

## نقش قارچ‌های همزیست ریشه در احیای زمین‌های آلوده به مواد سمی

مهدی صدروی\* و نجمه قرچه

دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد بیماری‌شناسی گیاهی، گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۹

صدروی، م. و قرچه، ن. ۱۳۹۲. نقش قارچ‌های همزیست ریشه در احیای زمین‌های آلوده به مواد سمی. دانش بیماری‌شناسی گیاهی ۲(۲): ۶۰-۴۵.

### چکیده

آلودگی خاک زمین‌های محدود زراعی به مواد سمی در طول چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. گیاه‌پالایی فن‌آوری استفاده از گیاهان برای حذف، تجزیه یا کم خطرتر کردن مواد سمی موجود در خاک است. همزیستی قارچ‌ها با ریشه گیاهان کارایی گیاهان همزیست را در پالایش خاک‌های آلوده از مواد سمی افزایش می‌دهد. قارچ *Hebeloma mesophaeum* که همزیست سطح ریشه گیاهان نونل نروژی، راش، توسکا، بیدمجنون و بیدمشک است، با جذب و غیرفعال کردن فلزات سنگین آلاینده موجود در خاک در شبکه ریشه‌ای هارتینگ خود در پوست ریشه، به استقرار و رشد بهینه این گیاهان در خاک‌های آلوده کمک می‌کند. قارچ‌های همزیست ریشه آربوسکولار *Funneliformis mosseae*، *Claroideoglossum etunicatum*، *Glomus versiforme*، *Septoglossum deserticola* و *G. intraradices* به ذرت، سویا، شبدر، شبدر زیرزمینی، گوجه‌فرنگی و اکالیپتوس در استقرار و رشد بهینه و جذب بیشتر عناصر غذایی در خاک‌های آلوده به کادمیوم، سرب، روی، آرسنیک و مواد نفتی کمک کرده‌اند. این قارچ‌ها با تثبیت این عناصر و مواد آلاینده در شبکه ریشه‌ای خارج ریشه‌ای خود باعث غیرفعال شدن آن‌ها می‌شوند. بنابراین قارچ‌های همزیست ریشه می‌توانند کمک زیادی در احیای زیستی زمین‌های آلوده بنمایند.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، روی، سرب، کادمیوم، گیاه‌پالایی، قارچ، همزیستی

\*نویسنده مسئول مکاتبه، پست الکترونیک: msadravi@yu.ac.ir

## مقدمه

رشد روز افزون جمعیت جهان، افزایش تقاضا برای مواد غذایی و دیگر محصولات و فرآورده‌های کشاورزی را به همراه آورده است. از سوی دیگر گسترش شهرنشینی و افزایش کارخانجات صنعتی، باعث افزایش آلودگی محیط زیست، آب و خاک زمین‌های محدود زراعی، به مواد سمی حاصل از فاضلاب‌های صنعتی و یا زباله‌های خانگی شهرها شده و تولید پایدار محصولات و فرآورده‌های کشاورزی و امنیت غذایی افراد جامعه را با خطر جدی روبرو کرده است. یکی از آلاینده‌های مهم محیط زیست فلزات سنگین می‌باشند، که یافتن روش کاهش آن‌ها در زمین‌های آلوده، به خصوص مزارع نزدیک به کارخانجات صنعتی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. وارد شدن فلزات سنگین به خاک اثرات زیان‌باری دارد از طرفی می‌تواند باعث از بین رفتن گیاهان گردد و یا در غلظت‌های کم از طریق محصولات کشاورزی وارد زنجیره غذایی شده و به مصرف‌کنندگان آسیب می‌رساند و یا با آلوده شدن آب آشامیدنی یک خطر برای سلامتی انسان محسوب می‌شود. گیاه‌پالایی (Phytoremediation) یک فن‌آوری پایدار و ارزان بر اساس حذف آلودگی‌ها از محیط‌زیست توسط گیاهان می‌باشد. با کشف این روش نوین و امیدبخش پی برده شد که این روش یک فرآیند با سرعت کم است، ولی می‌توان به کمک قارچ‌های همزیست ریشه آن را تسریع کرد (Abdul, 2005).

## ۱- مواد سمی آلاینده خاک و آب

آلودگی محیط با مواد سمی در طول چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. مواد سمی حاوی عناصری مانند سرب، مس، روی، جیوه، آرسنیک، کلسیم، کادمیوم و کرم (Pb, Cu, Zn, Hg, As, Ca, Cd, Cr) می‌توانند از طریق فاضلاب‌های صنعتی و شهری و یا استفاده زیاد از کودهای شیمیایی و یا انواع علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها وارد آب و یا خاک شده و بستر کاشت گیاهان را آلوده نمایند. این آلودگی‌ها که می‌توانند در مقادیر کم به صورت طبیعی نیز پدید آیند همراه با منابع فوق باعث تجمع مواد سمی در خاک‌های کشاورزی و خطری برای تأمین غذای سالم جامعه محسوب می‌شوند. حضور این مواد در خاک و آب می‌تواند باعث عدم رشد گیاهان و یا تولید محصول آن‌ها و یا تولید محصول آلوده، که منجر به تجمع آن‌ها در بافت‌های جانداران (گیاه، انسان و جانوران) و بروز بیماری‌های غیرقابل درمان و یا صعب‌العلاج شود. گاهی خاک یا آب با فاضلاب‌های خطرناک صنعتی یا شهری آلوده می‌شوند و این عناصر در غلظت‌های بالا وارد ریشه گیاهان می‌شوند و یا باعث

تخریب غشاء پلاسمایی سلول‌های گیاهی، یا اختلال در فعالیت‌های آنزیم‌های سازنده پروتئین‌های ساختمانی و یا جایگزین شدن در ساختمان مواد حیاتی و در نتیجه مختل شدن فعالیت آن‌ها می‌شوند. همچنین این فلزات سنگین باعث تولید انواع اکسیژن‌های فعال می‌شوند که سبب خطر اکسید شدن بافت‌های گیاهی می‌شوند، در نتیجه نشانه‌های مسمومیت مثل عدم رشد، زردی، پوسیده شدن ریشه‌ها، کاهش فتوسنتز و توقف چرخه تنفس سلولی گیاه می‌شوند. وجود این فلزات سنگین در آب و خاک، علاوه بر تغلیظ این فلزات در خاک‌های آلوده، باعث کاهش فعالیت ریزجانداران مفید مانند باکتری‌ها، حاصلخیزی خاک و کاهش چشمگیر محصول می‌شوند. کادمیم یکی از این فلزات سنگین سمی باعث جلوگیری از رشد ریشه‌ها و ساقه‌ها می‌گردد و بر جذب عناصر غذایی ضروری از خاک تأثیر می‌گذارد و اغلب در محصولات مهم کشاورزی تجمع می‌یابد (علیزاده اسکویی و همکاران، ۱۳۸۸).

## ۲- واکنش گیاهان به مواد سمی

تنش گیاهان به فلزات سنگین را حساسیت به غلظت‌های بالای این فلزات که باعث صدمه به گیاه یا مرگ آن می‌شود، تعریف می‌کنند. مقاومت گیاه به این معنی است که با وجود حضور عناصر سنگین در محیط رشد، گیاه قابلیت حیات و تولید نسل بعدی خود را دارد. دو نوع مقاومت در برابر تنش فلزات شناخته شده است: اجتناب، که توصیف سازوکار حفاظت خارجی گیاه از تنش فلزات است و تحمل، که گیاه قادر به زنده ماندن در شرایطی است که در معرض تجمع غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین در درون خود هست. گیاهان برای رشد و نمو طبیعی خود نیاز به عناصر غذایی ضروری دارند. بعضی از این عناصر در دسته فلزات سنگین قرار می‌گیرند و گیاه به مقدار بسیار کمی از آن‌ها نیاز دارد. با این وجود، بعضی گیاهان می‌توانند فوق تجمع‌دهنده این عناصر باشند و حتی تجمع غلظت بالای این عناصر برای رشد طبیعی این گیاهان ضروری و مفید است. در بافت‌های بعضی گیاهان این مواد چند برابر مقدار آن‌ها در خاک تجمع می‌یابند. حساسیت یا تحمل به فلزات سنگین توسط ژن‌های خاصی کنترل می‌شود. به عنوان مثال، تحمل به عنصر روی، تحت کنترل ژنی است که سرعت جایگذاری عنصر روی در سیتوپلاسم به واکوئل را تنظیم می‌کند. این سازوکار در مورد عنصر مس با حضور دو ژن، در این فرآیند، افزایش می‌یابد. توانایی بعضی گیاهان در تجمع فلزات می‌تواند راهکار مفیدی برای پاکسازی زیستی خاک‌های آلوده باشد. جریان یافتن این عناصر به خارج گیاه، توسط تبخیر یا آب‌شویی آن‌ها از اندام‌های هوایی، ریزش برگ‌ها یا بافت‌های ریشه، صورت می‌گیرد. همه این عوامل برهم‌کنش‌های پیچیده‌ای با انواع چرخه عناصر غذایی در گیاهان دارند. راهکارهای اجتناب از تجمع فلزات سنگین در گیاهان متفاوت است. راهکارهای

خارج سلولی شامل نقش قارچ‌های همزیست ریشه، ساختمان دیواره سلولی و ترشحات خارجی می‌باشد. تحمل به فلزات سنگین همچنین در غشای پلاسمایی نیز صورت می‌گیرد، هر دوی این سازوکارها به واسطه کاهش جذب فلزات سنگین یا تحریک پمپ کردن فلزات به خارج از سیتوسول می‌باشد. داخل پروتوپلاسم سازوکارهای متفاوتی وجود دارد، برای مثال، برای ترمیم پروتئین‌های صدمه دیده ناشی از تنش، پروتئین‌های شوک حرارتی یا متالوتیونین‌ها و کلات کردن فلزات توسط اسیدهای آلی، آمینواسیدها یا پپتیدها، یا جایگذاری آن‌ها از طریق فرآیندهای متابولیکی انتقال یون‌ها به واکوئل انجام می‌گیرد (Gaur & Adholeya, 2004).

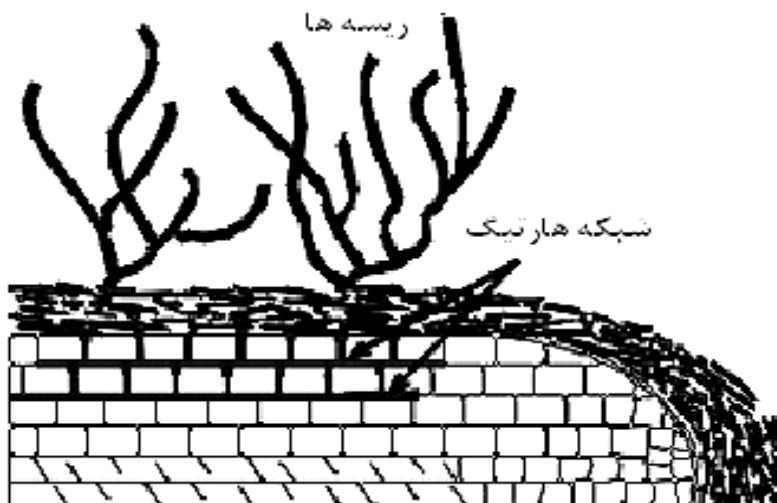
### ۳- گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده

پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیشتر و محدود بودن زمین‌های زراعی از مسایل مهم دنیای امروز است. در حالی که مواد آلی تجزیه می‌شوند و دوباره به چرخه حیات بازمی‌گردند، فلزات نمی‌توانند از بین بروند و پالایش و پاک کردن آن‌ها نیاز به خارج کردن آنها از محیط دارد، اما این روش به انرژی زیادی نیاز دارد و نیز می‌تواند بسیار پرهزینه باشد علاوه بر آن خارج کردن فلزات اغلب به فعالیت‌های فیزیکی و شیمیایی زیادی نیاز دارد که می‌تواند، تاثیر منفی بر ریزجانداران و حاصلخیزی خاک بگذارند. روش‌هایی مثل خاک‌برداری، انتقال و یا آبشویی خاک می‌تواند خسارت زیادی ببار آورد و باعث تخریب ساختمان و حاصلخیزی خاک و انتقال آلودگی‌ها به آب‌های زیرزمینی شوند، چون با انتقال خاک آلاینده‌ها از بین نمی‌روند و فقط از مکانی به مکان دیگر انتقال می‌یابند و موجب آلودگی بخش دیگری از محیط زیست می‌گردند. پالایش سبز به عنوان یک فن‌آوری جایگزین کم هزینه و محیط دوست پیشنهاد شده است. گیاه‌پالایی فن‌آوری است که با استفاده از گیاهان و فرآیندهای گیاهی سعی در حذف، تجزیه یا تولید مواد کم خطرتر در خاک، آب، رسوبات و هوا را دارد (Abdul, 2005). در این روش از گیاهانی استفاده می‌شود که دارای سازگاری برای تحمل یا اندوزش مقدار زیاد فلز را در فرایشه (Rhizospher) و بافت‌هایشان دارند. گیاه‌پالایی به عنوان یک روش زیستی برای غیرفعال کردن فلزات سمی در خاک‌های آلوده به کمک همزیستی قارچ-ریشه به کار برده می‌شود (Gohre & Adholeya, 2004).

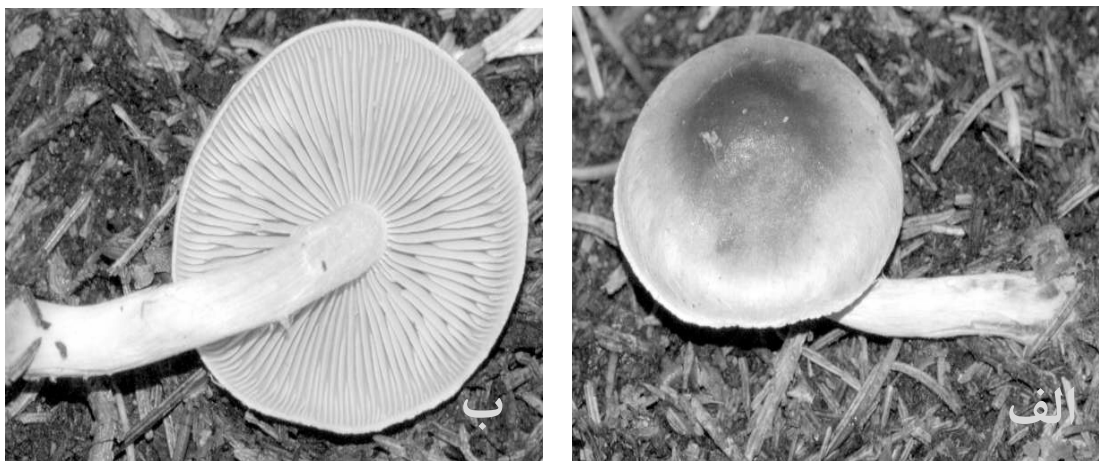
## ۳-۱- نقش قارچ‌های همزیست سطح ریشه در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده

قارچ‌های همزیست سطح ریشه گیاهان (Ectomycorrhizae)، ضمن استقرار در بافت اپیدرمی پوست ریشه تولید شبکه در هم تنیده ریشه‌ای (Hartig net) در بافت اپیدرمی ریشه گیاهان همزیست می‌نمایند، که محل اصلی تبادل مواد بین قارچ و گیاه همزیست است (شکل ۲).

قارچ خوراکی اکتومیکوریز *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél.، که از شاخه *Basidiomycota*، رده *Agaricomycetes*، راسته *Agaricales*، تیره *Hymenogastreae* است (شکل ۳) و با ریشه نوئل نیروژی، راش، توسکا، بیدمجنون و بیدمشک، همزیستی دارد، در اطراف ریشه این گیاهان شبکه هارتیگ این قارچ تشکیل می‌شود، که دارای مقاومت زیادی به ورود عناصر سنگین به درون بافت‌های خود هستند و عناصر سنگین در شبکه هارتیگ این قارچ به حالت کلات در می‌آیند (Schutzenduble & Polle, 2001; Hryniewicz et al., 2012). همچنین ثابت شده که در هنگام مواجهه این قارچ با عناصر فلزی فعالیت برخی از آنتی‌اکسیدان‌ها از جمله Mn-SOD افزایش یافته و از این طریق به حفاظت ریشه گیاهان کمک می‌کند. سازوکارهای به کار گرفته شده در تحمل به فلزات سنگین در قارچ‌ها در سطح سلولی احتمالاً مشابه بعضی راهکارهای به کار برده شده توسط گیاهان عالی، مانند اتصال به مواد خارج سلولی یا رسوب آن‌ها در واکوئل است. در مورد نقش اکتومیکوریزا



شکل ۲. نحوه استقرار قارچ‌های همزیست سطح ریشه در ریشه گیاه (کلکسیون بین‌المللی قارچ‌های همزیست ریشه وزیکولار-آربوسکولار، بخش علوم خاک، دانشگاه ویرجینیای غربی ایالات متحده آمریکا).



شکل ۳. قارچ همزیست سطح ریشه *Hebeloma mesophaeum*: الف- بازیدیوکارپ و ساقه روئیده آن از سطح ریشه گیاه

میزبان، ب- تیغه‌های زیر سطح کلاهک چتری بازیدیوکارپ (J.K. Lindsey)

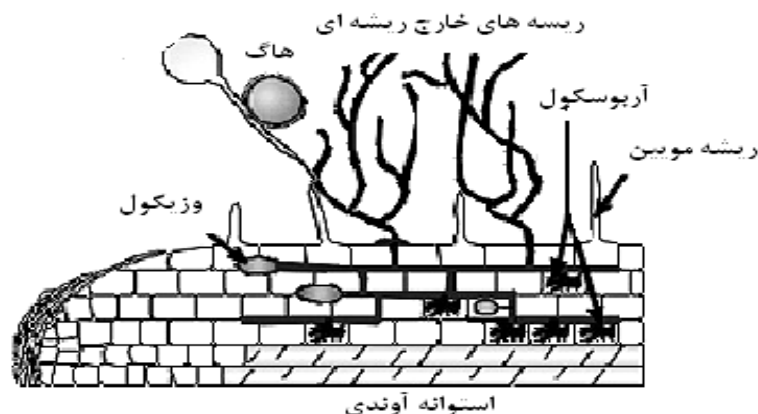
در تحمل گیاهان به فلزات سنگین، مهمترین سازوکار بازدارنده از ورود فلزات به داخل ریشه گیاه میزبان، جذب آنها توسط پوشش ریشه‌ای قارچ و کاهش دستیابی آپوپلاست به فلزات به دلیل آب‌گریز بودن پوشش قارچی، کلاته شدن توسط ترشحات قارچ و جذب آنها در داخل میسلیم خارجی قارچ است (Hall, 2002).

### ۳-۲- نقش قارچ‌های همزیست ریشه آربوسکولار در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده

قارچ‌های شاخه *Glomeromycota* از سلسله قارچ‌ها، همزیست اجباری ریشه ۸۰٪ گیاهان، از جمله غلات، حبوبات، گیاهان علوفه‌ای و روغنی، درختان میوه دانه‌دار، هسته‌دار، مرکبات، سبزی‌ها، صیفی‌جات، انواع رز، گیاهان پیازی (لاله)، درختان جنگلی و سایه‌دار، گیاهان معطر و دارویی هستند (Gosling et al., 2006). ریشه بدون بند این قارچ‌ها مستقیماً به دیواره ریشه موئین یا سلول‌های اپیدرمی یا آگزودرمی (در ریشه‌های مسن‌تر) نفوذ و در بین سلول‌ها رشد می‌کند. در لایه‌های بیرونی پوست ریشه ممکن است تولید حلقه‌هایی در درون اولین سلول‌ها و یا چند سلول مجاور آن بنمایند. ریشه اغلب این قارچ‌ها در پارانشیم پوست ریشه گیاهان، تولید حباب‌هایی (Vesicles) بیضی یا تخم‌مرغی شکل، با دیواره نازک و پر از چربی می‌نمایند. این حباب‌ها که در ریشه‌های مسن تعدادشان افزایش می‌یابد، به عنوان منبع ذخیره غذا و انرژی قارچ و پایداری آن پس از مرگ گیاه در خاک شناخته شده‌اند. بدین ترتیب قارچ می‌تواند، در صورتی که ریشه‌ها از خاک خارج نگردند، برای مدت‌های طولانی در بافت آنها

زنده باقی بماند. تمامی این قارچ‌ها، در لایه‌های درونی پارانشیم پوست ریشه، به درون سلول‌ها نفوذ کرده و ساختار درختچه ماندی به نام آربوسکول (*Arbuscule*) در بین دیواره و غشای پلاسمایی سلول گیاه بوجود می‌آورند. این ساختار محل اصلی تبادل مواد بین قارچ و گیاه است و در حالی که توسط غشای پلاسمایی سلول گیاه احاطه شده، حاوی هسته‌های متعدد، ذرات گلیکوژن، گوی‌های چربی و واکوئل‌های کوچک تیره رنگ است و وجود مقادیر زیاد فسفر و کلسیم در آن‌ها، خصوصاً در ریشه پیاز و سویا، به اثبات رسیده است. بدین ترتیب آشکار شده که این قارچ‌ها می‌توانند فسفر خاک را جذب کرده و آنرا به صورت دانه‌های فسفات در ریشه‌های خود، همراه با جریان سیتوپلاسمی به آربوسکول‌ها منتقل کرده و در آنجا این دانه‌ها تحت تاثیر آنزیم پلی فسفاتاز شکسته شده و فسفر در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. نظر به اینکه تمامی این قارچ‌ها تولید آربوسکول می‌کنند، آنها را قارچ‌های همزیست ریشه آربوسکولار یا قارچ‌های آربوسکولار نیز نامیده‌اند. ریشه قارچ پس از استقرار دریافت ریشه، در خارج ریشه نیز گسترش می‌یابد و ضمن جذب آب و عناصر غذایی (فسفر، روی) و زایش هاگ‌ها، با سایر قسمت‌های ریشه همان گیاه و یا گیاهان مجاور رابطه همزیستی برقرار می‌کند (شکل ۴). این همزیستی همراه با نفع دو طرفه است، بدین معنی که قارچ به کمک شبکه ریشه‌های خارج ریشه‌ای خود آب و عناصر غذایی را جذب کرده و در اختیار گیاه قرار می‌دهد و گیاه نیز کربوهیدرات‌های مورد نیاز قارچ را تامین می‌کند. قارچ‌های میکوریز آربوسکولار همزیست ریشه همزیستی با این قارچ‌ها اثرات مثبتی بر بیوشیمی و فیزیولوژی گیاه همزیست می‌گذارد و غلظت مواد تنظیم کننده رشد گیاه، ترشحات ریشه و دیگر مواد شیمیایی در بافت‌های گیاه تغییر می‌کند، میزان فتوسنتز و تبادل فرآورده‌های آن بین ریشه و ساقه، مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی، عوامل بیماری‌زای خاکزاد، رشد و محصول گیاه افزایش می‌یابد (Pfleger & Linderman, 1994). همچنین فعالیت باکتری‌های تثبیت کننده ازت افزایش می‌یابد (Stevens et al., 2002). کارایی گیاهان همزیست آن‌ها برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده نیز افزایش می‌یابد (Sudova & Vosatka, 2007).

همزیستی قارچ آربوسکولار *Glomus* sp. با ریشه ذرت باعث رشد بهینه و تولید محصول گیاه در یک خاک آلوده به فلزات سنگین شده و غلظت این فلزات در بافت گیاه بسیار کمتر از بوته‌های ذرت فاقد این قارچ همزیست بوده است. این حالت به تثبیت فلزات سنگین در خاک توسط قارچ همزیست ریشه نسبت داده شده است (Kaldorf et al., 1999).



شکل ۴. نحوه استقرار و اندامک‌های قارچ‌های همزیست ریشه آربوسکولار (کلکسیون بین‌المللی قارچ‌های همزیست ریشه وزیکولار-آربوسکولار، بخش علوم خاک، دانشگاه ویرجینیای غربی ایالات متحده آمریکا).

قارچ‌های آربوسکولار نقش قابل توجهی در تثبیت فلزات سنگین توسط گیاه در خاک‌های آلوده با ایجاد کمپلکس با این فلزات، ایفا می‌کنند و به نوبه‌ی خود به بقای گیاهان همزیست کمک می‌کنند. از طرف دیگر برخی گزارشات حاکی از افزایش جذب فلزات سنگین توسط این گیاهان است که در این صورت جهت خارج شدن فلزات از خاک توسط گیاه حایز اهمیت بوده و برای اصلاح خاک‌های آلوده مفید خواهد بود (Khan, 2006). این قارچ‌ها ارتباط مستقیمی بین خاک و ریشه‌های گیاه برقرار می‌کنند، به این ترتیب کارایی گیاه‌پالایی را از طریق تاثیر بر قابلیت دسترسی فلزات سنگین و افزایش تحمل گیاه بهبود می‌بخشند (Gaur & Adholeya, 2004) سازوکارهایی که این قارچ‌ها برای کاهش تنش فلزات سنگین برای گیاهان به کار می‌برند، شامل کلات شدن و غیر پویایی فلزات سنگین در ریشه‌های خارج ریشه‌ای، بهبود تغذیه معدنی بوئژه فسفر برای گیاه که باعث تسریع رشد آن می‌گردد، تغییر pH فراریشه و تنظیم بیان ژن ناقل‌های فلزی می‌باشند (Gonzalez-Guerrero *et al.*, 2005). همزیستی قارچ‌های آربوسکولار با ریشه ذرت و شبدر باعث ترشح برخی آنزیم‌های عامل غیر متحرک کردن فلزات سنگین در خاک شده و میزان انباشت آن‌ها را در این گیاهان کاهش می‌دهند (Joner & Leyval, 2001). مواد دیواره‌ی سلولی قارچ‌های آربوسکولار حاوی ترکیباتی نظیر آمینواسیدهای آزاد و گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل است که قادر هستند به فلزات سنگین سمی متصل و آن‌ها را به حالت غیرمتحرک درآورند (Kapoor & Viraraghavan, 1995). پروتئین‌های دیواره‌ی سلولی قارچ‌های آربوسکولار نیز توانایی ترکیب شدن با فلزات سنگین را از خود نشان می‌دهند که گلومالین (یک نوع



گلیکوپروتئین نامحلول) تولید شده توسط ریشه‌های خارج ریشه‌ای این قارچ‌ها از جمله آن‌ها است (Gonzalez-Chavez *et al.*, 2004).

همزیستی قارچ آربوسکولار *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schussler با ریشه گیاهان در خاک‌های آلوده به کادمیوم، باعث مهار اثر آن برای گیاه همزیست و رشد و تولید محصول بهینه آن شده است (Biro & Takacs, 2007). بوته‌های شبدر زیرزمینی (*Trifolium subterraneum* L.) همزیست با قارچ آربوسکولار *F. mosseae* عنصر کادمیوم را بیشتر از گیاهان فاقد قارچ همزیست از خاک جذب می‌کنند و داخل ریشه‌های خود درون ریشه گیاه میزبان رسوب داده و اجزای انتقال آن را به اندام‌های هوایی نمی‌دهند (Joner & Leyval, 1997). بوته‌های ذرت دارای همزیستی آربوسکولار در خاک آلوده به عنصر سنگین کادمیوم، در مقایسه با بوته‌های فاقد این همزیستی، رشد رویشی بیشتری داشته و غلظت این عنصر در بافت‌های آن‌ها کمتر بود. بنابراین به نظر می‌رسد این همزیستی مقاومت گیاه را در مقابل این عنصر سنگین افزایش می‌دهد (Weissenhorn *et al.*, 1995). همزیستی گوجه‌فرنگی با ۲ گونه قارچ آربوسکولار *Glomus versiforme* و *Claroideoglossum etunicatum* (W.N. Becker & Gerd.) C. Walker & A. Schussler در خاک آلوده به کادمیوم باعث افزایش جذب فسفر و کاهش سمیت کادمیوم برای گیاه شده است (علیزاده اسکویی و همکاران، ۱۳۸۸). آزمایش تاثیر ۲ قارچ آربوسکولار *F. mosseae* و *Glomus sp.* با باکتری‌های *Bacillus mycoides* و *Micrococcus roseus* بر رشد ذرت در خاک آلوده به کادمیوم نشان داده که با افزایش سطح کادمیوم خاک، وزن خشک اندام هوایی، ریشه، مقدار فسفر و آهن اندام هوایی کاهش و مقدار کادمیوم اندام هوایی و ریشه افزایش می‌یابد. درصد کلنیزاسیون ریشه در سطوح مختلف کادمیوم و در مایه‌زنی توام با باکتری‌ها متفاوت بود. بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی و ریشه، جذب فسفر و آهن به اندام هوایی در غلظت‌های بالای کادمیوم، در تیمار *F. mosseae* بود. در تیمارهایی که فقط قارچ‌های همزیست حضور داشتند در سطوح ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیوم، به ترتیب گیاهان کلنیزه شده با *G. sp.* و *F. mosseae* بیش‌ترین مقدار کادمیوم ریشه را داشتند. در هر دو سطح کادمیوم، مایه‌زنی توام باکتری‌های *M. roseus* و *B. mycoides* با *G. sp.* و *F. mosseae* به ترتیب منجر به افزایش و کاهش مقدار کادمیوم اندام هوایی در

مقایسه با مایه‌زنی جداگانه *F. mosseae* گردید. تیمار مایه‌زنی توام *F. mosseae* با باکتری *M. roseus* با بیش‌ترین مقدار تجمع کادمیوم در ریشه گیاه، موثرترین تیمار در گیاه‌پالایی و تثبیت کادمیوم شناخته شد (ملکزاده و همکاران، ۱۳۹۰).

پژوهش‌های انجام شده نشان داده که سورگوم دارای همزیستی آربوسکولار در خاک آلوده به سرب منجر به تثبیت و غیرفعال شدن این فلزسنگین در اندام‌های قارچ توسط گرانول‌های پلی فسفات می‌گردد (Wong et al., 2007; Chen et al., 2005). قارچ‌های آربوسکولار با ترکیب مواد موجود در دیواره سلولی، مانند کیتین، با فلزات سنگین موجود در خاک، مانند روی، کادمیوم و سرب، باعث تثبیت و بی‌اثر شدن این عناصر در خاک می‌گردند (Vogel-Mikus et al., 2006). همزیستی قارچ‌های آربوسکولار با ریشه سویا، در خاک آلوده به سرب، موجب تحریک رشد و افزایش سرعت جذب مواد غذایی بویژه فسفر شده، همچنین قارچ همزیست با جذب سرب خاک، سبب تولید اندام‌های هوایی با غلظت‌های کمتر سرب (در حدود ۳۰ درصد کمتر از بوته‌های فاقد قارچ همزیست) در غلظت‌های بالای سرب اضافه شده به خاک، می‌گردد (Andrade et al., 2004). گیاهان شبدر و ذرت دارای همزیستی آربوسکولار نسبت به بوته‌های فاقد همزیستی، در خاک آلوده به سرب دارای سرب بیشتری در ریشه و مقدار کمتری در اندام‌های هوایی بودند. غلظت زیاد این فلز در ریشه نسبت به ساقه نشان دهنده‌ی ترکیب و غیرفعال شدن آن در ریشه‌ها توسط قارچ همزیست است (Joner & Leyval, 2001). همزیستی قارچ‌های آربوسکولار با ریشه گیاهان در خاک‌های آلوده به سرب، می‌تواند رشد بهینه گیاهان را بر اثر افزایش جذب فسفر و کاهش سمیت سرب از طریق کمپلکس کردن آن در ریشه توسط قارچ همزیست، افزایش دهد (Chen et al., 2005). آزمایش همزیستی سورگوم با دو قارچ آربوسکولار *Glomus intraradices* N.C. Schenck & G.S. Sm. و *F. mosseae* بر جذب و انتقال سرب در گیاه در شرایط گلخانه‌ای نشان داده تلقیح گیاه با هر ۲ گونه‌ی قارچی انتقال سرب به بخش هوایی را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد. همزیستی با قارچ *G. intraradices* سبب افزایش وزن خشک بخش هوایی در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و افزایش وزن خشک ریشه در سطوح ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در مقایسه با بوته‌های غیرهمزیست گردید ولی اثر معنی‌داری بر سایر پارامترهای رشد نداشت. در سطوح بالای سرب، همزیستی با قارچ *F. mosseae* سبب کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک گیاه، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ‌ها در مقایسه با بوته‌های غیر همزیست گردید در سطوح ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، نسبت غلظت سرب ریشه به بخش هوایی گیاهان در

همزیستی با قارچ *F. mosseae* به طور معنی‌داری بیشتر از بوته‌های غیرهمزیست و بوته‌های تلقیح شده با *G. intraradices* بود (امانی‌فر و همکاران، ۱۳۹۱). همزیستی نهال‌های اکالیپتوس (*Eucalyptus rostrata* Schlecht) با قارچ آربوسکولار *Septoglomus deserticola* (Trappe, Bloss & J.A. Menge) G.A. Silva, Oehl & Sieverd. در کاهش سمیت خاک آلوده به سرب تاثیر مثبت دارد. به این صورت که در یک آزمایش گلخانه‌ای تاثیر این قارچ روی رشد و جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سرب توسط گیاه در یک خاک آلوده به سرب بررسی گردید. نتایج نشان داده که این همزیستی وزن خشک، ارتفاع ساقه، میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم و میزان جذب کلروفیل در گیاه را افزایش داده است. همچنین میزان جذب و تثبیت سرب در ریشه گیاه افزایش یافته است. بنابراین استفاده از این قارچ همزیست ریشه می‌تواند نقش مهمی در گیاه‌پالایی سرب از خاک توسط اکالیپتوس داشته باشد (Bafeel, 2008).

در یک آزمایش گلخانه‌ای نقش ۳ قارچ آربوسکولار بومی برای گیاه‌پالایی خاک آلوده به روی با ذرت بررسی شده است، بوته‌های ذرت مایه‌زنی شده با این قارچ‌ها، در مقایسه با بوته‌های شاهد مایه‌زنی نشده، جذب روی و فسفر و نیز عملکرد بیشتری داشته و علائم سمیت روی در آن‌ها دیده نشد. کارایی جذب روی، در بوته‌های مایه‌زنی شده با *G. intraradices* تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی از سایر تیمارها بیشتر ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، در بوته‌های مایه‌زنی شده با *F. mosseae* بالاتر بود. بالاترین کارایی هر ۳ قارچ در افزایش جذب روی در پایین‌ترین سطح روی دیده شد و در بالاترین سطح روی *G. intraradices* و *F. mosseae* به ترتیب کارایی قابل توجهی نشان دادند. قارچ آربوسکولار *G. versiforme* نسبت به ۲ قارچ دیگر حالت بینابینی داشت (زارعی و همکاران، ۱۳۹۰).

قارچ آربوسکولار *F. mosseae* در همزیستی با ریشه *Pteris vittata* L. در خاکی آلوده به آرسنیک باعث افزایش محصول به خصوص وزن خشک ساقه و کاهش غلظت آرسنیک در گیاه شده بنابراین در حذف این منبع آلودگی از خاک نقش مهمی دارد (Liao et al., 2003).

استفاده از گیاهان و ریزجانداران تجزیه‌کننده مواد نفتی بهترین روش برای حذف این آلاینده‌ها از محیط است. در آزمایش تاثیر قارچ آربوسکولار *G. intraradices* و ۲ باکتری تجزیه‌گر بر گیاه‌پالایی خاک آلوده شده با نفت خام (به میزان ۱ و

۲درصد) با گیاه شبدر، بیشترین میزان تجزیه این آلاینده در حد ۸۵ درصد، در تیمار تلقیح هم‌زمان قارچ و باکتری‌ها در سطح آلودگی ۲ درصد خاک مشاهده شد. به این ترتیب به نظر می‌رسد که قارچ همزیست کارآیی باکتری‌ها را افزایش می‌دهد (سرروی مغانلو و همکاران، ۱۳۹۱).

#### نتیجه

گیاه‌پالایی فن‌آوری استفاده از گیاهان برای حذف، تجزیه یا کم‌خطرتر کردن مواد سمی موجود در خاک است. همزیستی قارچ‌ها با ریشه گیاهان کارایی گیاهان همزیست را در پالایش خاک‌های آلوده از مواد سمی افزایش می‌دهد. قارچ *H. mesophaeum* که همزیست سطح ریشه گیاهان نوتل نروژی، راش، توسکا، بیدمجنون و بیدمشک است، با جذب و غیرفعال کردن فلزات سنگین آلاینده موجود در خاک در شبکه ریشه‌ای هارتینگ خود در پوست ریشه، به استقرار و رشد بهینه این گیاهان در خاک‌های آلوده کمک می‌کند. قارچ‌های همزیست ریشه آربوسکولار به گیاهان ذرت، سویا، شبدر، شبدر زیرزمینی، گوجه‌فرنگی و اکالیپتوس در استقرار و رشد بهینه و جذب بیشتر عناصر غذایی در خاک‌های آلوده به کادمیوم، سرب، روی، آرسنیک و مواد نفتی کمک کرده‌اند. این قارچ‌ها با تثبیت این عناصر و مواد آلاینده در شبکه ریشه‌ای خارج ریشه‌ای خود باعث غیرفعال شدن آن‌ها می‌شوند. بنابراین قارچ‌های همزیست ریشه می‌توانند کمک زیادی در احیای زیستی زمین‌های آلوده بنمایند.

#### منابع

- امانی‌فر، س.، اصغرزاد، ن. ع.، نجفی، ن.، اوستان، ش. و بلندنظر، ص. ۱۳۹۱. اثر قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بر گیاه‌پالایی سرب توسط سورگوم (*Sorghum bicolor* L.). *دانش آب و خاک* ۱۶: ۱-۲۲.
- علیزاده اسکویی، پ.، اصغرزاد، ن. ع.، شریعتمداری، ح.، اصغرزاده، ا. و باغبان سیروس، ش. ۱۳۸۸. تأثیر دو گونه از قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در کاهش سمیت کادمیوم در گیاه گوجه‌فرنگی با سطوح مختلف فسفر. *پژوهش‌های خاک* ۱۲: ۱-۲۳.
- زارعی، م.، صالح راستین، ن. و ثوابی، غ. ۱۳۹۰. کارایی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به روی به وسیله گیاه ذرت. *علوم آب و خاک* ۱۶: ۱-۵۵.

سروری مغاللو، و.، چرم، م.، فلاح، م. و معتمدی، ح. ۱۳۹۱. بررسی نقش قارچ میکوریزا و باکتری‌های تجزیه‌گر در افزایش

گیاه‌پالایی ترکیبات نفتی در خاک‌های آلوده به نفت خام. آب و خاک ۲۶(۴): ۸۴۱-۸۳۲.

ملک‌زاده، ا.، علیخانی، ح.، ثوابی فیروزآبادی، غ. و زارعی، م. ۱۳۹۰. برهم کنش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و باکتری‌های

PGPR مقاوم به کادمیوم در گیاه پالایی کادمیوم. آب و خاک ۲: ۲۷۴-۲۶۶.

Abdul, G. K. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Trace Element Medicine* 7: 355-364.

Andrade, S., Abreu, C. A., Abreu, M. F. & Silveria, A. P. D. 2004. Influence of lead addition on arbuscular mycorrhiza and rhizobium symbiosis under soybean plants. *Applied Soil Ecology* 26:123-131.

Bafeel, S. O. 2008. Contribution of mycorrhizae in phytoremediation of lead contaminated soils by *Eucalyptus rostrata*. *Plants World Applied Sciences Journal* 5(4): 490-498.

Biro, I. & Takacs, T. 2007. Effects of *Glomus mossea* strains of different origin on plant macro and micronutrient uptake in Cd polluted and unpolluted soils. *Acta Agronomica Hungarica* 55(2):1-10.

Chen, X., Wu, C., Tang, J. & Hu, S. 2005. Arbuscular mycorrhizae enhance metal lead uptake and growth of host plants under sand culture experiment. *Chemosphere* 60:665-671.

Gaur, A. & Adholeya, A. 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science* 86:528-534.

Gonzalez-Chavez, M. C., Carrillo-Gonzalez, R., Wright, S. F. & Nichols, K. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution* 130:317-323.

Gonzalez-Guerrero, M., Azcon-Aguilar, C., Mooney, M., Valderas, A., McDiarmid, C.W., D.J. Eide & Ferrol, N. 2005. Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. *Fungal Genetics and Biology* 42 (2):130-140.

Gosling, P., Hodge, A., Goodlass, G. & Bending, G.D. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113:17-35.

Hall, J. L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53: 1-11.

- Hryniewicz, K., Dabrowska, G., Baum, C., Niedojadlo, K. & Leinweber, P. 2012. Interactive and single effects of ectomycorrhiza formation and *Bacillus cereus* on metallothionein *MT1* expression and phytoextraction of Cd and Zn by willows. *Water, Air & Soil Pollution* 223(3):957-996.
- Joner, E. J. & Leyval, C. 1997. Uptake of <sup>109</sup>Cd by roots and hyphae of a *Glomus mosseae/ Trifolium subterraneum* mycorrhiza from soil amended with high and low concentrations of cadmium. *New Phytologist* 135(2):353-360.
- Joner, E. J. & Leyval, C. 2001. Time course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. *Biology Fertilization Soils* 33:351-357.
- Kapoor, A & Viraraghavan, T. 1995. Fungal biosorption- an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewater. *Bioresource Technology* 53:195-206.
- Kaldorf, M., Kuhn, A. J. , Schroder, W. H., Hilderbrant, U. & Bothe, H. 1999. Selective elements deposits in maize colonized by heavy metals tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Plant Physiology* 154:718-728.
- Khan, A. G. 2006. Mycorrhizae remediation-an enhanced form of phytoremediation. *Journal of Zhejiang University* 7:503-514.
- Liao, J. P., Lin, X. G., Cao, Z. H., Shi, Y. Q. & Wong, M. H. 2003. Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment. *Chemosphere* 50:847-853.
- Pfleger, F. L. & Linderman, R. G. 1994. Mycorrhizae and Plant Health. APS Press, St.Paul, MN, U.S.A,85p.
- Schutzenduble, A. & Polle, A. 2001. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany* 53:1351-1365.
- Stevens, K. J., Spender S. W. & Petersen, R. L. 2002. Phosphorus, arbuscular mycorrhizal fungi and performance of the wetland *Lythrum salicaria* L. under inundated conditions. *Mycorrhiza* 12(6): 277-283.
- Sudova, R. & Vosatka, M. 2007. Differences in the effects of three arbuscular mycorrhizal fungal strains on P and Pb accumulation by maize plants. *Plant & Soil* 296(1-2):77-83.
- Vogel-Mikus, K., Pongrac, P., Kump, P. , Necemer, M. & Regvar, M. 2006. Colonization of Zn, Cd and Pb hyper accumulator *Thlaspi praecox* with indigenous arbuscular mycorrhizal fungal mixture induces changes in heavy metal and nutrient uptake. *Environmental Pollution* 139:362-371.

- Weissenhorn. I., Mench, M. & Leyval, C. 1995. Bioavailability of heavy metals and arbuscular mycorrhiza in a sewage sludge amended sandi soil. *Soil Biology and Biochemistry* 27:287-296.
- Wong, C. C., Wu, S. C. , Kuek, C. , Khan, A. G. & Wong, M. H. 2007. The role of mycorrhizae associated with Votive grown in Pb-Zn contaminated soils: Greenhouse study. *Restoration Ecology* 15:60-67.

## The Role of Mycorrhizal Fungi in Restoring Lands Contaminated with Toxic Substances

MEHDI SADRAVI<sup>1</sup> & NAJMEH GHARACHEH<sup>2</sup>

1-Corresponding Author: Associate Professor of Plant Pathology, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

(E. mail: msadravi@yu.ac.ir).

2-M.Sc. Student of Plant Pathology, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Sadravi, M. & Gharacheh, N. 2013. The role of mycorrhizal fungi in restoring lands contaminated with toxic substances. *Plant Pathology Science* 2(2):45-60.

### Abstract

Contamination of the soil in limited arable areas with toxic substances has increased during recent decades. Phytoremediation is a technology in which plants are applied to remove, degrade or reduce the hazardous effects of toxic substances in the soil. Symbiotic fungi in symbiosis relation with plant roots efficiently increase the plants ability to remove the toxic substances from contaminated soils. The ectomycorrhizal fungus *Hebeloma mesophaeum* which is in symbiosis with norway spruce, beech, alder, willow and pussy, can uptake the heavy metals of soil and disable them in its hartig net in the root epidermis. It helps plants to maintain optimal growth and establish in contaminated soil. Arbuscular mycorrhizal fungi *Funneliformis mosseae*, *Claroideoglobus etunicatum*, *Septoglobus deserticola*, *Glomus versiforme* and *G. intraradices* help to deploy for optimal growth, and more absorption of nutrients in contaminated soils to cadmium, lead, zinc, arsenic and petroleum in maize, soybean, clover, subterranean clover, tomato and eucalyptus. These fungi can fix and disable these elements and pollutants in intraradical hyphal net. Accordingly, mycorrhizal fungi are powerful biological restoratives in contaminated lands.

**Key words:** Arsenic, Zinc, Lead, Cadmium, Phytoremediation, Symbiosis