تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بر فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

آزاده صالحی* و محمد متینی‌زاده

تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع

چکیده

آلودگی خاک با فلزات سنگین به دلیل پایداری طولانی‌مدت فلزات سنگین در خاک و دارا بودن پتانسیل تأثیرات مضر بوم شناختی می‌تواند بوم‌سازگان‌های زمینی را به مدت طولانی تحت تأثیر قرار دهد. گیاه‌پالایی به‌عنوان یک فنّاوری پایدار، ارزان‌قیمت و دوستدار محیط‌زیست که براساس استفاده مستقیم از گیاهان زنده برای پالایش در محل خاک‌ها، لجن‌ها، رسوبات و آب‌های زیرزمینی آلوده از طریق حذف، تخریب یا محدود نگه‌داشتن آلاینده بنا نهاده شده است، امروزه موضوع تحقیقاتی مهمی در پژوهش‌های گیاهی به شمار می رود. گیاه‌پالایی فرآیندی کند و زمان‌بر است، به‌طوری‌که سال‌ها طول می‌کشد تا سطح آلودگی به مقدار قابل‌قبول و مجاز در خاک برسد، بنابراین بهبود کارایی این فرآیند و کاهش مدت‌زمان لازم برای زدودن آلودگی از اهداف مهم این فناوری است. در میان عوامل زیستی مؤثر بر فرآیند گیاه‌پالایی، نقش میکروارگانیسم‌های خاک بویژه قارچ‌های مایکوریزی حائز اهمیت است، به‌طوری‌که کارایی گیاهان در فرآیند گیاه‌پالایی در صورت همزیستی با این میکروارگانیسم‌های مفید خاک زی می‌تواند تشدید شود. ازاین‌رو در مطالعه پیش‌رو تأثیر همزیستی با قارچ‌های مایکوریز آربوسکولار بر فرآیند پالایش سبز خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با بررسی و تفسیر نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین موردمطالعه قرارگرفت. نتایج این بررسی نشان داد که توانایی قارچ‌های میکوریزی در حفاظت گیاه در برابر سمیت فلزات سنگین به عوامل متعددی چون گونه گیاهی، نوع و نژاد قارچ میکوریزی، نوع و غلظت فلز سنگین، شرایط رشد گیاه، ویژگی‌های خاک، سن، وضعیت فیزیولوژیکی و سیستم ریشه‌ای گیاه بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فلزات سنگین، قارچ میکوریزی، گیاه‌پالایی

* نویسنده مسئول: salehi.azadeh@yahoo.com

مقدمه

آلودگی خاک با فلزات سنگین از طریق فرسایش طبیعی سنگ‌ها و فعالیت‌های بشر از قبیل احتراق سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، تصفیه سنگ‌های حاوی فلز، دفع کنترل‌شده و نشده پساب‌ها، استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و مواد رنگی اتفاق می‌افتد (۱۹). فلزات سنگین می‌توانند با ورود به زنجیره غذایی از طریق محصولات کشاورزی یا آب آشامیدنی آلوده، خطراتی را متوجه سلامتی انسان بسازند (۲۲). بنابراین حذف، جابجایی و یا کاهش اثر فلزات سنگین در محیط‌زیست بر پایه روش‌های علمی و پژوهشی پیشرفته یک ضرورت محسوب می‌شود. روش‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که اغلب آن‌ها علاوه بر هزینه زیاد منجر به تخریب ساختار فیزیکی و شیمیایی و فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند (۳۴). بنابراین بهتر است تا حد ممکن از روش‌های زیستی مناسب، طبیعی، مقرون‌به‌صرفه و در محل استفاده شود (۳). در سال‌های اخیر گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به‌عنوان روشی مؤثر، ارزان‌قیمت و دوستدار محیط‌زیست برای حذف، جابجایی و یا غیرفعال کردن آلاینده‌ها از خاک‌های آلوده توصیه شده است (۱۶، ۲۶). در واقع، گیاه‌پالایی فناوری مستقر نمودن و سپس برداشت گیاهان در مکان-هایی با سطح آلودگی کم تا متوسط و کم‌عمق است (۴۸).

مشکل عمده فناوری گیاه‌پالایی، مدت‌زمان به نسبت طولانی برای انجام این فرآیند است، به‌طوری‌که سال‌ها طول می‌کشد تا سطح آلودگی به مقدار قابل‌قبول و مجاز در خاک برسد (۵). ازاین‌رو راهکارهایی برای تقویت و بهبود کارایی فرآیند گیاه‌پالایی مطرح شده است که می‌توان به مواردی چون استفاده از گیاهان مهندسی ژنتیک شده، افزایش زیست‌فراهمی فلزات سنگین برای جذب توسط گیاه، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی یا کودهای

شیمیایی و استفاده از میکروارگانیسم‌های خاک اشاره کرد (۲).

در میان عوامل زیستی مؤثر بر فرآیند گیاه‌پالایی، نقش میکروارگانیسم‌های خاک، بویژه قارچ‌های میکوریزی، حائز اهمیت است (۴۲). قارچ‌های میکوریزی (اندومیکوریز و اکتومیکوریز) از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند با افزایش جذب عناصر غذایی، تغییر دسترسی زیستی فلزات، بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی و تولید مواد محرک رشد، مقاومت گیاه را در برابر استرس‌های محیطی (خشکی، فلزات سنگین، بیماری‌ها، شوری و پاتوژن‌ها) افزایش دهند (۱۴، ۳۲). با توجه به این‌که قارچ‌های میکوریزی جزء مهم سیستم خاک- گیاه را تشکیل می-دهند، کارایی گیاهان در فرآیند گیاه‌پالایی در صورت همزیستی با قارچ‌های میکوریزی می‌تواند تشدید شود (۲۲). گزارش شده است که در خاک‌هایی با آلودگی شدید، تلقیح گیاهان با ریزجانداران ریزوسفری می‌تواند سبب افزایش زی‌توده گیاه و درنتیجه منجر به تثبیت و بازسازی پوشش گیاهی و همچنین اصلاح خاک آلوده به فلزات شود (۱۳). همچنین صالحی و همکاران (۴۹) در مطالعه خود بیان کردند که تلقیح میکوریزی نهال‌های *Populus alba*، کارایی گیاهان را در خاک‌آلوده به سرب بهبود بخشید. درواقع باید گفت موفقیت فرآیند گیاه‌پالایی نه‌تنها به گونه گیاهی، بلکه به اثرات متقابل ریشه‌های گیاه با میکروارگانیسم‌های ریزوسفری نیز بستگی دارد (۳۳). به‌طوری‌که قارچ‌های میکوریزی با حضور در ریشه گیاهان رشدیافته در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین نقش مهمی را در رشد و مقاومت گیاه و جذب و انتقال فلزات سنگین به ریشه و اندام هوایی گیاه ایفا می‌کنند، که البته این امر به نوع فلز، گیاه و گونه/اکوتیپ قارچ بستگی دارد (۳۷). درواقع جداسازی قارچ‌های میکوریزی بومی و قارچ‌های سازگار با تنش ناشی از فلزات سنگین می‌تواند یک ابزار بالقوه بیوتکنولوژی جهت احیا موفقیت‌آمیز بوم‌سازگان‌های تخریب شده باشد (۱۹). ازاین‌رو در این مطالعه تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریزی بر فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بررسی شد.

آلودگی خاک با فلزات سنگین فلزات سنگین جزء آلاینده-های غیرآلی هستند و می‌توانند در هرکجای طبیعت در بوم‌سازگان‌های آبی و خاکی و حتی در اتمسفر موجود باشند. برخی از فلزات سنگین نظیر روی (Zn)، مس (Cu)، آهن (Fe)، منگنز (Mn) و نیکل (Ni) جزء عناصر ضروری و مفید در فیزیولوژی گیاهان و جانوران می‌باشند (۲۲). از سوی دیگر فلزات سنگینی چون کادمیم (Cd)، جیوه (Hg)، سرب (Pb) و آرسنیک (As) هیچ نقش مفید زیستی ندارند (۵۱). یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی فلزات سنگین خاک، سنگ بستر است (۷). از سوی دیگر فعالیت‌های کشاورزی (مصرف کودهای آلی و معدنی وآفت‌کش‌ها)، صنعتی (استخراج معادن، صنایع پلاستیک‌سازی، نساجی و فولادسازی، کارخانه‌های ذوب و استخراج فلزات) و شهری (خاکستر حاصل از سوزاندن و دفن زباله‌ها در خاک، تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی) بشر نیز منجر به افزایش سطح فلزات سنگین در زیست‌بوم می‌شود (۱۹). همچنین با توجه به کمبود منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پساب‌های صنعتی و شهری به‌عنوان منابعی عمده برای آب اهمیت یافته‌اند که یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از این پساب‌ها در امر آبیاری، افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک است (۵۰). آلودگی خاک با فلزات سنگین باعث مسمومیت گیاهان، کاهش حاصلخیزی، عملکرد و فعالیت میکروبی خاک می‌شود و در نهایت سلامت انسان و جانداران را به مخاطره می-اندازد. از دلایل سمیت فلزات سنگین برای موجودات زنده می‌توان به ایجاد تنش اکسیداتیو درنتیجه تحریک رادیکال-های آزاد، اتصال به مولکول‌های آلی و تخریب آن‌ها، جایگزینی دیگر فلزات ضروری در رنگدانه‌ها یا آنزیم‌ها و تخریب کارکرد آن‌ها، اتصال به گروه‌های سولفیدریل در پروتئین‌ها و درنتیجه برهم زدن ساختار و کارکرد پروتئین-ها اشاره کرد (۵۹).

گیاه‌پالایی یا پالایش سبز با توجه به این‌که خاک‌های آلوده به فلزات سنگین برای کشاورزی و سایر کاربری‌ها مناسب نیستند، ازاین‌رو پالایش آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. فلزات سنگین از راههای شیمیایی قابل‌تجزیه نیستند و به‌طورمعمول باید به‌طور فیزیکی جابجا شده و یا به‌صورت آلی درآیند (۲۲). در کل خاک آلوده به فلزات سنگین را می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی پالایش کرد (۲۰). روش پالایش فیزیکی خاک مبتنی بر استفاده از عوامل فیزیکی و مکانیسم‌هایی نظیر گرم کردن، سوزاندن و هوادهی است. در مقابل، در

پالایش شیمیایی با استفاده از حلال‌ها و ترکیبات شیمیایی، شستشوی خاک و نیز انجام فرآیندهای اکسایش و کاهش، جداسازی، رسوب و یا تبدیل آلاینده‌ها انجام می‌شود (۵۷). با توجه به این‌که فنون به‌کاررفته در پالایش‌های فیزیکی و شیمیایی سبب تغییرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و کاربری اراضی را برای رشد گیاه و تولید محصولات کاهش می‌دهد (۳۴)، بنابراین بهتر است تا حد ممکن از روش‌های طبیعی و زیستی استفاده شود.

پالایش زیستی (Bioremediation) فرآیندی است که از موجودات زنده (باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، پلانکتون‌ها، پروتوزوآها و گیاهان) برای پالایش بسترهای آلوده استفاده می‌شود. فناوری پالایش با محوریت گیاه، موسوم به گیاه-پالایی یا پالایش سبز، بخشی از پالایش زیستی است که در آن با استفاده از گیاهان و برهمکنش مثبت و همیاری با موجودات زنده خاک، آلاینده‌های آلی (آفت‌کش‌ها، مواد منفجره، ترکیبات محافظ چوب و شوینده‌های کلری) و غیرآلی (فلزات سنگین، رادیونوکلیدها و ترکیبات دیگری نظیر NH_4، NO_3، PO_4، ClO_4) از خاک‌ها، لجن‌ها، رسوبات و آب‌های زیرزمینی آلوده پالایش می‌شوند (۹). این روش در سال‌های اخیر به دلیل حداقل عوارض زیست‌محیطی، عدم نیاز به کارکنان متخصص، هزینه‌های پایین، تولیدات گیاهی قابل بازیافت و استفاده محلی از آن ها توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۱، ۳۹). روش‌های مختلف گیاه‌پالایی شامل تبدیل گیاهی، ترغیب گیاهی، تصعید گیاهی، تثبیت گیاهی، تصفیه گیاهی، استخراج گیاهی و کنترل هیدرولیکی است که در جدول ۱ خلاصه‌ای از آن‌ها آمده است (۳۵). از میان روش‌های مختلف گیاه‌پالایی، از دو روش تثبیت و استخراج گیاهی می‌توان به ترتیب برای تثبیت و حذف فلزات سنگین از خاک بهره برد (۴).

باتوجه به شکل ۱ گیاهان رشد یافته در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بر اساس غلظت آلاینده فلزی در اندام‌های گیاه در برابر افزایش غلظت فلز سنگین در خاک به سه گروه تقسیم می‌شوند (۲۰):

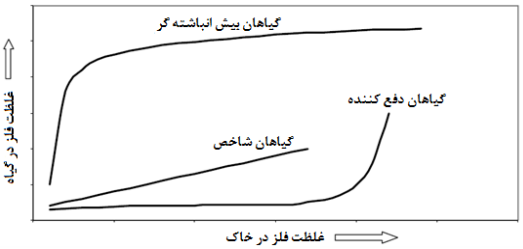
۱- دفع‌کننده فلز (Metal Excluder) این گیاهان از جذب فلزات سنگین تا آستانه خاصی، جلوگیری کرده ولی پس‌ازاین آستانه، فلزات را جذب می‌کنند؛ اما در برابر افزایش غلظت آلاینده فلزی در اندام‌های هوایی خود در حد بحرانی مقاومت دارند. به‌طوری‌که در خاک هایی با غلظت بالای فلزی، این گیاهان فقط فلزات را در ریشه‌های خود نگه‌داشته و از انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی جلوگیری می‌کنند.

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های مختلف گیاه‌پالایی (۳۵)

مکانیسم پالایش	هدف فرآیند	محیط کشت	آلاینده
تبدیل گیاهی (Phytotransformation, Phytodegradation)	تخریب آلاینده	خاک، رسوب، لجن، آب سطحی، آب زیرزمینی	آلاینده‌های آلی
ترغیب گیاهی (Rhizodegradation, Phytostimulation)	تخریب آلاینده	خاک، رسوب، لجن، آب زیرزمینی	آلاینده‌های آلی
تصفیه گیاهی (Rhizofiltration)	حذف آلاینده فلزی به کمک ریزوسفر	آب سطحی، آب زیرزمینی	فلزات سنگین، رادیونوکلیدها
تصعید گیاهی (Phytovolatilization)	استخراج آلاینده از محیط کشت و رهاسازی آن در هوا	خاک، رسوب، لجن، آب زیرزمینی	برخی از فلزات (جیوه، سلنیوم و آرسنیک)، حلال‌های کلردار
تثبیت گیاهی (Phytostabilization)	محدود نگاه‌داشتن آلاینده	خاک، رسوب، لجن	فلزات سنگین
استخراج گیاهی (Phytoextraction)	جذب آلاینده به‌وسیله ریشه و انتقال آن به اندام هوایی گیاه	خاک، رسوب، لجن	فلزات سنگین، رادیونوکلیدها
کنترل هیدرولیکی (Hydraulic control, Phytohydraulic)	تخریب یا محدود نگه‌داشتن آلاینده	آب سطحی، آب زیرزمینی	آلاینده‌های آلی و غیرآلی محلول در آب

۲- معرف یا شاخص فلزی (Metal Indicator) در این گیاهان جذب آلاینده فلزی به‌صورت خطی متناسب با افزایش غلظت فلز در خاک زیاد می‌شود؛ بنابراین غلظت آلاینده فلزی در این گیاهان منعکس‌کننده غلظت فلزات در خاک می‌باشد.

۳- بیش‌انباشته‌گرها (Hyperaccumulator): این گیاهان به‌طور فعال غلظت‌های بالایی از فلزات را در ریشه و اندام‌های هوایی خود انباشته می‌کنند.



شکل ۱- واکنش گیاهان نسبت به افزایش غلظت فلزات سنگین خاک (۲۰)

در مقایسه با روش‌های فیزیکی- شیمیایی که برای مناطقی با آلودگی زیاد ولی در مقیاس کوچک توسعه یافته‌اند، گیاه‌پالایی برای حجم زیادی از خاک‌های آلوده به غلظت‌های کم ولی معنی‌دار فلزات سنگین، روش مناسبی است. این فناوری به‌عنوان یک روش سبز، خاک را حاصلخیز نگاه می‌دارد و با محیط‌زیست سازگار بوده، مقبولیت عمومی زیادی دارد (۴۶). برتری دیگر این فناوری در این است که گیاهان به دلیل استفاده از انرژی پاک خورشید و دارا بودن سیستم جذب و تصفیه آلودگی، توانایی تجمع و تجزیه و تبدیل آلاینده‌ها را دارند (۵۷). همچنین هزینه‌های اجرای این فناوری در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم پالایش بسیار اندک است. در مقابل، فناوری گیاه‌پالایی کاستی‌ها و محدودیت‌هایی نیز دارد. عمده‌ترین محدودیت گیاه‌پالایی در مقایسه با روش‌های پالایش دیگر، زمان‌بر بودن آن است؛ زیرا بیشتر گیاهان بیش‌انباشته‌گر رشد اندکی داشته و زی‌توده کمی نیز تولید می‌کنند، بنابراین ممکن است مدت‌زمان زیادی نیاز باشد تا مکان آلوده پالایش شود (۴۰). همچنین تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی و احتمال ورود آن‌ها به زنجیره غذایی نیز می‌تواند نگران‌کننده باشد (۴۶). ازاین‌رو برداشت زی‌توده گیاهان آلوده حاصل از فرآیند گیاه‌پالایی و دفع آن به‌عنوان یک پسماند خطرناک اهمیت زیادی داشته و باید مطابق با مصوبه حفاظت و اصلاح منابع (Resources Conservation and Recovery Act) صورت گیرد (۲۷). با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند گیاه‌پالایی، فنونی برای بهبود کارایی آن و کاهش مدت‌زمان لازم برای زدودن آلودگی مطرح شده است. استفاده از میکروارگانیسم‌های خاک به‌عنوان یک منبع طبیعی، ارزان و سالم یکی از راهکارهایی است که برای افزایش کارایی فرآیند گیاه‌پالایی مطرح شده است (۲).

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین میکوریز همزیستی مسالمت‌آمیز انواعی از قارچ‌های خاک زی و ریشه گیاهان است (۶). در این نوع همزیستی، قارچ مواد کربوهیدراتی را به‌طور عمده به شکل ساکارز از گیاه دریافت و سپس عناصر غذایی را در اختیار گیاه قرارمی‌دهد (۵۳). قارچ های میکوریز به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: قارچ‌های اکتومیکوریز (Ectomycorrhiza) که در سطح خارجی پوست ریشه گیاه تشکیل هیف می‌دهند و با ریشه اکثر گیاهان مناطق معتدله همزیستی دارند ، و قارچ‌های اندومیکوریز (Endomycorrhiza) که در بین و داخل سلول‌های ریشه گیاه میزبان قرار می گیرند (۴۴). همزیستی بین قارچ‌های میکوریزی و گیاهان عالی از نوع همزیستی اجباری مسالمت‌آمیز است.

در میان عوامل زیستی مؤثر بر فرآیند گیاه‌پالایی، نقش میکروارگانیسم‌های خاک بویژه قارچ‌های میکوریزی حائز اهمیت است (۹). میکروارگانیسم‌های ریزوسفری از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند زی‌توده گیاه و تحمل گیاهان را به فلزات سنگین افزایش دهند (۲۱). درواقع قارچ‌های میکوریزی با داشتن شبکه هیفی گسترده و افزایش سطح و سرعت جذب ریشه، کارایی گیاهان را در جذب آب و عناصر غذایی بویژه عناصر کم‌تحرک فسفر، روی و مس افزایش و موجب بهبود رشد آن‌ها می‌شوند (۴۱). از طرف دیگر، قارچ‌های میکوریزی ارتباط مستقیمی بین خاک و ریشه گیاه ایجاد کرده، در میزان دسترسی گیاه به فلزات نقش مهمی ایفا می‌کنند (۳۶). گزارش شده است که در خاک‌هایی با آلودگی شدید که مقدار فلزات آن‌ها از حد تحمل گیاه فراتر است، تلقیح گیاهان با ریزجانداران ریزوسفری می‌تواند سبب افزایش زی‌توده گیاه و درنتیجه منجر به تثبیت و بازسازی پوشش

گیاهی و همچنین اصلاح خاک‌آلوده به فلزات شود (۱۳). همچنین با بررسی رشد برخی گیاهان مرتعی در خاک‌های آلوده به کادمیوم و با حضور میکروارگانیسم‌های مقاوم به آلودگی، افزایش کادمیوم قابل دسترس برای گیاه و درنتیجه افزایش جذب آن توسط گیاه گزارش شد (۴۵).

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (AM: Arbuscular mycorrhizal) جزء مهم سیستم خاک- گیاه را تشکیل می-دهند و از شناخته‌ترین نوع قارچ‌های اندومیکوریزی هستند. این قارچ‌ها در همه زیستگاه‌ها و اقلیم‌ها وجود داشته و با ریشه اکثر گونه های گیاهی همزیستی دارند (۱۷). قارچ‌های AM تقریباً ۵ تا ۳۶ درصد زی‌توده خاک و ۹ تا ۵۵ درصد زی‌توده میکروارگانیسم‌های خاک را در اراضی کشاورزی شامل می‌شوند. این قارچ‌ها می‌توانند با طیف وسیعی از گیاهان میزبان در شرایط گلخانه و مزرعه همزیست شده و میزبان اختصاصی ندارند. گرچه برای برخی گونه‌های قارچی ممکن است انواع خاصی از گیاهان نسبت به بقیه مطلوب‌تر باشند (۵۴).

حضور قارچ‌های AM و همزیست‌شدن ریشه‌های گیاهان به‌وسیله آن‌ها در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گزارش شده است (۱۴، ۱۸، ۴۳)؛ اما حضور فلزات سنگین در خاک می‌تواند گسترش هیف‌های داخل ریشه‌ای را محدود کند و حتی در غلظت‌های بالای فلزات، گسترش هیف‌های خارج ریشه‌ای نیز متأثر می‌گردد. گونه‌های متعلق به جنس گلوموس (*Glomus*) متداول‌ترین قارچ‌های AM گزارش‌شده در خاک‌های آلوده می‌باشند (۱۹). همچنین محققین زیادی گزارش کرده‌اند که اکوتیپ‌های قارچ‌های AMبرخاسته از خاک‌های آلوده نسبت به قارچ‌های بومی خاک‌های غیرآلوده تحمل‌پذیری و مقاومت بیشتری نسبت به آلاینده‌های فلزی دارند (۱۵). به دلیل اجباری بودن همزیستی قارچ‌های AM با گیاهان و عدم رشد آن‌ها به تنهایی در محیط‌های کشت مرسوم، اطلاعات کمی در مورد مکانیسم‌های دفاعی و مقاومتی این قارچ‌ها نسبت به فلزات سنگین موجود است و بیشتر اطلاعات بر اساس پاسخ گیاه به فلزات آلاینده و مشاهده ساختارهای قارچی در ریشه‌های همزیست شده با قارچ‌ها به‌دست آمده است. درواقع مجزا کردن پاسخ‌های قارچ و گیاه از یکدیگر مشکل است. از طرف دیگر، مکانیسم تحمل قارچ‌های AM در برابر تنش فلزات سنگین یک الگوی عمومی نیست و ممکن است برای گونه‌های مختلف در پاسخ به یک فلز خاص متفاوت باشد. به‌طورکلی مکانیسم‌های چون کلات شدن خارج سلولی آلاینده فلزی، پیوند آلاینده فلزی با اجزای دیواره سلولی قارچ، وجود ناقل‌های اختصاصی و غیراختصاصی فلزات در غشاء پلاسمایی سلول‌های قارچی، ترسیب فلزات در اکوئل‌ها، انتشار یون‌های سمی به خارج سلول از طریق ناقلین اختصاصی و غیراختصاصی در تحمل قارچ‌های AM در برابر تنش فلزات سنگین پیشنهاد شده است (۲۲).

در مورد اثرات تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی قارچ‌های AM بر جوامع گیاهی پژوهش‌های زیادی انجام شده، اما در مورد نقش این قارچ‌ها در تحمل‌پذیری گیاه میزبان نسبت به آلاینده‌های فلزی اطلاعات کمتری در دسترس است. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در همزیستی میکوریزی عواملی از قبیل: ۱) اثرات متقابل فیزیولوژیک بین قارچ و گیاه میزبان در حضور فلزات سنگین؛ ۲) کلات شدن و غیرپویایی فلزات سنگین در میسلیوم‌های قارچ؛ ۳) افزایش ظرفیت جذب عناصر غذایی توسط سیستم ریشه‌ای گیاه منتهی به افزایش زنده‌مانی، رشد و مقاومت گیاه به فلز سنگین؛ ۴) کاهش سمیت فلزات سنگین برای گیاه؛ ۵) اثرات قارچ‌های AM بر ترشحات ریشه‌ای، جامعه میکروبی ریزوسفر و ساختمان خاک به‌ویژه تغییر pH ریزوسفر، در کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین بر گیاه (۲۴، ۱۱). ازآنجایی‌که عناصر فلزی از طریق محلول های آبی جذب و منتقل می‌شوند، افزایش تعرق گیاهی سبب افزایش انتقال این عناصر به اندام‌های هوایی خواهد شد. شکی نیست که همزیستی ریشه با قارچ‌های میکوریزی بر روابط آبی گیاهان تأثیرگذار است. برخی گزارش‌ها حاکی از آن است که میزان تعرق در گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان غیرمیکوریزی به‌طور معنی‌داری بیشتر است (۵۴). قارچ‌های میکوریزی از طریق بهبود جذب عناصر غذایی (۴۷) و یا از طریق افزایش هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه (۵۸) می‌توانند منجر به افزایش نرخ فتوسنتز شوند. از طرف دیگر قارچ‌های میکوریزی همزیست شده با گیاهان از طریق تغییر و تعدیل فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه می-توانند منجر به کاهش سمیت فلز سنگین در گیاه شوند (۲۵) و یا با حفظ و نگهداری فلزات جذب‌شده در ریشه گیاهان و درنتیجه کاهش انتقال فلزات به اندام هوایی، گیاه

میزبان را در برابر غلظت‌های بالای فلزات غیرضروری حفاظت کنند (۲۹).

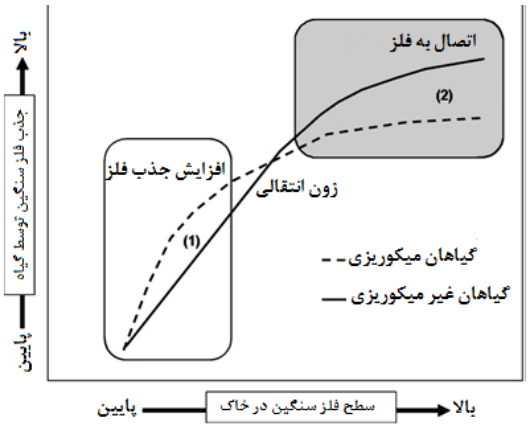
میکروارگانیسم‌های خاک نقش مهمی در جذب عناصر غذایی توسط گیاه و درنتیجه افزایش رشد و مقاومت گیاه در برابر تنش فلزات سنگین ایفا می‌کنند (۳۰). قارچ‌های AM از طریق افزایش سطح تبادلی بین گیاه و خاک (سطح جذب وسیع هیف‌های قارچی)، تولید اسیدهای آلی و افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی می‌توانند منجر به افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه شوند (۵۲). علاوه بر این، تغییرات ایجادشده در ساختار سیستم ریشه‌ای گیاه در پاسخ به میکوریزی شدن نیز می‌تواند کارایی گیاه را در جذب عناصر غذایی افزایش دهد (۲۸). همچنین گزارش شده است که در بسترهای آلوده که جذب عناصر غذایی و رشد گیاه ممکن است محدود شود، قارچ‌های میکوریزی، گیاهان را برای استفاده از مکان‌های جدید برای جذب عناصر غذایی توانا می‌سازند (۸).

همانطورکه ذکر شد گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بر اساس دو فرآیند تثبیت و استخراج گیاهی است. قارچ‌های AM در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با ایجاد کمپلکس نقش اکولوژیک قابل‌توجهی در تثبیت فلزات سنگین توسط گیاه ایفا و درنتیجه به بقای گیاهان میکوریزی کمک می‌کنند. ترکیبات دیواره سلولی قارچ‌های AM حاوی ترکیباتی نظیر آمینواسیدهای آزاد و گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل است که قادرند به فلزات سنگین سمی متصل و آن‌ها را کمپلکس کنند (۳۱). پروتئین‌های دیواره سلولی قارچ‌های میکوریزی نیز توانایی کمپلکس کردن فلزات سنگین را از خود نشان داده‌اند که گلومالین (یک نوع گلیکوپروتئین نامحلول که توسط ریشه‌های همزیست شده و میسیلیوم‌های برون‌سلولی قارچ‌های AM به فراوانی ترشح می‌شود) تولید شده توسط هیف‌های قارچ‌های AM ازجمله آن‌هاست (۲۳). همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که قارچ‌های AM در آلی کردن فلزات در ریزوسفر گیاه نقش دارند و با تجمع فلزات به شکل غیرسمی در ریشه های گیاه و میسیلیوم‌های برون ریشه‌ای به فرآیند تثبیت گیاهی کمک می‌کنند. پیوند فلزات سنگین با کیتین موجود در دیواره سلولی اندام‌های قارچی، ذخیره شدن آلاینده‌های سمی در وزیکول‌های قارچی، پیوند فلزات سنگین با گلومالین نیز از جمله مکانیسم‌های قارچی است که منجر به تخلیه فلزات سنگین از محلول خاک و تثبیت آن‌ها در خاک می‌شود. درواقع قارچ‌ها برای کاهش اثرات سمی فلزات سنگین، شامل آلی کردن آلاینده فلزی به‌وسیله ترشحات قارچی، رسوب دادن آن‌ها در گرانول-های پلی‌فسفات، جذب سطحی عناصر فلزی بر روی دیواره سلولی و کلات کردن آن‌ها در اندام قارچی استراتژی مشابه گیاه میزبان دارند (۲۲).

از طرف دیگر، نتایج تحقیقات متعدد نشان داده است که همزیستی ریشه گیاه با قارچ‌های AM می‌تواند بر فرآیند جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های هوایی گیاه نیز مؤثر باشد. در این صورت همزیستی میکوریزی ایجادشده از جهت استخراج فلزات از خاک توسط گیاه حائز اهمیت بوده، برای اصلاح خاک‌های آلوده مفید خواهد بود (۳۳). در سطح مولکولی، همزیستی ریشه با قارچ‌های میکوریزی می‌تواند بیان ژن‌های کدکننده ناقلین فلزات سنگین در غشاء پلاسمایی را تنظیم کرده، از این طریق بر جذب و انتقال فلزات سنگین مؤثر باشد (۲). همچنین در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، حضور ریزجاندارانی مانند قارچ-های AM در ریزوسفر، با تأثیر بر زیست‌فراهمی فلزات سنگین نقش مهمی بر فرآیند جذب و تجمع فلز سنگین در گیاه ایفا می‌کند (۱۱). ایده کلی در مورد نقش قارچ‌های میکوریزی بر جذب فلز سنگین توسط گیاه این است که قارچ‌های میکوریزی در غلظت پایین فلزات در خاک، میزان جذب فلزات و انتقال آن‌ها به اندام هوایی گیاه را افزایش می دهند، درحالی‌که در غلظت‌های بالای فلزی، قارچ‌ها به‌مانند یک فیلتر میزان جذب فلزی و به‌تبع آن انتقال و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های هوایی را کاهش می دهند و درنتیجه پایداری گیاه در بستر آلوده بهبود می-یابد (۱۰). این مفهوم در شکل ۲ نشان داده شده است.

مرور منابع گذشته نشان می‌دهد که گزارش‌های متناقضی در مورد نقش قارچ‌های AM بر جذب، انتقال و تجمع فلزات سنگین توسط گیاهان مختلف وجود دارد. به‌طوری-که برخی محققین نظیر Bissonnette و همکاران (۱۲) (گیاهان*Salix viminalis* و *Populus* × *generosa*، قارچ *Glomus intraradices*، فلزات کادمیم، روی، مس و سرب)، Mrnka و همکاران (۴۲) (گیاه *Populus nigra*، قارچ *G. intraradices*، فلزات کادمیم، سرب و روی) و صالحی (۴) (گیاه *P. nigra*، قارچ‌های *G. mosseae* و

G. intraradices، فلز سرب) نشان دادند که فرآیند جذب و تجمع فلز سنگین در گیاهان موردمطالعه تحت تأثیر تیمار تلقیح قارچی قرار نگرفت.



شکل ۲- مدلی از فرآیند جذب فلز سنگین توسط گیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی (۱۰)

از طرف دیگر، Arriagada و همکاران (۹) نشان دادند که غلظت آلاینده فلزی در گیاهان میکوریزی افزایش پیدا می-کند. در مقابل برخی گزارش‌های دیگر حاکی از این است که جذب و تجمع فلزات سنگین در گیاهان میکوریزی کاهش می‌یابد (۳۸، ۵۶). نتایج مطالعه زارعی و همکاران (۳) نیز نشان داد که کارایی قارچ‌های AM در گیاه‌پالایی خاک‌های با آلودگی کم تا متوسط فلز روی توسط گیاه ذرت بیشتر به‌صورت استخراج گیاهی بوده ولی در خاک هایی با آلودگی زیاد فلز روی، قارچ *G. intraradices* در تجمع فلز روی در ریشه (تثبیت گیاهی) و قارچ *G. mosseae* در استخراج و انتقال این عنصر به اندام هوایی گیاه (استخراج گیاهی) نقش مؤثرتری داشته است. درواقع نتایج متفاوت در مورد نقش قارچ‌های AMبر جذب و تجمع فلزات سنگین توسط گیاهان مختلف می‌تواند به این دلیل باشد که تأثیر قارچ‌های میکوریزی بر گیاه میزبان در بسترهای آلوده به عوامل متعددی چون گونه گیاهی، نوع قارچ میکوریزی، نوع و غلظت فلز سنگین، شرایط رشد گیاه، ویژگی‌های خاک، سن و وضعیت فیزیولوژیکی و سیستم ریشه‌ای گیاه بستگی دارد (۹، ۴۲). اگرچه نتایج مطالعات انجام شده در زمینه قارچ‌های میکوریز و فلزات سنگین متنوع و وابسته به شرایط آزمایش از جمله ویژگی‌های بستر رشد، نوع گیاه و گونه قارچ همزیست شده است ولی به‌طورکلی به نظر می‌رسد قارچ‌های AM سمیت ایجاد شده توسط فلز سنگین را در گیاه تعدیل می کنند (۱۱).

رهیافت‌های ترویجی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده روشی مفید و با مزایای خاص است و همیاری گیاه و ریزجانداران مفید خاک زی می‌تواند موجب ارتقاء کارایی این فرآیند شود. جذب فلزات سنگین و مقاومت به تنش، هم به گیاه و هم به عوامل مرتبط با خاک شامل میکروارگانیسم‌های موجود در خاک وابسته است، ازاین‌رو همزیستی ریشه گیاه با قارچ‌های AM می‌تواند نقش مهمی در زنده‌مانی و رشد موفق گیاه در خاک‌آلوده داشته باشد (۱۹). بهبود رشد و تولید زی‌توده و درنتیجه افزایش مقاومت گیاهان همزیست شده با قارچ‌های میکوریزی، تحت تنش‌های زیست‌محیطی از قبیل حضور غلظت‌های بالای فلزات سنگین در خاک مورد انتظار است (۱۴، ۴۳)، بااین‌وجود عدم تغییر و حتی کاهش رشد و تولید زی‌توده در نهال‌های میکوریزی نسبت به نهال های غیرمیکوریزی گزارش شده است (۱۲، ۵۶). درواقع نتایج پژوهش‌های متعدد گویای این واقعیت است که توانایی قارچ‌های میکوریزی در حفاظت گیاه در برابر سمیت فلزات سنگین به عوامل متعددی چون گونه گیاهی، نوع و نژاد قارچ میکوریزی، نوع و غلظت فلز سنگین، شرایط رشد گیاه، ویژگی‌های خاک، سن و وضعیت فیزیولوژیکی و سیستم ریشه‌ای گیاه بستگی دارد (۹، ۴۲)، ازاین‌رو توجه به ترکیب مناسب گیاه- قارچ و شرایط مناسب ادافیکی (عوامل خاکی) و اقلیمی ضرورت دارد. از طرف دیگر افزایش دانش در زمینه زیست‌شناسی قارچ‌های میکوریزی و مکانیسم‌های مقاومت به فلز سنگین گیاهان و قارچ‌ها می‌تواند به‌عنوان عوامل ارزشمندی در جهت بهبود کارایی فرآیند گیاه‌پالایی باشد. مثالی در این زمینه استفاده از نژادهای قارچ بومی با منشأ خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است، به‌طوری‌که این قارچ‌ها در مقایسه با نژادهای با منشأ خاک‌های غیرآلوده، سازگاری بیشتری در مقابل تنش ناشی از فلزات سنگین داشته، بنابراین برای فرآیندهای تثبیت و استخراج گیاهی مناسب‌تر خواهند بود (۲۲). بنابراین ضرورت دارد برای سودمندی همزیستی گیاه با قارچ‌های AM در فرآیندگیاه‌پالایی، قارچ‌های بومی و مقاوم به فلزات سنگین جداسازی و مورداستفاده قرار گیرند.

منابع

۱- حسین‌زاده منفرد س.، شیروانی ا.، متینی‌زاده م.، زاهدی ق.، موسوی‌فرد ر.، رستمی ف. ۱۳۹۲. گیاه پالایی در دو گونه چنار و زبان گنجشک پارک ۲۲ بهمن شهر کرج. مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شوند، ۴: ۴۷-۳۹.

۲- زارعی م. ۱۳۸۷. بررسی تنوع قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و کارایی آنها در گیاه پالایی. رساله دکتری، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- زارعی م.، صالح راستین ن.، ثواقبی غ.ر. ۱۳۹۰. کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به روی به وسیله گیاه ذرت. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۵۵: ۱۵۵-۱۶۶.

۴- صالحی، ا. ۱۳۹۳. گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب توسط صنوبرهای بومی ایران (*Populus alba* و *Populus nigra*) همزیست شده با قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا. رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس.

۵- صالحی ا.، طبری کوچکسرایی م.، شیروانی ا.، ۱۳۹۳. زنده‌مانی، رشد و غلظت سرب نهال سپیدار (*Populus alba* clone 44/9) در خاک آلوده به سرب. مجله جنگل ایران، ۴: ۴۳۳-۴۱۹.

۶- متینی‌زاده م.، علی‌احمدکروری س.، خوشنویس م.، تیموری م. ۱۳۸۴. شناسایی قارچ‌های میکوریزی همزیست با ارس (*Juniperus excelsa*) و بررسی فراوانی آنها در رویشگاه سیراچال. مجله تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۴: ۴۰۰-۳۸۵.

7- Abdullahi, M.S., Uzairu, A.,and Okunola, O.J. 2009. Quantitative determination of heavy metal concentration in onion leaves. International Journal of Environmental Research, 3: 271-274.

8- Ahonen-Jonnarth, U., and Finlay, R.D. 2001. Effects of elevated nickel and cadmium concentrations on growth and nutrient uptake of mycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. Plant and Soil, 236: 129-138.

9- Arriagada, C.A., Herrera, M.A., and Ocampo, J.A. 2005. Contribution of arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of *Eucalyptus globulus* to Pb. Water, Air, and Soil Pollution, 166: 31-47.

10- Audet, P.,and Charest, C. 2007. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives. Environmental Pollution, 147: 609-614.

11- Biro, I.,and 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.

12- Bissonnette, L., St-Arnaud, M., and Labrecque, M. 2010. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field trial. Plant and Soil, 332: 55-67.

13- Brud, G.I., Dixon, D.G.,and Glick, B.R. 1998. Plant growth promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings. Applied and Environmental Microbiology, 64(10): 3663-8.

14- Cicatelli, A., Lingua, G., Todeschini, V., Biondi, S., Torrigiani,P., and Castiglione, S. 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi restore normal growth in a white poplar clone grown on heavy metal-contaminated soil, and this is associated with upregulation of foliar metallothionein and polyamine biosynthetic gene expression. Annals of Botany, 106: 791-802.

15- Díaz, G., Azcon-Aguilar, C., and Hornubia, M. 1996. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cystoides*. Plant and Soil, 180:241–249.

16- Emami, A.S., Tabari Kouchaksaraei, M., Bahramifar, N., Salehi, A. 2016. Gas exchange responses of two poplar clones (*Populus euramericana* (Dode) Guinier 561/41 and *Populus nigra* Linnaeus 63/135) to lead toxicity. Journal of Forest Science, 62 (9): 422–428.

17- Fan, Y., Luan, Y., An, L., and Yu, K. 2008. Arbuscular mycorrhizae formed by *Penicillium pinophilum* improve the growth, nutrient uptake and photosynthesis of strawberry with two inoculum-types. Biotechnology Letters, 30: 1489-94.

18- Gamalero, E., Cesaro, P., Cicatelli, A., Todeschini, V., Musso, C., Castiglione, S., Fabiani, A., and Lingua, G. 2012. Poplar clones of different sizes, grown on a heavy metal polluted site, are associated with microbial populations of varying composition. Science of the Total Environment, 425: 262-270.

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

20- Ghosh, M., and Singh, S.P. 2005.A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts.Applied Ecology and Environmental Research, 3: 1-18.

21- Glick, B.R. 2003. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. Biotechnology Advances, 21: 383–393.

22- Gohre, V., and Paszkowski, U. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta, 223: 1115-1122.

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

24- Gonzalez-Guerrero, M., Azcon-Aguilar, C., Mooney, M., Valderas, A., MacDiarmid, C.W.,

Eide, D.J., and 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.
25- Han, S.H., Kim, D.H., and Lee, J.Ch. 2011. Effects of the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius* and Cd on physiological properties and Cd uptake by hybrid poplar *Populusalba* × *glandulosa*. Journal of Ecology and Field Biology, 34: 393-400.
26- He, J., Ma, C., Ma, Y., Li, H., Kang, J., Liu, T., Polle, A., Peng, C., and Luo, Z. 2013. Cadmium tolerance in six poplar species. Environmental Science and Pollution Research, 20: 163-174.
27- Henry, J.R. 2000. An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation office. Washington, D.C. P. 55.
28- Hooker, J.E., Munro, M., and Atkinson, D. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi induced alteration in poplar root system morphology. Plant and Soil, 145: 207-214.
29- Joner, E.J., and 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.
30- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. Geoderma, 122: 143-149.
31- Kapoor, A., and Viraraghavan, T. 1995. Fungal biosorption-an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewater. Bioresource Technology, 53: 195-206
32- Karlinski, L., Rudawska, M., Kieliszewska-Rokicka, B., and Leski, T. 2010. Relationship between genotype and soil environment during colonization of poplar roots by mycorrhizal and endophytic fungi. Mycorrhiza, 20: 315-324.
33- Khan, A.G. 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 18:355–364.
34- Kramer, U. 2005. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. Current Opinion in Biotechnology, 16: 133-141.
35- Kvesitadze, G., Khatisashvili, G., Sadunishvili, T., and Ramsden, J.J. 2006. Biochemical Mechanisms of Detoxification in Higher Plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Pp: 245.
36- Leyval, C., Turnau, K., and Haselwandter, R. 1997. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. Mycorrhiza, 7: 139-153.
37- Li, X.L., and Feng, G. 2001. Ecology and Physiology of Arbuscular Mycorrhiza. Huawen Press Beijing.
38- Lingua, G., Franchin, C., Todeschini, V., Castiglione, S., Biondi, S., Burlando, B., Parravicini, V., Torrigiani, P., and Berta, G. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones. Environmental Pollution, 153: 137-147.
39- Liu, J.N., Zhou, Q.X., Wang, S., and Sun, T. 2009. Cadmium tolerance and accumulation of *Althaea rosea* Cav. And it's potential as a hyperaccumulator under chemical enhancement. Environmental Monitoring and Assessment, 149: 419-427.
40- Lombi, E., Zhao, F.J., Dunham, S.J., and McGrath, S.P. 2001. Phytoremediation of heavy-metal contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. Journal of Environmental Quality, 30: 1919-1926.
41- Marschner, H., and Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. Plant and Soil, 159: 89-102.
42- Mrnka, L., Kuchár, M., Cieslarová, Z., Matějka, P., Száková, J., Tlustoš, P., and Vosátka, M. 2012. Effects of endo- and ectomycorrhizal fungi on physiological parameters and heavy metals accumulation of two species from the family salicaceae. Water, Air, and Soil Pollution, 223: 399-410.
43- Pallara, G., Todeschini, V., Lingua, G., Camussi, A., and Racchi, M.L. 2013. Transcript analysis of stress defence genes in a white poplar clone inoculated with the arbuscular mycorrhizal fungus Glomus mosseae and grown on a polluted soil. Plant Physiology and Biochemistry, 63: 131-139.
44- Quilambo, O.A. 2003. The vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. African Journal of Biotechnology, 2: 539-546.
45- Rahmanian, M. Khodaverdiloo, H. Rezaee-Danesh, Y., and Rasouli-Sadaghiani, M.H. 2011. Effects of heavy metal resistant soil microbes inoculation and soil Cd concentration on growth and metal uptake of millet, couch grass and alfalfa. African journal of microbiology research, 5: 403-410.
46- Raskin, I., and Ensley, B.D. 2000. Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment. John Wiley & Sons, Inc., New York. Pp: 304.
47- Reid, C.P.P., Kidd, F.A., and Ekwebelam, S.A. 1983. Nitrogen nutrition, photosynthesis and carbon allocation in ectomycorrhizal pine. Plant and Soil, 71: 415-432.
48- Saba, H., Jyoti, P., and Neha, S. 2013. Mycorrhizae and Phytochelators as Remedy in Heavy Metal Contaminated Land Remediation. International Research Journal of Environment Sciences, 2(1): 74-78.
49- Salehi, A., Tabari Kouchaksaraei, M., Mohammadi Goltapeh, E., Shirvany, A., and Mirzaei, J. 2016. Effect of mycorrhizal inoculation on black and white poplar in a lead-polluted soil. Journal of Forest Science, 62: 223–228.
50- Salehi, A., Tabari, M. 2008. Accumulation of Zn, Cu, Ni and Pb in soil and lesf of *Pinus eldarica* Medw. Following irrigation with municipal effluent. Research Journal of Environmental Sciences, 2: 291-297.
51- Sebastiani, L., Scebba, F., and Tognetti, R. 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus*

deltoides × *maximowiczii*) and I-214 (*P.* ×*euramericana*) exposed to industrial waste. Environmental and Experimental Botany, 52: 79-88.
52- Sheng, X.F., and Xia J.J. 2006. Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria. Chemosphere, 64: 1036-1042.
53- Smith, S.E., Facelli, E., and Pope, S. 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. Plant and Soil, 326: 3-20.
54- Smith, S.E.,and Read, D.J. 1997. Mycorrhizal Symbioses, second ed. Academic Press, San Diego, USA.
55- Tabari, M., and Salehi, A. 2009. Long-term impact of municipal sewage irrigation on treated soil and black locust trees in a semi-arid suburban area of Iran. Journal of Environmental Sciences, 21: 1438-1445.
56- Todeschini, V., Franchin, C., and Castiglione, S. 2007. Responses to copper of two registered poplar clones inoculated or not with arbuscular mycorrhizal fungi. Caryologia, 60: 146-155.
57- Ward, O.P., and Singh, A. 2004. Soil bioremediation and phytoremediation-An overview. In: Singh A, Ward OP (eds) Springer, Berlin, Applied bioremediation and phytoremediation 1: 1-11.
58- Wu, Q.S., Xia, R.X., Zou, Y.N., and Wang, G.Y. 2007. Osmotic solute responses of mycorrhizal citrus (*Poncitrus trifoliate*) seedlings to drought stress. Acta physiologica Plantarum, 29: 543-549.
59- Yang, X.E., Long, X.X., Ye, H.B., He, Z.L., Calvert, D.V., and Stoffella, P.J. 2005. Cadmium tolerance and hyperaccumulaion in a new Zn hyperaccumulating plant species. Plant and Soil, 259: 181-189.

Effect of symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation processes in the soils contaminated with heavy metals

Azadeh Salehi and Mohammad Matinizadeh

Research Institute of Forest and Rangeland, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I.R. of Iran

Abstract

Contamination of soil with heavy metals has detrimental effects on ecosystems, because heavy metals accumulated in soil may persist and affect terrestrial ecosystems for a long time. Phytoremediation, as sustainable, low-cost and environmental friendly technology based on the direct use of plants for in situ remediation of contaminated soil, sludges, sediments, and ground water through contaminant removal, degradation or containment, is becoming an important objective in recent plant research. As phytoremediation is a slow process, improvement of efficiency and thus increased stabilization or removal of heavy metals from soils is an important goal. Among biotic factors, the role of soil microorganisms, especially mycorrhizal fungi, on phytoremediation is considerable. As efficiency of plants in phytoremediation process in symbiosis with this soil suitable microorganisms can be increased. So in this review, the contribution of arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation process in the soils contaminated with heavy metals was considered with regard to the survey and explanation of the results of previous studies. The survey results demonstrated that the potential of arbuscular mycorrhizal fungi to the plant tolerance to heavy metals depends on many factors including plant and fungus species, type and concentration of heavy metals of soil, growth condition of plant, soil properties, age, physiological status and root system of plant.

Key words: Arbuscular mycorrhizal fungi, Heavy metals, Phytoremediation, Soil pollution