

# **Fungal Bioremediation and AI-Driven Strategies: Innovative Approaches for Mitigating Heavy Metal and Wastewater Pollution**

**Amirhossein Khadem\* , Fatemeh Safari , Sana Hosseini Vasegh**

Department of Microbiology, Ard.C., Islamic Azad University, Ardabil, Iran

## **Abstract**

Environmental contamination from untreated wastewater and heavy metals presents major hazards for human health and ecosystems. It has that pollutants from numerous industrial operations constitute major contamination for aquatic and soil systems. Once toxic materials enter the soil, they constantly absorb, break down, move, and modification within the physical, chemical, and biological parts of the soil. The soil receives a lot of pesticides, chlorophenols, heavy metals, oil and related products, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and other compounds all of which pose a serious threat to human health and the environment. Employing fungi or their components to clean environmental pollutants, mycoremediation has proven to be a cheap, environmentally benign, and efficient approach of environmental restoration including organic, inorganic, and emergent chemicals (antibiotics, pharmaceuticals). *Trichoderma viride* and *Trichoderma harzianum* are multi-metal-adsorptive fungi. They can tolerate cadmium, lead, copper, zinc, nickel, and iron. Exploiting the natural metabolic capabilities of fungi to break down and detoxify a broad spectrum of pollutants, fungal bioremediation is a promising and sustainable method of addressing environmental contamination. To combat natural contamination caused by overwhelming metals and untreated wastewater manufactured insights or AI is one of the ideal apparatuses to alter natural conditions. AI algorithms have become more and more popular in environmental research since they can handle huge and complex data, extract features, spot patterns, and offer prompt answers to environmental issues. However, realizing the full potential of AI faces hurdles such as a shortage of specialized AI experts in the environmental sector and challenges related to data access, control, and privacy. Despite these challenges, the future of AI in environmental monitoring looks promising. Advances in AI algorithms, data collection methods, and computing power are believed to further refine accuracy and efficacy in monitoring and managing pollution.

**Keyword:** Fungal Bioremediation, AI , polycyclic aromatic hydrocarbons , Heavy Metal , Wastewater Pollution

زیست پالایی قارچی و استراتژی‌های مبتنی بر هوش مصنوعی: رویکردهای نوآورانه برای کاهش آلودگی فلزات سنگین و

## فاضلاب

امیرحسین خادم، فاطمه صفری، ثنا حسینی واثق

گروه میکروبیولوژی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

## چکیده

آلودگی محیط‌زیست ناشی از فاضلاب‌های تصفیه‌نشده و فلزات سنگین، خطرات عمده‌ای برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد می‌کند و آلاینده‌های ناشی از بسیاری از فعالیت‌های صنعتی به‌عنوان منابع اصلی آلودگی سیستم‌های آبی و خاکی شناخته می‌شوند. وقتی مواد سمی وارد خاک می‌شوند، به‌طور مداوم جذب، تجزیه، جابجا و دستخوش تغییرات در اجزای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شوند. خاک مقادیر زیادی آفت‌کش، کلروفنول‌ها، فلزات سنگین، نفت و محصولات وابسته، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و ترکیبات دیگر را دریافت می‌کند که همه آن‌ها تهدید جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. استفاده از قارچ‌ها یا اجزای آن‌ها برای پاکسازی آلاینده‌های محیطی، به‌عنوان بیورمدیشن قارچی، به‌عنوان روشی کم‌هزینه، سازگار با محیط‌زیست و کارآمد برای بازسازی محیطی، شامل ترکیبات آلی، غیرآلی و شیمیایی نوظهور (مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و داروها) به اثبات رسیده است. *Trichoderma viride* و *Trichoderma harzianum* قارچ‌هایی با قابلیت جذب چند فلز هستند و توان تحمل فلزات کادمیم، سرب، مس، روی، نیکل و آهن را دارند. با بهره‌گیری از توانایی‌های متابولیک طبیعی قارچ‌ها برای تجزیه و سم‌زدایی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها، بیورمدیشن قارچی روشی امیدوارکننده و پایدار برای مقابله با آلودگی محیطی است. برای مقابله با آلودگی‌های طبیعی ناشی از فلزات غیراستاندارد و فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، بینش‌ها و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) از جمله ابزارهای ایده‌آل برای تغییر شرایط طبیعی محسوب می‌شوند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پژوهش‌های محیط‌زیستی روزبه‌روز محبوب‌تر شده‌اند، زیرا قادرند داده‌های حجیم و پیچیده را مدیریت کنند، ویژگی‌ها را استخراج کنند، الگوها را شناسایی کرده و پاسخ‌های سریع به مسائل محیطی ارائه دهند. با این حال، استفاده کامل از پتانسیل هوش مصنوعی با موانعی مانند کمبود متخصصان AI در حوزه محیط‌زیست و چالش‌های مرتبط با دسترسی، کنترل و حریم داده‌ها مواجه است. با وجود این چالش‌ها، آینده هوش مصنوعی در پایش محیط‌زیست امیدوارکننده به نظر می‌رسد. پیشرفت در الگوریتم‌های AI، روش‌های جمع‌آوری داده و توان محاسباتی، انتظار می‌رود دقت و کارایی در پایش و مدیریت آلودگی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

**کلمات کلیدی:** زیست پالایی قارچی، هوش مصنوعی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، فلزات سنگین، فاضلاب

## References

- Akpasi, Stephen Okiemute, Ifeanyi Michael Smarte Anekwe, Emmanuel Kweinor Tetteh, Ubani Oluwaseun Amune, Hassan Oriyomi Shoyiga, Thembisile Patience Mahlangu, and Sammy Lewis Kiambi. "Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—a Review." *Applied Sciences* 13, no. 8 (2023): 4978. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/4978>.
- Ayilara, Modupe S., and Olubukola O. Babalola. "Bioremediation of Environmental Wastes: The Role of Microorganisms." Review, *Frontiers in Agronomy* Volume 5 - 2023 (2023-May-30 2023). <https://dx.doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>.
- Chen, Ming, Piao Xu, Guangming Zeng, Chunping Yang, and Danlian Huang. "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 (05/22 2015). <https://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003>.
- Dinakarkumar, Yuvaraj, Gnanasekaran Ramakrishnan, Koteswara Reddy Gujjula, Vishali Vasu, Priyadharishini Balamurugan, and Gayathri Murali. "Fungal Bioremediation: An Overview of the Mechanisms, Applications and Future Perspectives." *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6 (2024/01/01/ 2024): 293-302. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.002>.
- Husain, Raja, Nitin Vikram, Sonika Pandey, Kasinam Doruk, Sonbeer Chack, Atik Ahamad, Lipi Rina, Varun Dhiman, Kunvar Kumar, Deepak Kumar, Anurag Mishra, and Touseef Hussain. "Soil-Poor Challenges and Its Measures for Bioremediation." 2025.
- Kumar, V., and S. K. Dwivedi. "Mycoremediation of Heavy Metals: Processes, Mechanisms, and Affecting Factors." *Environ Sci Pollut Res Int* 28, no. 9 (Mar 2021): 10375-412. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-11491-8>.
- Olawade, David B., Ojima Z. Wada, Abimbola O. Ige, Bamise I. Egbewole, Adedayo Olojo, and Bankole I. Oladapo. "Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions." *Hygiene and Environmental Health Advances* 12 (2024/12/01/ 2024): 100114. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>.
- Ossai, Innocent Chukwunonso, Aziz Ahmed, Auwalu Hassan, and Fauziah Shahul Hamid. "Remediation of Soil and Water Contaminated with Petroleum Hydrocarbon: A Review." *Environmental Technology & Innovation* 17 (2020): 100526.

Siddique, Kashif R., Debajyoti Bose, Riya Bhattacharya, Raul Villamarin Rodriguez, and Aritra Ray. "Artificial Intelligence Driven Bioinformatics for Sustainable Bioremediation: Integrating Computational Intelligence with Ecological Restoration." 10.1039/D5VA00240K, *Environmental Science: Advances* (2025). <https://dx.doi.org/10.1039/D5VA00240K>.

Wartell, Brian, Michel Boufadel, and Lucia Rodriguez-Freire. "An Effort to Understand and Improve the Anaerobic Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons: A Literature Review." *International Biodeterioration & Biodegradation* 157 (2021): 105156.