مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

نقش قارچ‌ها در زیست‌پالایی آلاینده‌ها

نوع مقاله: مروری

زهرا میرسلیمانی[۱]، زینب بهمنی[۲*]

۱-استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

۲- استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

z.bahmani@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱

صفحه ۳۰-۱۷

چکیده

صنعتی شدن کشورهای در حال توسعه جهان و رشد جمعیت، منجر به تخریب محیط زیست در مقیاس گسترده شده است. به دلایل فوق، مدیریت مواد شیمیایی، آلاینده‌ها، پسماندهای جامد، ترکیبات مقاوم در برابر تجزیه و فلزات سنگین، به دلایل اصلی نگرانی زیست محیطی تبدیل شده است. زیست‌پالایی به‌عنوان روشی مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست معرفی شده است. در این روش با بکارگیری فرآیندهای زیستی به‌ویژه در آب و خاک آلوده، ترکیبات سمی و مقاوم به ترکیبات غیرسمی تبدیل می‌شوند. در این فناوری میکروب‌های مفید با استفاده از واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی مناسب که بخشی از فرآیند متابولسیم آن‌هاست منجر به تخریب و حذف آلاینده‌ها از محیط زیست می‌شوند. در این میان، قارچ‌ها به دلیل مرفولوژی خاص و توانایی تولید متابولیت‌های ثانویه نقش مهمی به‌عنوان تجزیه‌کننده (زیست‌پالایی قارچی) در محیط زیست دارند، بنابراین آن‌ها گزینه بسیار مناسبی برای پاکسازی محیط زیست به شمار می‌روند. در این فناوری قارچ‌ها از طریق فیزیکی و شیمیایی با آلاینده‌ها برهمکنش ایجاد می‌کنند و در نهایت منجر به ایجاد تغییرات ساختاری یا فروپاشی آلاینده‌ها می‌شوند. نظر به اهمیت این موضوع، در این مقاله تلاش شده است تا از جنبه‌های گوناگون به این فناوری دوست‌دار طبیعت پرداخته شود.

واژه‌های کلیدی: تجزیه زیستی، گونه‌های قارچی، محیط زیست.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

مقدمه

زیست‌پالایی یا پاکسازی زیستی فرآیندی سازگار با محیط زیست است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها آلاینده‌های مضر موجود در طبیعت سم‌زدایی می‌شود. میکروارگانیسم‌هایی مانند قارچ، باکتری یا استفاده ترکیبی از آن‌ها می‌تواند آلاینده‌های سمی را به آب، دی اکسید کربن، نمک‌های معدنی و سایر محصولاتی که سمیت کمتری دارند، تبدیل کنند (Mohamadi-Sichani et al. 2019). در سال‌های اخیر، تلاش‌های پژوهشگران برای دستیابی به رویکردی پایدار برای تصفیه و احیای زیستگاه‌های آلوده از طریق تجزیه زیستی میکروبی بیشتر شده است. پاکسازی آب و خاک آلوده با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های معمول یک رویکرد طبیعی، مقرون به صرفه و پایدار است (Kumar and Dwivedi, 2021).

زیست‌پالایی قارچی (mycoremediation) یک روش زیست‌پالایی است که از قارچ‌ها برای از بین بردن آلودگی محیطی استفاده می‌کنند. قارچ‌ها به دلیل مرفولوژی خاص و توانایی تولید متابولیت‌های ثانویه نقش مهمی به‌عنوان تجزیه‌کننده و همزیست در محیط زیست دارند، بنابراین آن‌ها گزینه‌ی بسیار مناسبی برای پاکسازی محیط زیست به شمار می‌روند. مهم‌ترین گروه از قارچ‌ها که در زیست‌پالایی نقش دارند قارچ‌های میکوریزآربوسکولار هستند که البته از مهم‌ترین عوامل ایجادکننده همزیستی در خاک هستند، از این رو اهمیت اقتصادی و اکولوژیکی فروانی دارند (Smith and Read, 2008). قارچ‌های مایکوریز آربوسکولار به‌صورت همزیست اجباری با ریشه گیاهان ارتباط برقرار می‌کنند و از طریق هیف‌های خود مواد موردنیاز آن‌ها را فراهم می‌کنند، از طرف دیگر این قارچ‌ها برای رشد خود به ریشه و سلول‌های گیاه نیاز دارند، در نهایت همانطوری‌که گیاهان و قارچ‌ها با هم رشد می‌کنند هر دو از ارتباط با یکدیگر سود می‌برند (Zhang et al. 2019). امروزه از روش‌های مختلف زیست‌پالایی برای تبدیل مواد آلی سمی موجود در آفت‌کش‌ها، زباله‌های صنعتی و لکه‌های نفتی به ترکیبات بی‌ضرر استفاده می‌شود و این هدف نهایی فناوری زیست‌پالایی است. به‌عنوان مثال فلزات سنگین و کاتیون‌های رادیواکتیو توسط زیست‌پالایی گیاهی (phytoremediation) یا زیست‌پالایی قارچی حذف می‌شوند (Ceci et al. 2019).

سازوکارهای زیست‌پالایی

زیست‌پالایی یک سازوکار تخریب زیستی است که با استفاده از ظرفیت‌های میکروبی، غلظت و سمیت انواع زیادی از آلاینده‌ها را به حداقل می‌رساند (Kumar et al. 2021). میکروارگانیسم‌ها

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

از جمله قارچ‌ها از طریق فیزیکی و شیمیایی با آلاینده‌ها برهمکنش ایجاد می‌کنند و در نهایت منجر به ایجاد تغییرات ساختاری و یا فروپاشی کامل آلاینده‌ها می‌شوند (Gao et al. 2022). این میکروارگانیسم‌ها برای رشد خود از آلاینده‌های آلی استفاده می‌کنند و همچنین باعث افزایش مواد مغذی مانند نیتروژن، فسفر و مواد ریزمغذی مانند سولفور و عناصر کمیاب می‌شوند (Lacerda et al. 2019). علاوه‌بر این انرژی خود را نیز از طریق واکنش‌های اکسایش و کاهش به دست می‌آورند (Friesen. 2013). میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها آنزیم‌های متابولیکی ترشح می‌کنند که مواد آلی پیچیده‌ی اطراف را تجزیه کرده و باعث هضم آسان‌تر این مواد می‌شوند (Segura and Ramos, 2013). چنین آنزیم‌هایی به‌طور معمول غیراختصاصی هستند و بر روی بستره‌های مختلف موثر است (Neifar et al. 2015). گونه‌های قارچی مختلف آلاینده‌ها را به ترکیبات ساده‌تر مانند H_2O و CO_2 تبدیل کرده و در نهایت به‌عنوان منابع کربن برای رشد و تولید مثل استفاده می‌کنند (Kumar et al. 2021). بیشتر موجودات زنده از اکسیژن به‌عنوان گیرنده الکترون استفاده می‌کنند. تجزیه مواد آلی به ملکول‌های ساده‌تر در حضور اکسیژن انجام می‌گیرد، این فرآیند تنفس هوازی نامیده می‌شود. در طول تکامل بعضی از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌ها به ملکول‌های ساده‌تر، به اکسیژن نیاز ندارند و طی فرآیند تنفس بی‌هوازی برای تجزیه آلاینده‌ها از نیترات و سولفات استفاده می‌کنند که محصولات نهایی گاز نیتروژن و سولفید هیدروژن است. لازم به ذکر است که بیشتر روندهای پاکسازی زیستی هوازی هستند زیرا سرعت پاکسازی زیستی ترکیبات آلی در سیستم‌های هوازی بسیار بیشتر از فرآیندهای بی‌هوازی است (Ceci et al. 2019).

به‌طور کلی در زیست‌پالایی رویکردهای به کار برده شده به دو گروه در محل (*in situ*) و خارج از محل (*ex situ*) تقسیم می‌شوند که رویکردهای خارج از محل شامل کمپوست‌سازی (composting)، بیوپیل (biopiling)، و شخم‌زدن زمین (land farming) و رویکردهای در محل نیز شامل تحریک زیستی (bio-stimulation)، تهویه زیستی (bioventing)، تجمع زیستی (bioaccumulation) و زیست‌پالایی قارچی هستند (Ulrici. 2000; Akcil et al. 2015). که در ادامه به‌طور مختصر به هر کدام از آنها پرداخته خواهد شد.

کمپوست‌سازی

کمپوست‌سازی از استراتژی‌های قدیمی است که در مقیاس‌های مختلف قابل انجام است و از طریق فعالیت میکروارگانیسم‌هایی مانند کرم‌های خاکی، نماتدها و حشرات خاکی مانند کنه‌ها، مورچه‌ها و سوسک‌ها که به‌طور طبیعی در خاک هستند، انجام

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

می‌شود (Kumar et al. 2011). در طی فرآیند تخریب، در اثر فعالیت میکروب‌ها گرما ایجاد شده که منجر به افزایش دما می‌شود و درنتیجه باعث افزایش حلالیت بیشتر آلاینده‌ها و فعالیت متابولیکی در کمپوست‌ها می‌شود. کمپوست‌سازی هم به صورت هوازی و هم بی‌هوازی قابل انجام است اما کارآمدترین شکل آن به صورت هوازی است که در کمترین زمان کمپوست نهایی تولید می‌شود(Huang et al. 2009).

بیوپیل

یکی از رویکردهای خارج از محل زیست‌پالایی Biopiles است که به توده‌زیستی نیز معروف است و شامل یک بستر تصفیه، سیستم هوادهی، سیستم آبیاری و سیستم جمع‌آوری شیرآبه‌های آلوده است. این نوع رویکرد بیشتر برای کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی در خاک‌های حفاری شده استفاده می‌شود و برای تخریب مناسب این نوع آلاینده‌ها کنترل رطوبت، گرما، مواد مغذی، اکسیژن و pH ضروری است (Neill et al. 1999).

شخم‌زدن زمین

رویکرد ساده و کم‌هزینه زیست‌پالایی، کشاورزی زمین است که در آن خاک آلوده حفاری شده، روی بستر آماده پخش شده و به صورت دوره‌ای تا زمانی‌که آلاینده‌ها تجزیه می‌شوند خاک ورزی می‌شود و به‌طور عمده در عمق ۱۰ تا ۳۵ سانتی‌متری خاک انجام می‌شود. به‌طور کلی هدف از انجام این رویکرد افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های تخریب‌گر زیستی بومی و تسهیل تجزیه هوازی آلاینده‌ها است. این رویکرد بیشتر برای تخریب آفت‌کش‌ها و خاک‌های آلوده به مواد نفتی استفاده می‌شود (Wedemeyer. 1967).

تحریک زیستی

دراین نوع رویکرد به‌منظور افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی، مواد مغذی خاص مانند منابع کربن، نیتروژن، فسفر و اکسیژن به خاک و آب‌های آلوده اضافه شده (Rigas et al. 2007) و با تامین مکمل‌های رشد و مواد معدنی باکتری‌ها و قارچ‌های موجود در محل آلودگی را تحریک و تخریب زیستی را افزایش می‌دهند (Kumar. 2011). هیدروکربن‌های نفتی و سولفات آلاینده‌هایی هستند که به سرعت توسط تحریک زیستی تجزیه می‌شوند (Marzan et al. 2017).

تهویه زیستی

در این رویکرد از زیست‌پالایی که در دسته‌ی رویکردهای در محل، قرار می‌گیرد، اکسیژن و مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر به محل آلوده تزریق شده و در نتیجه اکسیژن کافی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌شود. یکی از عوامل مهم در اثربخشی تهویه زیستی دمای بالا است. این روش به‌طور عمده برای حذف آلاینده‌هایی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

مانند نفت، بنزین و گازوئیل استفاده می‌شود (Rigas et al. 2007).

تجمع زیستی

در روش تجمع زیستی، میکروارگانیسم‌هایی با داشتن قابلیت متابولیکی خاص برای افزایش تخریب آلاینده‌ها به محل آلوده اضافه می‌شوند. در مکان‌هایی که خاک و آب‌های زیرزمینی با ترکیباتی مانند تتراکلرو اتیلن و تری کلرواتیلن آلوده شده‌اند از تجمع‌زیستی استفاده می‌شود تا این آلاینده‌ها به ترکیبات غیرسمی اتیلن و کلراید تجزیه شوند. به‌طور کلی هدف این رویکرد، تصفیه فاضلاب شهری و حذف فلزات سنگین از آلاینده‌ها است (Neill et al. 1999).

زیست‌پالایی قارچی

زیست‌پالایی قارچی رویکردی اقتصادی، سازگار با محیط زیست و موثر برای مبارزه با مشکل روزافزون آلودگی خاک و آب است. به دلایلی از قبیل رشد سریع، شبکه ریسه‌ای گسترده، تولید آنزیم‌های لیگنینولیتیک خارج‌سلولی، مقاومت در برابر فلزات سنگین و نوسانات دما، رطوبت و pH، قارچ‌ها گزینه مناسبی برای پاکسازی آلاینده‌های محیطی هستند (Khan et al. 2019). در این رویکرد قارچ‌ها با شکستن آلاینده‌های محیطی آن‌ها را به موادی با سمیت کمتر یا غیرسمی تبدیل می‌کنند (Kumar et al. 2018). زیست‌پالایی قارچی بیشتر در منطقه هوازی خاک که ریسه‌های قارچ‌ها قادر به رشد هستند انجام می‌گیرد. قارچ‌ها به‌دلیل تولید و ترشح آنزیم‌های مختلف قادر به تجزیه‌ی آلاینده‌های مختلف هستند (Jang et al. 2009).

قارچ‌های لیگنینولیتیک مانند *Polyporus* sp. و *Phanaerochaete chrysosporium* در زیست‌پالایی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا این قارچ‌ها می‌توانند طیف وسیعی از آلاینده‌های سمی را تخریب کنند (Birhanu and Tesfaye, 2020). پژوهش‌ها نشان داده است که قارچ‌های عامل پوسیدگی سفید از طریق میسلیوم ها و ترشح آنزیم‌های اکسیداتیو هیدروکربن‌های نفتی را تجزیه می‌کنند. علاوه‌بر این استفاده از گونه *Pleurotos pulmonarius* برای حذف آلاینده‌های خاک مانند بنزین، گازوئیل و نفت بسیار موفقیت آمیز بوده است به‌طوری که بعد از ۶۲ روز تلقیح میسلیوم‌های این قارچ قادر به حذف ۶۷ درصد از هیدروکرین‌های نفتی خاک‌های آلوده شدند (Njoku et al. 2016).

گزارش‌هایی از قارچ‌های گروه بازیدیومیست‌ها مانند *Tinea versicolor* و عوامل پوسیدگی سفید ریشه مانند *Pleurotus ostreatus* وجود دارد که توانایی تجزیه هیدروکربن‌های آرماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) موجود در ضایعات کشاورزی صنعتی را دارند (Rosales et al. 2013). در مطالعه‌ای مشخص شده است که قارچ‌های

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

Aspergillus و *Penicillium* توانایی زیست‌پالایی پساب‌های صنعت شکرسازی، نساجی و صنعت چرم‌سازی را دارند (Huang and Liu, 2014; Reya et al. 2013). همچنین گزارش شده است هیدروکربن‌های نفتی موجود در خاک‌های آلوده به بنزین و گازوئیل به‌طور موثری توسط گونه‌های قارچی *A. niger* و *P. chrysosporium* زیست‌پالایی می‌شوند (Maruthi et al. 2013). بر اساس یافته‌ها ترکیبات مقاوم می‌توانند آثار زیانباری بر سلامت انسان و محیط زیست داشته است. در میان ترکیبات مقاوم سمی هیدروکربن‌های آرماتیک چند حلقه‌ای ترکیبات آلی پیچیده با پایداری بسیار بالا در خاک هستند که توسط قارچ‌های *Aspergillus curvularia*، *Drechslera*، *Fusarium*، *Lasiodiplodia*، *Mucor*، *Penicillium*، *Rhizopus* و *Trichoderma* زیست‌پالایی می‌شوند (Deshmukh et al. 2016). مواد شیمیایی مورد استفاده در صنایع رنگرزی برای میکروارگانیسم‌های آبزی مانند جلبک‌ها و ماهی‌ها بسیار سمی هستند و در نهایت این ترکیبات وارد زنجیره غذایی شده و اختلالات فیزیولوژیکی مهمی در بدن انسان ایجاد می‌کنند (Gao et al. 2020). گونه‌های قارچی *Aspergillus versicolor* و *Rhizopus arrhizus* در زیست‌پالایی این ترکیبات نقش بسیار موثری دارند (Kumar and Dwivedi, 2021).

پتانسیل زیست‌پالایی قارچ‌ها

قارچ‌ها به دلیل مرفولوژی خاص و ظرفیت متابولیکی متنوع نقش مهمی به‌عنوان تجزیه‌کننده و همزیست در اکوسیستم‌های مختلف مانند خاک و زیستگاه‌های آبی دارند (Zhang et al. 2019). همچنین گزارش‌هایی از بقای این میکروارگانیسم‌ها در تاسیسات تصفیه پساب وجود دارد .توانایی بقا در زیستگاه‌های مختلف و ترشح انبوهی از آنزیم‌ها منجر به انتخاب قارچ‌ها به‌عنوان گزینه‌ی مناسبی برای زیست‌پالایی شده است. قارچ‌ها از آنزیم‌های داخل سلولی و خارج سلولی مانند پراکسیداز و سیتوکروم P450 به ترتیب برای سم‌زدایی و تجزیه زیستی آلاینده‌ها استفاده می‌کنند (Durairaj et al. 2015; Morel et al. 2013; Gao et al. 2020). هرچند پژوهش‌های زیادی در زمینه زیست‌پالایی قارچی انجام شده است اما هنوز بسیاری از مسیرها از جمله مسیرهای تجزیه به‌طور کامل درک نشده است. نیاز به یادآوری است که توسعه روش‌های زیست شناسی مولکولی می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای دخیل در زیست‌پالایی کمک کند و این دانش، در شفاف‌سازی جنبه‌های مبهم یاد شده بسیار اهمیت خواهد داشت. در مطالعات اخیر مشخص شده است که توالی‌یابی کل ژنوم می‌تواند مسیرهای زیست‌پالایی را مشخص کند (Deshmukh et al. 2016).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

زیست‌پالایی آفت‌کش‌ها توسط قارچ‌ها

استفاده از مواد شیمیایی در فرآیندهای صنعتی، کشاورزی، آزمایش‌های هسته‌ای و زمینه‌های مختلف زندگی روزمره انسان‌ها باعث انتشار مواد شیمیایی بالقوه سمی به محیط زیست می‌شود. مواد شیمیایی آلوده کننده محیط زیست شناخته شده شامل فلزات سنگین،داروها، هیدروکربن‌ها، حلال‌های هالوژنه، عوامل مختل‌کننده و مواد شیمیایی کشاورزی هستند. تجمع آلاینده‌های آلی (آفت‌کش‌ها) و فلزات سنگین (نقره، آرسنیک، طلا، کادمیوم، کبالت، کروم، مس، سرب) در سیستم‌های آبی نیز می‌تواند مشکلات جدی برای محیط‌زیست، حیوانات و انسان‌ها ایجاد کند (Kumar et al. 2019). مصرف جهانی آفت‌کش‌ها طی سال‌های اخیر روند افزایش قابل توجهی را نشان داده است. طبق گزارش فائو(FAO)، در سال ۲۰۲۲ استفاده از آفت‌کش‌ها در کشاورزی تقریبا ۴ میلیون تن در سال بوده است (FAO. 2022). زیرا آفت‌کش‌ها در حال حاضر یک ابزار ضروری برای افزایش محصول و محافظت محصولات مهم از آفات، حشرات، قارچ‌ها، نماتدها و علف های هرز هستند (Ortiz-Hernández et al. 2011). بسیاری از این آفت‌کش‌ها با اثرات مضری مانند پایداری بالا در محیط، تجمع زیستی و اثرات نامطلوب برای موجودات غیرهدف همراه هستند (Kumar et al. 2019).

به‌تازگی گزارش‌هایی از زیست‌پالایی آفت‌کش‌هایی مانند کاربامات‌ها، ترکیبات ارگانوفسفرها و پیرتروئیدها توسط قارچ‌ها ارایه شده است (Bose et al. 2021; Kumar et al. 2021). حتی در برخی موارد قارچ‌ها توانایی تجزیه‌ی قارچ‌کش‌ها را نیز دارند که از آن جمله می‌توان به پیرازول کربوکسامید و فلوکساپیروکساید که برای کنترل درمان بیماری های قارچی سیب استفاده می‌شوند، اشاره کرد (Podbielska et al. 2020). گروه‌های مختلف قارچی مانند عوامل پوسیدگی سفید (white rot fungi)، پوسیدگی قهوه‌ای (brown rot fungi)، مخمرها (yeasts) و قارچ‌های رشته‌ای (filamentous fungi) در زیست‌پالایی آفت‌کش‌ها نقش دارند اما قارچ‌های عامل پوسیدگی سفید به دلیل ترشح آنزیم‌هایی غیر اختصاصی مانند لیگنین پراکسیداز، منگنز پراکسیداز و لاکاز از مهمترین گزینه‌های مورد مطالعه برای پاکسازی زیستی آفت‌کش‌ها هستند (Zhuo and Fan, 2021). به‌عنوان مثال قارچ *Trametes versicolor* توانایی حذف سه آفت‌کش کلرپیریفوس، دیکوفول و سیپرمترین را به‌خوبی نشان داده است به این صورت که طی یک دوره ۱۴ روزه ۹۵ درصد از آفت‌کش کلرپیریفوس، ۸۸ درصد از آفت‌کش دیکوفول و ۹۳ درصد از آفت‌کش سیپرمترین را در دمای ۲۵ درجه سلسیوس پاکسازی کرد. در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

آزمایش‌ها مشخص شده است که آفت‌کش‌ها به سرعت جذب ریسه‌های قارچی می‌شوند و قارچ‌ها با تولید متابولیت‌های ثانویه، هیدرولیز کردن و اکسیداسیون، آفت‌کش‌ها را تخریب و تجزیه می‌کنند (Hu et al. 2020). علاوه‌بر آنزیم‌های خارج سلولی، آنزیم‌های داخل سلولی قارچی مانند سیتوکرم P450 نیز در تخریب آفت‌کش‌ها نقش بسزایی دارند (Magan et al. 2010).

استفاده از ترکیب قارچ و مواد معدنی برای تجزیه آفت‌کش‌ها بسیار کارآمدتر از زمانی است که قارچ یا مواد معدنی به تنهایی استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال ترکیب *Phanerochaete chrysosporium* با فلز بور برای پاکسازی خاک‌های آلوده به آفت‌کش‌های آلی و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای استفاده شد. در نهایت میزان پاکسازی خاک در حضور ترکیب قارچ و بور ۴۴ درصد تخمین زده شد درحالی‌که در زمانی که هر کدام به تنهایی به کار برده شدند راندمان پاکسازی به شدت کاهش یافت (Wang et al. 2014).

زیست‌پالایی محصولات دارویی و مراقبتی توسط قارچ‌ها

محصولات بهداشتی و مراقبتی گروهی نوظهور از آلاینده‌های زیستی هستند که اثرات نامطلوبی بر سلامت اکوسیستم برجای می‌گذارند. این ترکیبات دارای پایداری بالا در محیط، حلالیت در آب، تجمع زیستی و سمیت بالا در محیط هستند. علاوه‌بر این باعث ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی در باکتری‌ها، سنتز غیر طبیعی پروتئین‌ها و آنزیم‌ها در موجودات مختلف می‌شوند و همین امر باعث افزایش نگرانی در مورد این محصولات جامعه مدرن شده است (Kayode-Afolayan et al. 2022). در مطالعات اخیر مشخص شده است که قارچ‌ها توانایی تجزیه‌ی طیف وسیعی از محصولات دارویی (داروهای ضد سرطان، داروهای ضد التهاب و داروهای ضدافسردگی) و مراقبتی را دارند (Rodarte-Morales et al. 2011). مهمترین گروه قارچی که قادر به تخریب محصولات دارویی هستند، عوامل پوسیدگی سفید ریشه هستند که اغلب برای تخریب داروها از آنزیم‌های داخل سلولی (لیگنین پراکسیداز، منگنز پراکسیداز و لاکاز) و خارج سلولی استفاده می‌کنند.

قارچ *T. versicolor* به‌طور گسترده برای تجزیه‌ی دارویی مورد مطالعه قرار گرفته است (Tran et al. 2010). این گونه‌ی قارچی دیکلوفناک، ناپروکسن، ایندومتاسین، ایبوپروفن و فنوپروفن را به خوبی تجزیه می‌کند. این قارچ بعد از ۱۴ روز به ترتیب ۹۹/۹ درصد و ۴۰ درصد از دیکلوفناک و کتوپروفن را تجزیه کرد (Dalecka et al. 2019). علاوه‌بر این، استفاده از این گونه‌های قارچی برای حذف فاضلاب بیمارستانی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

نیزگزارش شده است. در مطالعه‌ای مشخص شد که این قارچ طی ۲۴ ساعت توانایی حذف ۸۰ درصد از فاضلاب بیمارستانی را دارد. سایر گونه‌های قارچی مانند *Ganoderma applanatum* و *Laetiporus sulphureus* j نیز توانایی مطلوبی در پاکسازی محصولات دارویی و فاضلاب بیمارستانی دارند (Bankole et al. 2020).

مزایا و معایب زیست‌پالایی قارچی

در مقایسه با سایر روش‌هایی که برای حذف آلاینده‌های زیست محیطی استفاده می‌شود کاربرد این فناوری مزایای زیادی را برای محیط زیست و انسان‌ها به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به حذف هزینه‌ی حمل و نقل پسماندهای جامد شهری، انجام در محل، ارزان قیمت بودن، نیازمند به فضای کم، سازگار با محیط زیست و در دسترس بودن و رشد سریع و قابل توجه میسیلیوم‌های قارچی اشاره کرد. هر چند محدودیت‌هایی نیز برای این روش گزارش شده است. مهم‌ترین محدودیت، طولانی بودن زمان حذف یا تجزیه آلاینده‌ها توسط این میکروارگانیسم‌ها است. رشد قارچ‌ها در ضایعات صنعتی و کشاورزی ممکن است منجر به تولید ترکیبات سمی شوند که سلامت انسان را به خطر بیاندازد (Akpasi et al. 2023).

جدول ۱- آنزیم‌های پرکاربرد ترشح شده توسط گونه‌های قارچی مختلف در زیست‌پالایی و ترکیبات هدف آن‌ها

گونه قارچی	آنزیم‌ها	ترکیبات تجزیه شده	منابع
Fusarium oxysporium	اندوگلوکاناز	نقره	Danesh et al. 2013
Bjerkandera adusta	لیگنین پراکسیداز	ترکیبات زنوبیوتیک	Rhodes. 2014
Tinea versicolor	لاکازها	تولوئن و بنزن	Tavares et al. 2017
Aspergillus flavus	لاکاز	مواد رنگ‌زا و سورفکتانت‌ها	Gosh and Gosh, 2018
Trametes pavonia ، ***Penicillium verruculosum*** ، ***Penicilliums piculisporus*** ، ***Botryosphaeria laricina*** ، ***Aspergillus glaucus***	آنزیم‌های لیگنولیتیک	علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها	Singh et al. 2015

زیست‌پالایی پسماندهای جامد شهری

تولید هزاران تن پسماندهای جامد شهری در کشورهای در حال توسعه منجر به مشکلات زیست محیطی و بهداشتی متعددی برای انسان‌ها شده است (Soobhany et al. 2015). اگرچه سوزاندن و دفع زباله‌ها از روش‌های معمول دفع پسماندهای جامد شهری است اما این روش‌ها باعث آلودگی هوا، بوی بد و همچنین افزایش محتوای میکروارگانیسم‌های بیمارگر در خاک می‌شود. پیشرفت‌های تکنولوژی باعث شده است

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

که محققین برای دفع پسماندهای جامد شهری روش‌هایی مانند کمپوست‌سازی و بیومتاناسیون را پیشنهاد دهند (Deshmukh et al. 2016). استفاده از این روش‌ها باعث تولید ترکیباتی مانند اسیدهای چرب فرار، بیوگاز و کمپوست‌های آلی می‌شود که این ترکیبات نقش بسیار موثری در تهویه خاک و کود دارند. به‌منظور افزایش کارآیی این فرآیندها از آنزیم‌های قارچی مانند سلولاز، پروتئاز، آمیلاز و لیپاز استفاده می‌شود (جدول۱). این آنزیم‌ها ترکیبات پلی‌مری پیچیده را به ترکیبات ساده‌تر که پیش‌سازهایی برای تولید بیوگازها و اسیدهای چرب فرار هستند تبدیل می‌کنند (Deshmukh et al. 2016). در روش کمپوست‌سازی گزارش‌هایی مبنی‌بر استفاده از قارچ‌هایی مانند *A. niger*، *Armilleria gemina* و *Pholiota adipose* وجود دارد (Hattori et al. 2015).

نتیجه‌گیری

زیست‌پالایی قارچی یک روش مقرون به صرفه، سازگار با محیط زیست و موثر برای از بین بردن آلاینده‌های محیطی با استفاده از قارچ‌ها و ترکیبات ترشح شده ازآن‌ها است. در این مطالعه تاثیرات زیستی، شیمیایی و فیزیکی گونه‌های قارچی مورد مطالعه قرار گرفت. با این حال این فناوری هنوز با محدودیت‌های خاصی مواجه است. مهم‌ترین محدودیت زیست‌پالایی قارچی، زمانبر بودن آن است و همچنین در بعضی مواقع حذف آلاینده‌ها به صورت صد در صد انجام نمی شود. برای بهبود کارآیی و رقابت‌پذیری فناوری زیست‌پالایی لازم است با استفاده از رویکردهای بیوانفورماتیکی برای گونه‌های جدید قارچی و میکروبی با سازگاری اکولوژیکی بالاتر برای تخریب زیستی آلاینده‌ها کاوش کرد. در نهایت باید اشاره کرد که در میان دو مشکل جهانی تغییر اقلیم و آلودگی محیط زیست این فناوری به‌عنوان ابزاری منحصرد به فرد برای امنیت آینده منابع طبیعی و سلامت اکوسیستم‌ها عمل می‌کند. پژوهش‌های آینده باید بر توسعه تجزیه‌ی زیستی و آزمایش‌های زیست‌پالایی در مقیاس بزرگتر متمرکز شود و پتانسیل گونه‌های بومی و میکروارگانیسم‌های دستکاری شده ژنتیکی نیز باید بیشتر مورداستفاده قرار گیرد. همچنین برای بهبود کارایی تجزیه زیستی بینش عمیق‌تر در مورد مکانیسم‌های زیست‌پالایی موردنیاز است.

یکی از مهم‌ترین مراحل در زیست‌پالایی قارچی، انتخاب گونه‌های قارچی مناسب است. بنابراین باید قبل از تجاری‌سازی، پتانسیل زیست‌پالایی هر گونه‌ی قارچی در طبیعت مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین برای اقتصادی‌تر کردن این رویکرد، مطالعه روش‌های پربازده مانند مهندسی آنزیم ضروری به نظر می‌رسد. همچنین

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

مطالعات اخیر در مورد مکانیسم‌های زیست‌پالایی و تحولات ژنومی نشان می‌دهد که بررسی کل ژنوم می‌تواند به کشف مسیرهای زیست‌پالایی کمک کند.

فهرست منابع References

Akcil A, Erust C, Ozdemiroglu S, Fonti V, Beolchini F. 2015. A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes. The Journal of Cleaner of Production. 86:24–36.

Akpasi SO, Anekwe IMS, Tetteh EK, Amune UO, Shoyiga HO, Mahlangu TP, Lewis kiambi S. 2023. Mycoremediation as a potentially promising technology: Current status and prospects. A Review. Applied Sciences. 13(8): 4978.

Bankole PO, Adekunle AA, Jeon BH, Govindwar, SP .2020. Novel cobiomass degradation of NSAIDs by two wood rot fungi, *ganoderma applanatum* and laetiporus sulphureus: Ligninolytic enzymes induction, isotherm and kinetic studies. Ecotoxicology and Environmental Safety. 203.

Birhanu GT and Tesfaye A T. 2020. Mode of action, mechanism and role of microbes in bioremediation service for environmental pollution management. Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research. 2(3)*:*1-18

Bose S, Kumar PS, Vo DVN, Rajamohan N, Saravanan R. 2021. Microbial degradation of recalcitrant pesticides: A review. Environmental Chemistry Letters. 19: 3209– 3228.

Ceci A, Pinzari F, Russo F, Persiani AM, Gadd GM. 2019. Roles of saprotrophic fungi in biodegradation or transformation of organic and inorganic pollutants in co-contaminated sites. Applied Microbiology and Biotechnology .103(1):53–68.

Dalecka B, Juhna T, Rajarao G. 2019. Constructive use of filamentous fungi to remove pharmaceutical substances from wastewater. The Journal of Water Process Engineering. 33.

Danesh YR, Tajbakhsh M, Goltapeh EM, Varma A. 2013. Mycoremediation of heavy metals. In Fungi as Bioremediators; Springer: Cham, Switzerland, pp. 245–267.

Deshmukh R, Khardenavis AA, Purohit HJ. 2016. Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation. Indian Journal Microbilogy. 56:247-264.

Durairaj P, Malla S, Nadarajan SP, Lee PG, Jung PG, Jung E, Park HH, Kim BG, Yung H. 2015. Fungal cytochrome P450 monooxygenases of *Fusarium oxysporum* for the synthesis of x-hydroxy fatty acids in engineered *Saccharomyce scerevisiae*. Microbial Cell Factories. 14:45.

FAO. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations, https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-1990-2022/en.

Friesen ML. 2013. Microbially mediated plant functional traits. Mol Microbial Ecol Rhizosphere 1: 87–102.

Gao R, Liu R, Sun C. 2022. A marine fungus alternaria alternata FB1 efficiently degrades polyethylene. J. Hazardous Materials. 431: 128617.

Hattori T, Hisamori H, Suzuki S, Umezawa T, Yoshimura T, Sakai H. 2015. Rapid copper transfer and precipitation by wood-rotting fungi can effect copper removal from copper sulfate-treated wood blocks during solid-state fungal treatment. Int Biodeterior Biodegradation. 97: 195–201.

Hu K, Barbieri MV, López-García E, Postigo C, López De Alda M, Caminal G, Sarra M. 2022. Fungal degradation of selected medium to highly polar pesticides by trametes versicolor: Kinetics,

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

biodegradation pathways, and ecotoxicity of treated waters. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 414: 439–449.

Huang J, Fu Y, Liu Y. 2014. Comparison of alkali-tolerant fungus Myrothecium sp. IMER1 and white-rot fungi for decolorization of textile dyes and dye effluents. Bioremediation Journal. 5: 1-5.

Huang S, Peng B, Yang Z, Chai L, Zhou L. 2009. Chromium accumulation, microorganism population and enzyme activities in soils around chromium-containing slag heap of steel alloy factory. Trans Nonferrous Metals Soc China. 19: 241-248.

Jang KY, Cho SM, Seok SJ, Kong WS, Kim GH, Sung JM. 2009. Screening of biodegradable function of indigenous ligno-degrading mushroom using dyes. Mycobiology. 37: 53–61.

Kayode-Afolayan SD, Ahuekwe EF, Nwinyi OC. 2022. Impacts of pharmaceutical effluents on aquatic ecosystems. Scientific African.17.

Khan I, AftabM, Shakir S, Ali M, Qayyum S, Rehman MU, Haleem KS, Touseef I. 2019. Mycoremediation of heavy metal (Cd and Cr)–polluted soil through indigenous metallotolerant fungal isolates. Environmental Monitoring and Assessment.199.

Kumar A, Prasad M, Maiti S, Favas P. 2018. Mycoremediation for mine site rehabilitation. In Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, pp. 233–260.

Kumar M, Yadav AN, Saxena R, Paul D, Tomar RS. 2021. Biodiversity of pesticides degrading microbial communities and their environmental impact. Biocatalysis Agric. The Biotechnology. 31.

Kumar SS, Ghosh P, Malyan SK. Sharma J, Kumar V. 2019. A comprehensive review on enzymatic degradation of the organophosphate pesticide Malathion in the environment. J. Environ. Sci. Health C Environ. Carcinog Ecotoxicol Rev. 37: 288–329.

Kumar S. 2011. Composting of municipal solid waste. Critical Reviews in Biotechnology. 31: 112-136.

Kumar V. Dwivedi S K. 2021. Mycoremediation of heavy metals: processes, mechanisms, and affecting factors. Environmental Science and Pollution Research. 28(9): 10375-10412.

Lacerda EC, Baltazar MD, dos Reis TA, do Nascimento CA, Côrrea B, Gimenes LJ. 2019. Copper biosorption from an aqueous solution by the dead biomass of *Penicillium ochrochloron*. Environmental Monitoring and Assessment. 191(4): 247.

Magan N, Fragoeiro S, Bastos C. 2010. Environmental factors and bioremediation of xenobiotics using white rot fungi. Mycobiology. 38: 238–248.

Maruthi YA, Hossain K, Thakre S. 2013. *Aspergillus flavus*: a potential bioremediator for oil contaminated soils. European Journal of Sustainable Development Research. 2: 57–66.

Marzan LW, Hossain M, Mina SA, Akter Y, Chowdhury AMM. 2017. Isolation and biochemical characterization of heavymetal resistant bacteria from tannery e4uent in Chittagong city, Bangladesh: Bioremediation viewpoint. Egyptian Journal of Aquatic Research. 95: 65-79.

Mohammadi-Sichani MM, Mazaheri Assadi M, Farazmand A, Kianirad M, Ahadi AM, Ghahderijani HH.2017. Bioremediation of soil contaminated crude oil by *Agaricomycetes.* Journal of Environmental Health Science & Engineering. 15:8**.**

Morel M, Meux E, Mathieu Y, Thuillier A, Chibani K, Harvengi L, Jacquot JP, Gelhaye E. 2013. Xenomic networks variability and adaptation traits in wood decaying fungi. Microbial Biotechnology. 6: 248–263.

Neifar M, Maktouf S, Ghorbel RE, Jaouani A, Cherif A. 2015. Extremophiles as source of novel bioactive compounds with industrial potential. In: Gupta VK, Tuohy MG, O'Donovan A, Lohani M (eds) Biotechnology of bioactive compounds: sources and applications. Wiley. Hoboken. pp 245–268.

Neill C, Hawke FR, Hawkes DL, Lourenço ND, Pinheiro HM, et al. 1999. Colour in textile effluents sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. Journal of Chemical Technology and Biotechnology.74: 1009-18.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

Nioku KL, Yussuf A, Akinola MO, Adesuyi AA, Jolaoso AO, Adedokun AH. 2016. Mycorememediation of petroleum hydrocarbon polluted soil by *Pleurotus pulmonarius*. Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management. 9:865-875.

Ortiz-Hernández M L, Sánchez-Salinas E, Olvera-Velona A, Folch-Mallol JL. 2011. Pesticides in the environment: Impacts and their biodegradation as a strategy for residues treatment. Pesticides - Formulations, Effects, Fate.

Podbielska M, Książek P, Szpyrka E. 2020. Dissipation kinetics and biological degradation by yeast and dietary risk assessment of fluxapyroxad in apples. Scientific Reports. 10.

Reya I, Lakshmi Prabha M, Renitta E. 2013. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Cr(VI) using novel *Aspergillus jegita* isolated from tannery effluent. Research Journal of Chemistry and Environment. 17:72–78.

Rhodes CJ. 2014. Mycoremediation (bioremediation with fungi)–growing mushrooms to clean the earth. Chemical Speciation and Bioavailability. 26: 196–198.

Rigas F, Dritsa V, Marchant R, Papadopoulou K, Avramides E, Hatzianestis, I . 2007. Biodegradation of lindane by Pleurotus ostreatus via central composite design. Environment Internationa. L 31: 191-196.

Rosales E, Pazos MA, ngeles Sanroman´ M. 2013. Feasibility of solid-state fermentation using spent fungi-substrate in the biodegradation of PAHs. Clean - Soil, Air, Water. 41: 610–615.

Segura A and Ramos JL. 2013. Plant–bacteria interactions in the removal of pollutants. Current Opinion in Biotechnology. 24(3): 467–473.

Singh M, Srivastava PK, Verma PC, Kharwar RN, Singh N, Tripathi RD. 2015. Soil fungi for mycoremediation of arsenic pollution in agriculture soils. The Journal of Applied Microbiology. 119: 1278–1290.

Smith SE. and Read JD. 2008. Mycorrhizal symbiosis. 3rd ed. London: Academic Press.

Soobhany N, Mohee R, Garg VK. 2015. Comparative assessment of heavy metals content during the composting and vermicomposting of municipal solid waste employing Eudrilus eugeniae. Waste Management. 39:130–145.

Tavares A, Pereira S, Xavier A. 2017. Biotechnological Applications of trametes versicolor and their enzymes. Current Biotechnology. 6: 78–88.

Tran N, Urase T, Kusakabe O. 2010. Biodegradation characteristics of pharmaceutical substances by whole fungal culture trametes versicolor and its laccase.J. Water and Environmental Technologies. 8: 125–140.

Ulrici W 2000. Contaminant soil areas, different countries and contaminant monitoring of contaminants in Environment Proces ll. Soil Decontamination Biotechnology. 11: 5-42.

Wang C, Yu L, Zhang Z, Wang B, Sun, H. 2014. Tourmaline combined with phanerochaete chrysosporium to remediate agricultural soil contaminated with PAHs and OCPs. The Journal of Hazardous Materials. 264: 439–448.

Wedemeyer G. 1967. Dechlorination of 1, 1, 1-Trichloro-2, 2-bis (pchlorophenyl) ethaneby Aerobacter aerogene. J Applied Microbiology. 15: 569-574.

Zhang B, Wang S, Diao M, Fu J, Xie M, Shi J, Liu Z, Jiang Y, Cao X, Borthwick AG. 2019. Microbial community responses to vanadium distributions in mining geological environments and bioremediation assessment. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences. 124(3): 601–615.

Zhuo R and Fan F. 2021. A comprehensive insight into the application of white rot fungi and their lignocellulolytic enzymes in the removal of organic pollutants. Science of the Total Environment. 778.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]

The Role of Fungi in the Bioremediation of Pollutants

Zahra Mirsoleymani[1] and Zeinab Bahmani[*2]

1- Assistant Professor of Mycology, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khozestan, Iran.

2- Assistant Professor of Mycology, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

z.bahmani@ilam.ac.ir

Abstract

Industrialization, growing affluence in the developed world, population explosion, and rapid development in developing countries have resulted in accelerated environmental degradation on a large scale. Owing to the above reasons, chemical and solid waste management has become a major cause of concern today since the environment is loaded with a large quantum of contaminants and recalcitrant and heavy metals. Many conventional physico chemical methods of treatment/removal of these compounds, though effective, are not feasible for application on a large scale. Bioremediation involves the application of suitable microbes in the polluted system which perform various physical and chemical reactions as a part of their metabolism resulting in degradation and removal of pollutants. Because of their consistent morphology and versatile metabolic ability, fungi play crucial roles as degraders and symbionts in the environment, including soil and aquatic habitats; thus, they are particularly suitable for bioremediation. Mycoremediation is a form of bioremediation in which fungi are used to decontaminate contaminated areas. In this technology, fungi interact physically and chemically with pollutants, leading to structural changes or total disintegration of those pollutants.

Keywords: Biodegradation, Fungal species, Environment

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-07]