.	اثر فلزات سنگین بر رشد میکروارگانیسم‌ها The effect of heavy metals on the growth of microorganisms
(۲۸)	غلظت بالای ترکیبات سمی بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها اثر منفی دارد. برخی آلاینده‌های ارگانیک و غیرارگانیک بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها تأثیر منفی دارد. High concentrations of toxic compounds have a negative impact on the activity of microorganisms. Some organic and inorganic pollutants adversely affect the activity of microorganisms.	عوامل مؤثر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها Factors affecting the activity of microorganisms

ترانسفراز^۳، هیدرولاز^۴ نقش مهمی در مرحله متابولیک زیست‌پالایی دارند. شرایط محیطی مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها از جمله عوامل موثر بر فرآیند زیست‌پالایی است (۳۷). استفاده از میکروارگانیسم‌ها و کودهای زیستی به منظور قرار دادن عناصر مورد نیاز زیست‌پالایی مانند کربن، نیتروژن و فسفر، راه‌حلی هوشمندانه برای بهبود عملکرد این فرآیند است (۳۸).

انواع زیست‌پالایی: زیست‌پالایی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که هر کدام از آنها به‌طور مختصر شرح داده می‌شود (شکل ۱).

اصول زیست‌پالایی: اهمیت زیست‌پالایی زمانی مشخص می‌شود که ضایعات آلی در محیط افزایش می‌یابد. فرآیند کلیدی زیست‌پالایی، شامل تجزیه زیستی ترکیبات آلی مضر به ترکیبات آلی یا غیرآلی غیرسمی یا طبیعی که برای استفاده انسان، گیاهان، جانوران و آبزیان بی‌خطر باشد. پس از انجام زیست‌پالایی مواد غذایی و ترکیبات شیمیایی مورد نیاز ارگانیسم‌ها فراهم می‌شود. زیست‌پالایی مستلزم دسترسی به مواد غذایی و ترکیبات شیمیایی مورد نیاز ارگانیسم‌ها قبل از شروع فرآیند است تا میکروارگانیسم‌ها بتوانند به‌طور مؤثر در تجزیه آلاینده‌ها مشارکت کنند. آنزیم‌هایی مانند: اکسیدرودکتاز^۱، لایز^۲،



شکل ۱- انواع زیست‌پالایی.

Figure 1. Types of bioremediations.

- 1- Oxidoreductases
- 2- Lyases
- 3- Transferases
- 4- Hydrolases

زیست‌پالایی در محل: این روش شامل پاکسازی مواد آلوده در محل آلودگی است. نیازی به گودبرداری و ایجاد اختلال در ساخت خاک ندارد. به‌طور کلی این روش در مقایسه با زیست‌پالایی خارج از محل مقرون به صرفه‌تر است. که در ادامه به آن می‌پردازیم. **زیست‌پالایی مهندسی شده^۱:** در این روش رشد و فعالیت تحریبی میکروارگانیسم‌ها با استفاده از سیستم‌های طراحی‌شده تامین‌کننده مواد مغذی، گیرنده‌های الکترون و یا سایر مواد محرک رشد میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌یابد.

پخش زیستی^۲: پخش زیستی در زیست‌پالایی به فرایند انتشار یا حرکت میکروارگانیسم‌ها از مناطق با تراکم بالا به نواحی کم‌تر آلوده در محیط اطراف اشاره دارد. این حرکت به تسریع فرایند تجزیه آلاینده‌های زیست‌محیطی کمک می‌کند، زیرا میکروارگانیسم‌ها در نواحی جدید، آلاینده‌ها را به‌عنوان منبع غذایی استفاده می‌کنند. همچنین پخش زیستی شاخه‌ای از زیست‌پالایی در محل است که با به‌کارگیری میکروارگانیسم‌های بومی برای تجزیه بیولوژیکی مواد آلی انجام می‌شود. در این روش، هوا یا اکسیژن و در صورت لزوم مواد مغذی به منطقه آلوده تزریق می‌شوند تا باعث تحریک رشد میکروارگانیسم‌هایی شود که قادر به تبدیل آمونیاک به نیتريت و نیترات هستند. این فرایند با دنیتريفيکاسيون ادامه یافته و نیتروژن گازی آزاد می‌کند. همچنین، این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند فلزات را از طریق اکسیداسيون بی‌حرکت و رسوب دهند، که به کاهش حضور فلزات سنگین در محیط کمک می‌کند.

در پژوهشی، اثر پخش زیستی در کاهش آلاینده محیطی ۱،۴- دیوکسان^۳، که به‌عنوان یک عامل سرطان‌زا شناخته می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه نشان داد که پخش زیستی می‌تواند غلظت این ترکیب آلی را تا ۹۹/۲٪ کاهش دهد، در حالی که میانگین کاهش در سطح جهانی ۶۴/۱٪ گزارش شده است. این نشان‌دهنده اثر بالقوه پخش زیستی در کاهش آلودگی‌های سخت و خطرناک است (۳۹).

تحریک زیستی^۴: فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک تحت تأثیر عوامل محدودکننده‌ای مانند: مواد غذایی، ویتامین، رطوبت و pH در محیط‌های آلوده به ترکیبات هیدروکربنی است. در این نوع آلودگی‌ها کربن مورد نیاز باکتری‌ها به میزان کافی در دسترس است اما برای تحریک و فعالیت بیش‌تر این باکتری‌ها عناصر ضروری دیگری مانند نیتروژن و فسفر به خاک آلوده اضافه می‌شود (۴۰). در مطالعه‌ای به بررسی نقش تحریک زیستی در زیست‌پالایی از طریق فعالیت باکتری مقاوم به شوری، سودوموناس آئروژینوزا، و اثر آن بر حذف آلودگی نفتی پرداخته شد. همچنین، تأثیر این باکتری بر رشد گیاهان شورزی سالیکورنیا و گیاهان شیرین‌رست فستوکا آروندیناسه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش فعالیت آنزیمی باکتری، به‌ویژه دهیدروژناز، میزان حذف آلکان‌های زنجیره بلند افزایش یافت. گیاه سالیکورنیا به‌طور مؤثری در کاهش شوری و آلودگی نفتی، با نتایجی متغیر بین ۴۶ تا ۷۶ درصد نسبت به گیاه کنترل و فستوکا آروندیناسه، عملکرد بهتری نشان داد. این مطالعه بر اهمیت تحریک زیستی باکتری‌ها و گیاهان در بهبود فرایندهای زیست‌پالایی تأکید می‌کند (۴۱). در مطالعات عبادی و همکاران (۴۲) تأثیر تحریک زیستی توسط باکتری‌های تولیدکننده بیوسورفکتانت بر تجزیه هیدروکربن‌های نفتی سنگین و سبک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج گاز کروماتوگرافی نشان داد که این باکتری‌ها قادر به تجزیه مؤثر هیدروکربن‌ها هستند. در پژوهش دیگری، اثر تحریک زیستی توسط

1- Engineered bioremediation
2- Biosparging
3- 1,4-Dioxan

4- Biostimulation

کنسرسيوم باکتری سودوموناس آئروژینوزا بر زیست‌پالایی خاک‌های شور آلوده به ترکیبات نفتی مورد مطالعه قرار گرفت. افزودن این کنسرسيوم به خاک آلوده، اثرات منفی شوری بر تجزیه بیولوژیکی را کاهش داد و سرعت تخریب هیدروکربن‌ها را تا حدود ۳۰٪ افزایش داد. همچنین، تیمار خاک با کنسرسيوم باکتری منجر به دوبرابر شدن فعالیت آنزیم دهیدروژناز شد، که نشان‌دهنده اثربخشی تحریک زیستی در بهبود فرایندهای زیست‌پالایی است (۴۳).

تجمع زیستی^۱: در بحث تجمع زیستی زیست‌پالایی، از میکروارگانیسم‌های بومی و غیربومی در مناطق آلوده استفاده می‌شود، جایی که قابلیت میکروارگانیسم‌های بومی برای رفع آلودگی‌ها محدود است. به عبارت دیگر این روش زمانی که زیست‌پالایی با تحریک زیستی مؤثر نیست، کاربرد دارد. کلید موفقیت این روش افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌های موجود در محل آلودگی است که در مواجهه با تنش‌های زیستی و رقابت با سایر میکروارگانیسم‌های غیرپالاینده موفق عمل کنند (۲۲). لیندین آلاینده باقی‌مانده از آفت‌کش ارگانوکلروئیک است که استفاده بی‌رویه‌اش باعث تجمع آن در محیط زیست می‌شود. از روش تجمع زیستی با استفاده از کنسرسيوم اکتینوباکتری به منظور حذف لیندین از خاک استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای از ادغام روش تجمع زیستی با کمک باکتری استرپتومایسس و تحریک زیستی در حذف آلاینده‌ها در سه شرایط مختلف خاک شنی، رسی و لومی-سیلتی استفاده شد و میزان اثر باکتری بر حذف آلودگی به ترتیب ۸۶/۳٪، ۷۰٪ و ۶۱/۴٪ گزارش شد (۴۴). در پژوهش‌های عبادی و همکاران (۲۲)، سه سویه سودوموناس، یک سویه باسیلوس، کرایسوباکتریوم^۲ به ترتیب ۵۱/۶٪، ۶۱/۸٪ و ۵۶/۷٪ در حذف ترکیبات آروماتیک و آلیفاتیک مؤثر بودند.

تهویه زیستی^۳: این روش به‌طور گسترده برای حذف آلودگی‌های نفتی به‌کار می‌رود، فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی در فرآیند زیست‌پالایی با اضافه کردن جریان اکسیژن و مواد مغذی (نیتروژن و فسفات) افزایش می‌یابد. علاوه بر این، این روش به بهبود جمعیت میکروارگانیسم‌های بومی موجود در خاک منطقه آلوده کمک می‌کند (۴۵). اسیدی شدن خاک‌های اطراف معادن یکی از چالش‌های محیط زیستی استخراج عناصر از معادن است. به منظور کاهش اثرات ناشی از اسیدی شدن خاک در مطالعه‌ای مقایسه میزان کاهش آلودگی از دو روش تهویه زیستی و تحریک زیستی در خاک‌های آلوده به عناصری مانند منگنز، آهن، آلومنیوم، مس و روی انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد، میزان کاهش فلزات سنگین در خاک پس از ۲۸ روز، به ترتیب ۷۰-۵۸٪ و ۶۷-۲۸٪ در روش تهویه زیستی و تحریک زیستی بود (۴۶).

مکش زیستی^۴: مکش زیستی به عنوان یک فناوری نوظهور، برای افزایش کارایی زیست‌پالایی آب‌های زیرزمینی آلوده به هیدروکربن طراحی شده است. این روش از یک پمپ خلا که روی زمین نصب شده و به مکنده‌ای در سطح آب‌های زیرزمینی متصل است، استفاده می‌کند تا آلودگی‌های نفتی و آب را به سمت یک جداکننده آب و هوا هدایت کرده، سپس هوای آلوده به هیدروکربن توسط فیلترهای زیستی پاک‌سازی و آب از آلودگی‌های نفتی جدا می‌شود. در این فرآیند، از رطوبت خاک به نحوی استفاده می‌شود که به تعدیل نفوذپذیری هوا و بهبود انتقال اکسیژن به خاک کمک می‌کند، تا به جای کاهش، فعالیت میکروبی را تحریک و افزایش دهد، که این امر به تسریع فرایند زیست‌پالایی منجر می‌شود (۴۷ و ۴۸).

3- Bioventing
4- Bioslurping

1- Bioaugmentation
2- Chryseobacterium

قارچ‌ها است. این روش به‌طور خاص برای حذف آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربن‌ها، سموم دفع آفات، و سایر ترکیبات آلی خطرناک از محیط استفاده می‌شود.

زیست‌پالایی به روش توده زیستی^۳: در این روش، هوادهی و استفاده از مکمل‌های غذایی برای تقویت فعالیت‌های متابولیکی ریزجانداران موجود در خاک‌های آلوده استفاده می‌شود. زیست‌پالایی به روش توده زیستی یکی از روش‌های مقرون به صرفه است که باعث کنترل pH و مواد مغذی موجود در خاک می‌شود. از این روش برای کاهش آلاینده‌ها با وزن مولکولی کم و در شرایط آب و هوایی سرد استفاده می‌شود. استفاده از این روش همراه با افزایش فعالیت میکروبی است که کاهش زمان فرآیند پاکسازی خاک را با بالا رفتن نرخ تجزیه زیستی به همراه دارد. در این روش، هوای گرم به سیستم بیوپیل وارد می‌شود تا به‌طور هم‌زمان هوا و گرما را برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها تامین کند. کربن آلی در دسترس میکروارگانیسم‌ها در این روش نقش اساسی ایفا می‌کند (۵۱). از این روش هم‌چنین برای حذف آلودگی خاک به‌وسیله سوخت‌های دیزلی استفاده می‌شود. ۹۳ درصد آلودگی‌های ناشی از ترکیبات هیدروکربنی با استفاده از این روش از بین می‌روند (۵۲). یک عامل کلیدی برای انجام بهتر زیست‌پالایی در دسترس بودن کربن ارگانیک است، به‌منظور عملکرد بهتر باکتری‌های موجود در خاک آلوده به نفت از فناوری زیست‌پالایی به روش توده زیستی استفاده می‌شود.

در مطالعه‌ای انجام شده توسط (۵۳)، شرایط بهینه برای حذف آلودگی نفتی توسط باکتری‌ها شامل نسبت ترکیبات کربن به نیتروژن به فسفر ۱۰۰:۵:۱، رطوبت خاک ۱۸ درصد، pH خاک بین ۶/۴ تا ۷/۸،

تضعیف طبیعی^۱: زیست‌پالایی می‌تواند به‌طور طبیعی با فرآیندی به نام تضعیف طبیعی انجام شود. در این فرآیند، زیست‌پالایی به پتانسیل تجزیه زیستی ذاتی جمعیت‌های میکروبی بومی در خاک‌های آلوده برای تخریب و حذف آلاینده‌ها از خاک متکی است (۴۹). استفاده از جانداران پروکاریوت موجود در خاک برای سمیت‌زدایی و اصلاح خاک آلوده روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط زیست است. در بسیاری از موارد، تضعیف طبیعی می‌تواند به عنوان یک روش اولیه برای کاهش آلاینده‌ها عمل کند و سپس زیست‌پالایی برای حذف باقی‌مانده آلاینده‌ها از محیط انجام گیرد. درواقع اثر تضعیف طبیعی با زیست‌پالایی افزایش می‌یابد. در زمین‌های شور استفاده از گیاهان شورزی و با استفاده از باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن افزایش عملکرد و رشد گیاه را نشان داد. در پژوهش علیشاهی و همکاران (۵۰) از ۳۱۶ باکتری اندوفیت تثبیت‌کننده نیتروژن، دو باکتری *ژی هنگلیلا هالوتولرانس*ها و براکی باکتریوم متعلق به خانواده اکتینوباکتری‌ها جدا شده و به محیط غذایی شور سوئدا اضافه شد. گیاه در این محیط افزایش عملکرد نشان داد.

زیست‌پالایی خارج از محل: شامل جابه‌جایی آلاینده‌ها از ناحیه‌های آلوده و انتقال آن‌ها به مکان دیگری برای زیست‌پالایی است. تکنیک‌های زیست‌پالایی خارج از محل به‌طور منظم بر اساس عمق آلودگی، نوع آلاینده، درجه آلودگی، هزینه پاکسازی و موقعیت جغرافیایی ناحیه آلوده در نظر گرفته می‌شود.

زیست‌پالایی فاز جامد^۲: یک روش زیست‌محیطی برای پاکسازی خاک‌ها و سایر مواد جامد آلوده با استفاده از فعالیت‌های میکروبی و گاهی اوقات

1- Natural attention

2- Solid phase bioremediation

دمای خاک بین ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ هوادهی ۱۴۸ میلی‌لیتر در دقیقه گزارش شده است. کمپوست‌سازی^۱: یک روش بیوشیمیایی است که در آن ترکیبات آلی خاک به شکل پایدار در خاک تبدیل می‌شوند. کمپوست در این روش به‌منظور تامین مواد مغذی موجود برای میکروارگانیسم‌های فعال در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه (۵۴) نشان داده شد که میزان حذف تترابرومودی فنیل اتر با استفاده از روش کمپوست‌سازی در مقایسه با کنترل ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و هم چنین در مطالعه (۵۵) نشان داده شد که میزان حذف بنزوپرین با استفاده از روش کمپوست‌سازی ۶۱ درصد کاهش یافت. در مطالعه (۵۶)، پس از ۱۲۰ روز، ورمی‌کمپوست باعث افزایش معنی‌دار نسبت کربن بر نیتروژن در مقایسه با نمونه کنترل شد، که این نتیجه بر عملکرد بهتر فرآیند زیست‌پالایی که وابسته به حضور کربن برای فعالیت میکروارگانیسم‌هاست مؤثر است.

زراعت زمین^۲: خاک آلوده در بستری وسیع از مواد مورد نیاز رشد میکروارگانیسم‌ها شخم و هوادهی می‌شود و میزان رطوبت، pH و دسترسی به اکسیژن برای فعالیت بهتر میکروارگانیسم‌های بومی آن منطقه فراهم می‌شود. این روش بسیار کم‌هزینه است، ردپای اکولوژیکی کمی دارد و انرژی کمی مصرف می‌کند (۴). در مطالعه‌ای که توسط (۵۷) در نیجریه انجام شد، جمعیت ریزجانداران موجود در خاک آلوده به نفت پس از استفاده از زیست‌پالایی زراعت زمین در مقایسه با حالت کنترل به ترتیب ۳۲/۵٪ و ۲۵/۸٪ بود. هم‌چنین فراوانی جمعیت ریزجانداران جنس اسفنگوموناس^۳ افزایش معنی‌داری نشان داد.

فیلتر زیستی^۴: در این روش ریزجانداران دخیل در فرآیند زیست‌پالایی بر روی یک صفحه ثابت می‌شوند این روش برای حذف آلودگی‌های نفتی بر روی آب و پساب‌های آبی‌پرووری کاربرد دارد. فیلترهای زیستی به‌طور قابل‌توجهی بر تجزیه‌پذیری زیستی و قابلیت حل شدن ذرات آلی از طریق آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون و نترات‌زدایی ریزجانداران تأثیر می‌گذارد (۵۸). آرسنیک یک آلاینده سمی و سرطان‌زا است. اکسیداسیون بیولوژیکی آهن و منگنز به عنوان یک روش تصفیه برای حذف آرسنیک روشی نسبتاً جدید و مبتنی بر این واقعیت است که آب‌های زیرزمینی آلوده به آرسنیک معمولاً حاوی آهن و منگنز می‌باشد. اکسیداسیون بیولوژیکی آهن یا منگنز منجر به تشکیل ترکیبات نامحلولی (اکسیدهای آهن یا منگنز) می‌شود که متعاقباً با فیلتراسیون از آب حذف می‌گردند. اگر آرسنیک به‌طور هم‌زمان در آب وجود داشته باشد، می‌توان آن را با اکسیداسیون و جذب اکسیدهای آهن و منگنز حذف کرد. در یک پژوهش آزمایشگاهی با استفاده از یک بیوفیلتر برای حذف هم‌زمان آهن دو ظرفیتی، منگنز دو ظرفیتی و آرسنیک سه ظرفیتی از آب‌های زیرزمینی شبیه‌سازی شد و به‌مدت ۱۸۰ روز میزان کاهش این عناصر مورد ارزیابی قرار گرفت. بیوفیلتر باعث کاهش میزان این عناصر به ترتیب ۹۸/۲، ۹۷/۷ و ۹۶/۲٪ شد (۵۹).

دوغاب^۵ (بیوراکتور^۶): بیوراکتور ظرفی است که در آن یک واکنش بیوشیمیایی رخ می‌دهد. این سیستم شامل آنزیم‌ها، بافت‌ها، میکروارگانیسم‌ها و سلول‌های حیوانی و گیاهی برای دستیابی به بازدهی بالا در زیست‌پالایی است. در این روش خاک آلوده با آب و سایر مواد مورد نیاز برای زیست‌پالایی با هم در

4- Biofilter
5- Slurry-phase bioremediation
6- Bioreactor

1- Composting
2- Land farming
3- Sphingomonas

به‌صورت یونی توسط ریشه‌ها جذب می‌شوند (۲۲). شناسایی ژن‌های اختصاصی دخیل در گیاه‌پالایی و انتقال آن‌ها به گیاهانی که دارای رشد سریع هستند منجر به تولید گیاه تراریخته‌ای می‌شود که ویژگی گیاه‌پالایی آن بهبود یافته‌است. از ویژگی‌هایی مطلوب برای انتخاب گیاهان جهت اصلاح ژنتیکی: سرعت رشد بالا، تولید زیست‌توده زیاد و مقاومت در برابر آلاینده‌هاست. علاوه بر این، اثرمتقابل ریزجانداران و گیاه بر کارایی گیاه‌پالایی اثرگذار است (۵۰).

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با ارتباط باکتری‌ها در افزایش عملکرد گیاه و تحمل شرایط نامناسب محیطی انجام شده‌است. در پژوهشی اثر افزودن باکتری‌های هم‌زیست و غیرهم‌زیست با ریشه یونجه در خاک شور و شرایط خشکی مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس میزان تحمل به خشکی و شوری جدایه‌های باکتریایی و داشتن صفات تحریک‌کننده رشد گیاه، دو جدایه اندوفیت غیرهم‌زیست (*کلبسیلا*^۱، *کوزاکونیا کوانی*^۲) و یک جدایه اندوفیت هم‌زیست (*سینوریزوبیوم ملیوتی*^۳) توسط توالی یابی 16S rRNA شناسایی شدند. این سه جدایه به‌عنوان کودهای زیستی که باعث افزایش تحمل یونجه به شرایط شوری و خشکی، معرفی شدند (۶۱). در مطالعه‌ای که توسط (۲۴) انجام شد مزایای استفاده از مکمل فسفر و کلسیم برای بهبود رشد گیاه سالیکورنیا در شرایط تنش شوری بررسی شد. میزان جذب یون سدیم توسط سالیکورنیا در حضور فسفر افزایش یافت در حالی‌که در جذب پتاسیم، کلسیم و منیزیم در حضور فسفر تغییری حاصل نشد. علاوه بر این، با افزودن کلسیم و فسفر، میزان گلوکز، فروکتوز و ساکارز افزایش یافت. فرضی و همکاران (۶۲)، با استفاده از سه گیاه علف شور^۴،

بیوراکتور ترکیب شده و به‌صورت سوسپانسیون دوغاب نگهداری می‌شوند تا اکسیژن و مواد مغذی برای رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها در اختیارشان قرار گیرد. مقدار آبی که به خاک داده می‌شود به غلظت آلاینده، سرعت تجزیه زیستی آن و کیفیت فیزیکوشیمیایی خاک بستگی دارد. در این روش می‌توان در صورت عدم وجود میکروارگانیسم‌های بومی در خاک، میکروارگانیسم‌های مورد نیاز را به آن اضافه کرد (۶۰).

زیست‌پالایی و گیاهان: آلاینده‌های آلی به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص خود، نسبت به سایر آلاینده‌ها در خاک به شکل سریع‌تری حذف یا تجزیه می‌شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند بر اساس خواص آب‌دوستی یا آب‌گریزی خود توسط ریشه‌های گیاهان جذب شوند. همی‌سلولز موجود در دیواره سلولی و لایه‌های لیپیدی دوگانه غشای سلول با قسمت‌های آب‌گریز آلاینده‌ها ارتباط برقرار می‌کنند، در حالی‌که آلاینده‌های آب‌دوست کم‌تر قابلیت جذب و انتقال توسط ریشه‌ها را دارند. با این‌حال، این آلاینده‌ها هم‌چنان می‌توانند توسط گیاهان و میکروارگانیسم‌های موجود در خاک تجزیه شوند. در فرآیند گیاه‌پالایی، گیاهان می‌توانند از طریق فعالیت‌های متابولیکی خود، مانند استفاده از آنزیم‌های نیتروردوکتاز، دهالوژناز، و پرواکسیداز، نقش مهمی در تجزیه‌ی آلاینده‌ها داشته باشند (۲۴). سیدروفورها، اسیدهای آلی، و فنولیک‌ها می‌توانند نقش مهمی در افزایش دسترسی گیاهان به کاتیون‌های فلزی محلول در خاک ایفا کنند. این مواد با افزایش محلول‌پذیری فلزات و تسهیل آزادسازی آن‌ها، به گیاهان کمک می‌کنند تا مواد مغذی را به شکل یونی از خاک جذب کنند. علاوه بر این، محیط اسیدی توسط این ترکیبات ایجاد شده، می‌تواند به جذب بهتر برخی عناصر آلی کمک کند، هرچند که اکثر مواد مغذی اصلی

1- *Klebsiella sp*

2- *Kosakonia cowanii*

3- *Sinorhizobium melilot*

4- *Salsola crassa*

ریزجانداران غیرقابل کشت نیز استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط عبادی و همکاران (۲۲) انجام شد، برای شناسایی ایزوله‌های جمع‌آوری‌شده از مناطق اصفهان، بندرعباس و شهرری از این تکنیک استفاده شد. همچنین از تکنیک 16srRNA به منظور شناسایی و بررسی تنوع ژن‌های دی اکسیژناز موجود در جامعه میکروبی اطراف یک معدن ذغال سنگ که باعث آلودگی خاک به‌وسیله فلزات سنگین شده بود، استفاده کردند.

اومیکس و زیست‌پالایی: فناوری‌های نوظهور مبتنی بر اومیکس شامل پروتئومیکس^۶، ژنومیکس^۷، ترانسکریپتومیکس^۸، متاترانسکریپتومیکس^۹ اطلاعات کاملی از ژن‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌های درگیر در فرآیند زیست‌پالایی را ارائه می‌دهند (۶۳). ژن‌های موجود در میکروارگانیسم‌های مسئول حذف یا کاهش اثر تخریبی آلاینده‌ها به‌راحتی با استفاده از فناوری‌های توالی‌یابی قابل شناسایی هستند. از طریق متاژنومیکس می‌توان به ارتباط میان میکروارگانیسم‌های غیرقابل کشت در شرایط محیطی متفاوت و بررسی نقش بیوشیمیایی آن‌ها پرداخت (۶۴). همچنین، از کل جمعیت میکروارگانیسم‌ها و ژنوم آن‌ها می‌توان برای ساخت کتابخانه‌ای برای شناسایی و استفاده از ریزجانداران برای اصلاح خاک و زیست‌پالایی استفاده کرد. علاوه بر این، با استفاده از کتابخانه‌های متاژنومیکس می‌توان به بررسی عملکرد آنزیم‌های میکروبی دخیل در زیست‌پالایی مانند: آمیلاز، لیپاز و سلولاز و سایر آنتی‌بیوتیک‌ها پرداخت. اطلاعات جمع‌آوری‌شده در کتابخانه‌های متاژنومیکس در ایجاد کنسرسیوم‌های میکروبی که قادر به زیست‌پالایی از طریق کاهش اثر آلاینده و حذف آن از خاک آلوده هستند، نقش دارد (۶۵).

سالیکورنیا یوروپا^۱ و تکمه‌شور^۲ در محیط‌های مختلف شوری با EC (۲، ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) پژوهشی انجام دادند. میزان کلر و سدیم جذب شده در اندام هوایی گیاه سالیکورنیا با جذب عناصر کلر، سدیم در اندام هوایی سالیکورنیا یوروپا در EC ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به دو گیاه دیگر افزایش نشان داد. بر اساس نتایج پژوهش محمدزاده و حاجی‌بلند گیاه شورزی و نیتروفیل سالیکورنیا یوروپا به عنوان گزینه‌ای مناسب برای پاکسازی زمین‌های آلوده به نترات معرفی شد. کاویانی و همکاران نیز گزارش کردند که جذب نیکل در قسمت هوایی توسط گیاه سالیکورنیا ایرانیکا^۳ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. **تکنیک‌های متداول توالی‌یابی ژن:** تکنیک‌های توالی‌یابی ابتدا برای شناسایی جمعیت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک استفاده می‌شوند و پس از آن برای بررسی میزان کارایی زیست‌پالایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از روش‌های متعارف برای این منظور می‌توان به واکنش زنجیره ای پلیمرز^۴ و روش هیبریداسیون در محل فلوئورسنت^۵ اشاره کرد. تکثیر DNA توسط واکنش زنجیره ای پلیمرز در بسیاری از مطالعات به‌منظور انتخاب، مشخص کردن ویژگی‌ها و شناسایی جمعیت‌های میکروبی تجزیه‌کننده آلاینده استفاده می‌شود (۱۳). در پژوهش‌ها 16srRNA به‌عنوان یک توالی ژنی محافظت شده و دارای بالاترین سطح کیفی برای توصیف شباهت فیلوژنتیکی میان میکروارگانیسم‌ها در جوامع میکروبی بیان می‌کند. علاوه بر این، توالی‌یابی 16srRNA را می‌توان برای ارزیابی کامل تنوع جمعیت میکروبی موجود در خاک به کار برد. از طریق 16srR که یک فناوری کارآمد و مقرون به صرفه است، برای شناسایی

6- Proteomics
7- Genomics
8- Transcriptomics
9- Meta-transcriptomics

1- *Salicornia europaea*
2- *Bienertia cycloptera*
3- *Salicornia iranica*
4- Polymerase Chain Reaction
5- Fluorescence In Situ Hybridization

کاربردهای نانوتکنولوژی: مبنای استفاده از نانوتکنولوژی در زیست‌پالایی مبتنی بر جذب است، در مرحله اول برهمکنش جذب بین آلاینده و جاذب نانو در بخش سطحی رخ می‌دهد، در مرحله دوم، جاذب نانویی به لایه‌های عمیق‌تر جاذب نفوذ می‌کند و محلولی تشکیل می‌شود که در فرآیند حذف و یا کاهش آلاینده‌گی نقش دارد (۶۸). ترکیباتی با ابعاد نانو که دارای جذب سطحی، اثرات کوانتومی بالا، ظرفیت جذب فوق‌العاده و واکنش‌پذیری بالا هستند برای کاهش و حذف آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین استفاده می‌شوند. تاکنون چندین نانومواد مبتنی بر کربن، سیلیکون، روی، نانوموادهای مبتنی بر گرافن و چندین نانوکامپوزیت مبتنی بر اکسیدفلز در فرآیند زیست‌پالایی مورد استفاده قرار گرفته‌است (۶۹). نانوذرات آهن، اولین نانوذره‌ای است که در پاکسازی محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته‌است، از آنجایی که آهن ترکیبی سازگار با محیط زیست است، اکسیدهای آهن در اندازه نانو را می‌توان به‌طور مستقیم به مکان‌های آلوده تزریق کرد و از آن به‌عنوان یک جاذب کم‌هزینه برای جذب فلزات مضر از خاک استفاده کرد. نانوذرات اکسید آهن دارای خواصی مانند ظرفیت جذب بالا، بی‌اثر بودن از لحاظ شیمیایی، زیست‌سازگاری بالا می‌باشند. علاوه‌براین، استفاده از نانوذرات اکسید آهن به‌منظور افزایش فعالیت متابولیک میکروبی در سال‌های اخیر به‌دلیل سطح منحصر به فرد و اندازه کوانتومی آن مورد توجه قرار گرفته است (۷۰).

چشم‌انداز پیش روی استفاده از زیست‌پالایی: آنچه پیش‌روی زیست‌پالایی است، یک چشم‌انداز توسعه‌پذیر، چندوجهی و پایدار است. این فرآیند نه تنها می‌تواند به مدیریت مؤثر آلاینده‌ها کمک کند، بلکه پتانسیل آن را دارد تا به یک رویکرد جامع تبدیل شود که از توانایی‌های تکنولوژیک، بیولوژیک و اجتماعی بهره‌مند شود. زیست‌پالایی نیز همانند سایر تکنیک‌ها محدودیت‌هایی دارد. تعداد زیادی از سیستم‌های

ترانسکریپتومیکس، یک شاخه کلیدی در حوزه اومیکس است، که به بررسی و شناسایی مکانیسم‌های زیستی مورد استفاده توسط میکروارگانیسم‌ها، گیاهان، و دیگر سیستم‌های بیولوژیک برای تجزیه و حذف آلاینده‌ها می‌پردازد. ترانسکریپتومیکس به بررسی بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده میکروارگانیسم‌ها در شرایط محیطی متفاوت می‌پردازد. علاوه‌براین، با استفاده از داده‌های حاصل از ترانسکریپتومیکس می‌توان میکروارگانیسم‌های مناسب را براساس توانمندی‌شان در تجزیه آلاینده‌ها انتخاب کرد. هم‌چنین با استفاده از داده‌های حاصل از ترانسکریپتومیکس می‌توان شرایط مناسب برای فرآیند زیست‌پالایی را مشخص کرد. علاوه‌براین، داده‌های حاصل از ترانسکریپتومیکس می‌توانند به کشف مسیرها و ژن‌های جدیدی که در تجزیه آلاینده‌ها نقش دارند، منجر شود (۶۳). هم‌چنین، از ترانسکریپتومیکس به‌منظور کشف مسیرهای متابولیک و تغییرات بیان ژن‌های دخیل در فرآیند زیست‌پالایی استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال در مطالعه‌ای مشخص شد برخی ژن‌های تجزیه‌کننده ترکیبات هیدروکربنی موجود در نفت خام مانند *antA* و *xyiX xyiL* در فرآیند زیست‌پالایی توسط باکتری *Sordomonas aeruginosa*^۱ کاهش بیان نشان می‌دهند (۶۶).

پروتئومیکس با مطالعه مجموعه کامل پروتئین‌ها در یک سلول، بافت و ارگانیسم‌ها، اطلاعات قابل توجهی در مورد عملکرد، تعاملات و تغییرات بعد از ترجمه پروتئین‌ها ارائه می‌دهد که به شناسایی پروتئین‌های کلیدی که در فرآیند زیست‌پالایی نقش دارند، منجر می‌شود. هم‌چنین پروتئومیکس ارتباط پروتئین-پروتئین به‌منظور شناسایی مسیرهای پیام‌رسانی و مکانیسم‌های زیستی را مشخص می‌کند. با استفاده از این تکنولوژی می‌توان ژن‌ها یا پروتئین‌هایی که دارای عملکرد بهتری در فرآیند زیست‌پالایی هستند را مشخص کرد (۶۷).

1- *Pseudomonas aeruginosa*

از دیدگاه اقتصادی، زیست‌پالایی به دلیل داشتن روشی مقرون‌به‌صرفه، پایدار و ساده، مورد پذیرش گسترده‌ای در جامعه قرار می‌گیرد. به‌طورکلی، مخالفت‌ها با به‌کارگیری این فناوری نسبتاً کم است. در نهایت آنچه پیش‌روی زیست‌پالایی است، تبدیل زیست‌پالایی به یک ابزار محوری در توسعه پایدار می‌باشد. علاوه بر این، از تجزیه آلاینده‌های صنعتی گرفته تا احیای محیط‌های طبیعی آسیب‌دیده، زیست‌پالایی می‌تواند در تأمین یک زندگی بهتر و سالم‌تر برای نسل‌های آتی نقش مهمی ایفا کند. این رویکرد چندوجهی و توسعه‌پذیر می‌تواند یکی از کلیدهای موفقیت در مدیریت محیط زیست پایدار در قرن بیست و یکم باشد.

تضاد منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

خانم دکتر خوش‌خلق‌سیما: سرپرستی، نگارش و بررسی فایل نهایی.

خانم دکتر فاطمه لونی: نگارش و بررسی فایل نهایی آقای دکتر محمدرضا غفاری: نگارش و بررسی فایل نهایی

حمایت مالی

برای نگارش این مقاله حمایت مالی استفاده نشده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

اصلاح زیستی تحت شرایط هوازی انجام می‌گیرند اما راه‌اندازی یک سیستم در شرایط بی‌هوازی نیز می‌تواند منجر به تجزیه بعضی از مولکول‌های سخت توسط موجودات زنده میکروبی شود. کنترل و بهینه کردن سیستم زیست‌پالایی پیچیده است و به فاکتورهای مختلفی بستگی دارد. زیست‌پالایی یک گزینه مناسب برای تخریب آلاینده‌های زیان‌آور گوناگون با استفاده از فعالیت زیست‌شناختی طبیعی است. از آن‌جا که به‌نظر می‌رسد زیست‌پالایی یک گزینه خوب نسبت به فناوری‌های پاک‌سازی متداول است، پژوهش در این زمینه به سرعت در حال افزایش است و پیشنهاد می‌شود برای کاهش اراضی آلوده و حفظ محیط زیست، از این فناوری در بهبود خاک‌های آلوده کشورمان استفاده شود. با وجود توانمندی‌های فعلی زیست‌پالایی، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک با بهره‌برداری از فناوری‌های اومیکس مانند ژنومیکس، پروتئومیکس و متابولومیکس، قدرت و دقت این فرآیند افزایش یابد. هم‌چنین، این تکنولوژی‌ها قادرند دیدگاهی شفاف‌تر از قابلیت‌ها و تعاملات میان میکروارگانیسم‌هایی که در فرآیند زیست‌پالایی مشارکت می‌کنند فراهم کنند، و بدین ترتیب، به بهبود و بهینه‌سازی این فرآیندها یاری رسانند. استفاده از این فناوری‌ها به فهم عمیق‌تری از چگونگی فعالیت میکروارگانیسم‌ها و گیاهان در تجزیه آلاینده‌ها منجر می‌شود.

در عین حال، استفاده از گیاهان و میکروارگانیسم‌های بومی، به‌خصوص در کشورهای با تنوع زیستی بالا چون ایران، یک گام مهم در جهت استفاده پایدار از این فناوری است. گیاهان و میکروارگانیسم‌های بومی توانایی استفاده بهتر از شرایط محیطی را دارند و با کم‌ترین تغییرات محیطی، بیش‌ترین کارایی را دارا می‌باشند. هم‌چنین، پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه شناسایی و استفاده از گیاهان بومی ایران که توانایی زیست‌پالایی را دارند، می‌تواند منجر به یافتن روش‌های جدید و مؤثرتری برای حذف آلاینده‌ها باشد.

منابع

1. Azhar, U., Ahmad, H., Shafqat, H., Babar, M., Munir, H. M. S., Sagir, M., Arif, M., Hassan, A., Rachmadona, N., & Rajendran, S. (2022). Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: A review. *Environmental research*. 113918.
2. Awa, S. H., & Hadibarata, T. (2020). Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review. *Water, Air, & Soil Pollution*. 1, 23-47.
3. Rajendran, S., Priya, T., Khoo, K. S., Hoang, T. K., Ng, H. S., Munawaroh, H. S. H., Karaman, C., Orooji, Y., & Show, P. L. (2022). A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. *Chemosphere*. 287, 132-369.
4. Wang, L., Rinklebe, J., Tack, F. M., & Hou, D. (2021). A review of green remediation strategies for heavy metal contaminated soil. *Soil Use and Management*. 37, 936-963.
5. Rezaei, H., Shahbazi, K., Saadat, S., & Bazargan, K. (2022). Investigation of Soil Pollution and Agricultural Crops in Iran, *Journal of land Management (Soil and Water Sci.)* 10, 1.
6. Zhang, H., Yuan, X., Xiong, T., Wang, H., & Jiang, L. (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. *Chemical Engineering Journal*. 398, 125657.
7. Abbasali, M., Gholipouri, A., Tobeh, A., Khoshkholgh Sima, N. A., & Ghalebi, S. (2017). Identification of drought tolerant genotypes in the Sesame (*Sesamum indicum* L.) Collection of National Plant Gene Bank of Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 48, 275-289.
8. Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects. Trace metals in the environment-new approaches and recent advances. IntechOpen.
9. Loni, F., & Khoshkholgh Sima, N. A. (2023). Security agriculture based on plant breeding in non-conventional saline lands. *Journal of Biosafety*, 15, 0-0.
10. Zaghloul, M. (2020). Phytoremediation of heavy metals principles, mechanisms, enhancements with several efficiency enhancer methods and perspectives: A Review. *Middle East J.* 9, 186-214.
11. Kaushik, S., Alatawi, A., Djiwanti, S. R., Pande, A., Skotti, E., & Soni, V. (2021). Potential of extremophiles for bioremediation. *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment*. 1, 293-328.
12. DalCorso, G., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., & Furini, A. (2019). Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International journal of molecular sciences*. 20, 3412.
13. Bharagava, R. N., Purchase, D., Saxena, G., & Mulla, S. I. (2019). Applications of metagenomics in microbial bioremediation of pollutants: from genomics to environmental cleanup. Microbial diversity in the genomic era. *Elsevier*, pp. 459-477.
14. Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment. *Toxics*. 10, 484.
15. Jha, A., Narasimhaiah, N. K., Sreekumar, N., Babu, P. A. M., Umashankar, P., Mohan, S., Mahesh, U., Sharief, N. A., Ghatole, K. P., & Dey, P. (2022). Biofiltration techniques in the remediation of hazardous inorganic and organic contaminants. An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs). *Elsevier*, pp. 137-154.
16. Mao, X., Yang, Y., Guan, P., Geng, L., Ma, L., Di, H., Liu, W., & Li, B. (2022). Remediation of organic amendments on soil salinization: Focusing on the relationship between soil salts and microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 239, 113616.

17. Sarkar, B., Gupta, A. M., & Mandal, S. (2021). Insights from the comparative genome analysis of natural rubber degrading *Nocardia* species. *Bioinformation*. 17, 880.
18. Song, L., Niu, X., Zhang, N., & Li, T. (2021). Effect of biochar-immobilized *Sphingomonas* sp. PJ2 on bioremediation of PAHs and bacterial community composition in saline soil. *Chemosphere*. 279, 130427.
19. Medfu Tarekegn, M., Zewdu Salilih, F., & Ishetu, A. I. (2020). Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*. 6, 1783174.
20. Dangi, A. K., Sharma, B., Hill, R. T., & Shukla, P. (2019). Bioremediation through microbes: systems biology and metabolic engineering approach. *Critical reviews in biotechnology*, 39, 79-98.
21. Garg, S. K., & Tripathi, M. (2017). Microbial strategies for discoloration and detoxification of azo dyes from textile effluents. *Research Journal of Microbiology*, 12, 1-19.
22. Ebadi, A., Ghavidel, A., Sima, N. A. K., Heydari, G., & Ghaffari, M.R. (2021b). New strategy to increase oil biodegradation efficiency by selecting isolates with diverse functionality and no antagonistic interactions for bacterial consortia. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 106315.
23. Muthusaravanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., Gayathri, V., & Al-Duaij, O. K. (2018). Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. *Environmental chemistry letters*. 16, 1339-1359.
24. Sima, N. A. K., Ebadi, A., Reiahisamani, N., & Rasekh, B. (2019). Bio-based remediation of petroleum-contaminated saline soils: Challenges, the current state-of-the-art and future prospects. *Journal of environmental management*. 250, 109476.
25. Sales da Silva, I. G., Gomes de Almeida, F. C., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Casazza, A. A., Converti, A., & Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*. 13, 4664.
26. Ebadi, A., Ghavidel, A., Sima, N. A. K., Heydari, G., & Ghaffari, M. R. (2021a). Corrigendum to 'New strategy to increase oil biodegradation efficiency by selecting isolates with diverse functionality and no antagonistic interactions for bacterial consortia' [*J. Environ. Chem. Eng.*] *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9, 106535.
27. Komaresofla, B. R., Alikhani, H. A., Etesami, H., & Khoshkholgh-Sima, N. A. (2019). Improved growth and salinity tolerance of the halophyte *Salicornia* sp. by co-inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria. *Applied Soil Ecology*, 138, 160-170.
28. Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., & Wassie, M. (2017). The role of microorganisms in bioremediation-A review. *Open Journal of Environmental Biology*, 2, 38-46.
29. Alegbeleye, O. O., Opeolu, B. O., & Jackson, V. A. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons: a critical review of environmental occurrence and bioremediation. *Environmental management*. 60, 758-783.
30. Kebede, G., Tafese, T., Abda, E. M., Kamaraj, M., & Assefa, F. (2021). Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: mechanisms and impacts. *Journal of Chemistry*. 2021, 1-17.
31. Fragkou, E., Antoniou, E., Daliakopoulos, I., Manios, T., Theodorakopoulou, M., & Kalogerakis, N. (2021). In situ aerobic bioremediation of sediments polluted with petroleum hydrocarbons: a critical review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9, 1003.
32. Mupambwa, H. A., & Mnkeni, P. N. S. (2018). Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 10577-10595.

33. Cycoń, M., Mroziak, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2017). Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere*. 172, 52-71.
34. Hesham, A.E. L., Alrumman, S. A., & ALQahtani, A. D. S. (2018). Degradation of toluene hydrocarbon by isolated yeast strains :molecular genetic approaches for identification and characterization. *Russian Journal of Genetics*. 54, 933-943.
35. Hussain, S., Arshad, M., Saleem, M., & Khalid, A. (2007). Biodegradation of α - and β -endosulfan by soil bacteria. *Biodegradation*. 18, 731-740.
36. Sayqal, A., & Ahmed, O. B. (2021). Advances in heavy metal bioremediation: An overview. *Applied bionics and biomechanics* 2021.
37. Bhandari, S., Poudel, D. K., Marahatha, R., Dawadi, S., Khadayat, K., Phuyal, S., Shrestha, S., Gaire, S., Basnet, K., & Khadka, U. (2021). Microbial enzymes used in bioremediation. *Journal of Chemistry*. 2021, 1-17.
38. Priyadarshane, M., & Das, S. (2021). Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9, 104686.
39. Bell, C. H., Wong, J., Parsons, K., Semel, W., McDonough, J., & Gerber, K. (2022). First Full-Scale In Situ Propane Biosparging for Co-Metabolic Bioremediation of 1, 4-Dioxane. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 42, 54-66.
40. Sattar, S., Hussain, R., Shah, S. M., Bibi, S., Ahmad, S. R., Shahzad, A., Zamir, A., Rauf, Z., Noshad, A., & Ahmad, L. (2022). Composition, impacts, and removal of liquid petroleum waste through bioremediation as an alternative clean-up technology: A review. *Heliyon*.
41. Ebadi, A., Sima, N. A. K., Olamaee, M., Hashemi, M., & Nasrabadi, R. G. (2018b). Remediation of saline soils contaminated with crude oil using the halophyte *Salicornia persica* in conjunction with hydrocarbon-degrading bacteria. *Journal of environmental management*. 219, 260-268.
42. Ebadi, A., Olamaee, M., Khoshkholgh Sima, N. A., Ghorbani Nasrabadi, R., & Hashemi, M. (2018a). Isolation and characterization of biosurfactant producing and crude oil degrading bacteria from oil contaminated soils. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*. 42, 1149-1156.
43. Ebadi, A., Sima, N. A. K., Olamaee, M., Hashemi, M., & Nasrabadi, R. G. (2017). Effective bioremediation of a petroleum-polluted saline soil by a surfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* consortium. *Journal of advanced research*. 8, 627-633.
44. Raimondo, E. E., Aparicio, J. D., Bigliardo, A. L., Fuentes, M. S., & Benimeli, C. S. (2020). Enhanced bioremediation of lindane-contaminated soils through microbial bioaugmentation assisted by biostimulation with sugarcane filter cake. *Ecotoxicology and environmental safety*. 190, 110143.
45. Khodabakhshi Soureshjani, M., & Zytner, R. G. (2023). Developing a Robust Bioventing Model. *Mathematical and Computational Applications*. 28, 76.
46. Anekwe, I. M. S., & Isa, Y. M. (2021). Comparative evaluation of wastewater and bioventing system for the treatment of acid mine drainage contaminated soils. *Water-Energy Nexus*, 4, 134-140.
47. Katyal, A. K. (2022). Improving separate phase hydrocarbon recovery with bioslurping. *Hazardous and Industrial Waste Proceedings*, 29th Mid-Atlantic Conference. CRC Press, pp. 622-631.
48. Varshney, K. (2019). Bioremediation of pesticide waste at contaminated sites. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 6, 128-134.
49. Abena, M. T. B., Li, T., Shah, M. N., & Zhong, W. (2019). Biodegradation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation. *Chemosphere*. 234, 864-874.

50. Alishahi, F., Alikhani, H. A., Khoshkholgh-Sima, N. A., & Etesami, H. (2020). Mining the roots of various species of the halophyte *Suaeda* for halotolerant nitrogen-fixing endophytic bacteria with the potential for promoting plant growth. *International Microbiology*, 23, 415-427.
51. Sutherland, D. L., & Ralph, P. J. (2019). Microalgal bioremediation of emerging contaminants-Opportunities and challenges. *Water research* 164, 114921.
52. Jaain, R., & Patel, A. (2019). Bioremediation of Gurugram-Faridabad Dumpsite at Bandhwari. *Waste Valorisation and Recycling: 7th IconSWM-ISWMAW 2017*, 2, 433-440.
53. Zhang, K., Wang, S., Guo, P., & Guo, S. (2021). Characteristics of organic carbon metabolism and bioremediation of petroleum-contaminated soil by a mesophilic aerobic biopile system. *Chemosphere*. 264, 128521.
54. Chen, M., Xu, P., Zeng, G., Yang, C., Huang, D., & Zhang, J. (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs. *Biotechnology advances*. 33, 745-755.
55. Ren, X., Zeng, G., Tang, L., Wang, J., Wan, J., Wang, J., Deng, Y., Liu, Y., & Peng, B. (2018). The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation. *Waste management*. 72, 138-149.
56. Mupambwa, H. A., Haulofu, M., Nciizah, A. D., & Mnkeni, P. N. (2022). Vermicomposting technology: A sustainable option for waste beneficiation. *Handbook of Waste Biorefinery: Circular Economy of Renewable Energy*. Springer, pp. 583-600.
57. Iturbe-Espinoza, P., Brown, D. M., Weedon, J. T., Braster, M., Brandt, B. W., Bonte, M., & van Spanning, R. J. (2023). Microbial communities associated with landfarming amendments during bioremediation of crude oil in Niger Delta soils. *Applied Soil Ecology*. 191, 105058.
58. Lukwambe, B., Zhao, L., Nicholaus, R., Yang, W., Zhu, J., & Zheng, Z. (2019). Bacterioplankton community in response to biological filters (clam, biofilm, and macrophytes) in an integrated aquaculture wastewater bioremediation system. *Environmental Pollution*. 254, 113035.
59. Yang, L., Li, X., Chu, Z., Ren, Y., & Zhang, J. (2014). Distribution and genetic diversity of the microorganisms in the biofilter for the simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from simulated groundwater. *Bioresource Technology*. 156, 384-388.
60. Maurya, K. L., Swain, G., Sonwani, R. K., Verma, A., & Singh, R. S. (2021). Bioremediation of Congo red in an anaerobic moving bed bioreactor: Process optimization and kinetic modeling. *Bioresource Technology Reports*. 16, 100843.
61. Noori, F., Etesami, H., Zarini, H. N., Khoshkholgh-Sima, N. A., Salekdeh, G. H., & Alishahi, F. (2018). Mining alfalfa (*Medicago sativa* L.) nodules for salinity tolerant non-rhizobial bacteria to improve growth of alfalfa under salinity stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 162, 129-138.
62. Farzi, A., Borghei, S. M., & Vossoughi, M. (2017). The use of halophytic plants for salt phytoremediation in constructed wetlands. *International journal of phytoremediation*. 19, 643-650.
63. Malik, G., Arora, R., Chaturvedi, R., & Paul, M. S. (2021). Implementation of genetic engineering and novel omics approaches to enhance bioremediation: a focused review. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. pp. 1-8.
64. Chandran, H., Meena, M., & Sharma, K. (2020). Microbial biodiversity and bioremediation assessment through omics approaches. *Frontiers in Environmental Chemistry*. 1, 570326.
65. Shah, M. P. (2020). *Microbial bioremediation & biodegradation*. Springer.

66. Abdullah, K., Wilkins, D., & Ferrari, B. C. (2023). Utilization of-Omic technologies in cold climate hydrocarbon bioremediation: a text-mining approach. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1113102.
67. López, A. M. Q., & dos Santos Silva, A. L. (2023). Proteomics and Bioremediation Using Prokaryotes. *Genomics Approach to Bioremediation: Principles, Tools, and Emerging Technologies*. pp. 485-502.
68. Vázquez-Núñez, E., Molina-Guerrero, C. E., Peña-Castro, J. M., Fernández-Luqueño, F., & de la Rosa-Álvarez, M. G. (2020). Use of nanotechnology for the bioremediation of contaminants: A review. *Processes*. 8, 826.
69. Kahrizi, H., Bafkar, A., & Farasati, M. (2016). Effect of nanotechnology on heavy metal removal from aqueous solution. *Journal of Central South University*. 23, 2526-2535.
70. Mallikarjunaiah, S., Pattabhiramaiah, M., & Metikurki, B. (2020). Application of nanotechnology in the bioremediation of heavy metals and wastewater management. *Nanotechnology for food, agriculture, and environment*. pp. 297-321.

