نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هشتم/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۳/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۳۱ تا ۴۳

تأثیر مایه‌زنی قارچ میکوریز بر جذب برخی عناصر سنگین توسط جعفری در یک خاک آلوده تیمار شده با نفت سفید

نعمت‌الله زکوی[۱*]، حبیب‌اله نادیان[۱]، بیژن خلیلی‌مقدم[۱] و عبدالامیر معزی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۹)

چکیده

قارچ‌های میکوریز آربسکولار در بهبود رشد گیاهان و کاهش اثرات منفی آلاینده‌ها حائز اهمیت‌اند. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مایه‌زنی قارچ میکوریز بر غلظت عناصر سنگین جعفری (*Petroselinum sativum*) در یک خاک آلوده به عناصر سنگین در حضور نفت سفید بود. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کامل تصادفی، با چهار تکرار، در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. فاکتورهای آزمایشی ۱- مایه‌زنی میکروبی در دو سطح مایه‌زنی با قارچ میکوریز (*Rhizophagus irregularis*) و شاهد (بدون مایه‌زنی میکویز) و ۲- نفت سفید در چهار سطح صفر، ۴، ۸ و ۱۲ میلی‌لیتر بر کیلوگرم خاک بودند. نتایج نشان داد مایه‌زنی میکوریز سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه (۶۱/۱ تا ۱۵۰/۰ درصد) و اندام هوایی (۹/۱ تا ۵۱/۵ درصد)، غلظت فسفر، روی و مس اندام هوایی و غلظت سرب (۱۸/۷ تا ۹۷/۹ درصد) و کادمیوم (۱۳/۳ تا ۹۸/۶ درصد) ریشه شد. درحالی‌که غلظت سرب (۱۰/۰ تا ۲۹/۲ درصد) و کادمیوم (۱۹/۶ تا ۷۲/۱ درصد) در اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. مقدار فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) در ریشه (۷/۷۴ درصد) بیشتر از اندام هوایی بوده است. مایه‌زنی میکوریز سبب کاهش فاکتور انتقال گیاهی (TF) سرب و کادمیم شد. فاکتور انتقال کمتر از یک نشان می‌دهد که قارچ میکوریزا سرب و کادمیوم را در ریشه غیر متحرک کرده و از انتقال آن‌ها به اندام هوایی جلوگیری کرده است. ازاین‌رو مایه‌زنی میکوریز می‌تواند با تغلیظ زیستی (BCF) سرب و کادمیوم در ریشه و کاهش انتقال آن‌ها به اندام هوایی جعفری در خاک‌های آلوده مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، عناصر سنگین، میکوریز

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران.
۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zakavi1988@yahoo.com

مقدمه

آلودگی عناصر سنگین یک مسئله زیست‌محیطی جهانی است که در سال‌های اخیر موردتوجه بسیار قرار گرفته است. آلودگی این فلزات به‌عنوان یکی از جدی‌ترین خطرات برای محیط‌زیست و سلامت انسان شناخته شده است (۲۷). فعالیت‌های انسانی به‌طور چشمگیری روند آلودگی محیط‌زیست را با تخلیه مواد زائد خطرناک به خاک و آب تسریع می‌کند. عناصر سنگین غیرقابل‌تجزیه هستند و غلظت بیش از حد آن‌ها در خاک می‌تواند وارد زنجیره غذایی گیاهانی مانند برنج و سبزی‌ها شود که نگرانی‌های زیادی برای ایمنی سلامت انسان است (۱۱). عناصر سنگین می‌توانند در دانه‌ها تجمع یافته و بخشی از زنجیره غذایی شوند و به محض ورود به رژیم غذایی انسان، باعث به مخاطره افتادن سلامتی انسان شوند. هنگامی که عناصر سنگین وارد محیط‌زیست شوند، برای سال‌ها بدون تجزیه باقی می‌مانند. در سطح جهان خاک‌ها توسط سرب، کادمیوم و تا حدودی توسط روی آلوده شده‌اند (۱۷). نتایج بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر تأثیر عناصر سنگین مانند آرسنیک، کادمیم، کروم، سرب و جیوه به‌عنوان عناصر سمی و غیرضروری دسته‌بندی می‌شوند. درحالی‌که دیگر موارد مانند مس، نیکل، و روی عناصر اساسی هستند، اما ممکن است در غلظت‌های بیشتر باعث سلامت انسان یا مسمومیت گیاه شوند (۲۶).

آلودگی نفتی سبب کاهش حاصلخیزی خاک و اثرات منفی بر رشد گیاهان می‌شوند که برای سلامتی انسان و ریزجانداران خاک محسوب می‌شود. نفت در خاک باعث کاهش نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل‌دسترس، اکسیژن و آب قابل‌استفاده می‌شود؛ بنابراین کاهش این عوامل موجب کاهش رشد گیاه می‌شود (۲).

روش‌های شیمیایی و فیزیکی متفاوتی برای حذف آلاینده‌ها در محیط‌زیست وجود دارد که به‌دلیل هزینه زیاد و تجزیه ناقص آلاینده‌ها، کارایی محدودی دارند. به همین خاطر توجه پژوهشگران به روش‌های زیستی؛ مانند تهویه زیستی، افزایش زیست‌توده میکروبی و سایر روش‌ها برای حذف آلاینده‌های آلی در خاک معطوف شده است. خاک یکی از پیچیده‌ترین اکوسیستم‌های جهان است، در توده خاک، قارچ‌ها یک بخش بیولوژیکی ضروری است که پیوستگی زنجیره گیاه و خاک را حفظ می‌کند. در میان قارچ‌های میکوریز، اندومیکوریزها دارای بیشترین جمعیت در خاک هستند که کمابیش در همه انواع خاک‌ها دیده می‌شوند. قارچ‌های وزیکولار آربسکولار میکوریز (VAM)، اندام‌های وزیکول و آربسکول تولید می‌کنند. حدود ۸۵ درصد از تمام گونه‌های گیاهی در سراسر جهان در همهٔ اکوسیستم‌ها با قارچ میکوریز هم‌زیست می‌شوند (۱۰). پژوهش‌های زیادی بر تأثیر همزمان عوامل زنده و غیرزنده در خاک و برهمکنش آن‌ها تأکید داشته‌اند. درون خاک، ریشه گیاهان با هیف‌های قارچ میکوریز آربسکولار پیوند تشکیل می‌دهند. این شبکه گسترده از هیف‌های قارچ میکوریز در تشکیل خاکدانه، تنظیم جریان آب در خاک، افزایش منافذ و کاهش فرسایش خاک مفید هستند (۳).

مطالعات زیادی نشان داده است که قارچ‌های میکوریز آربسکولار می‌توانند تنش عناصر سنگین در گیاه را کاهش دهند (۱۷). در پژوهشی روی کشت گیاه *Solanum nigrum* L. و هم‌زیستی با قارچ میکوریز (*Rhizophagus intraradices* و *Funneliformis mosseae*) دیده شد که مایه‌زنی میکوریز باعث افزایش معنی‌دار وزن ماده خشک اندام هوایی، غلظت و محتوی کادمیوم در اندام هوایی گیاه شد (۲۲). همچنین این هم‌زیستی گونه‌های انتخاب‌شده از قارچ میکوریز سبب افزایش فاکتور تغلیظ زیستی، فاکتور انتقال عنصر از ریشه به اندام هوایی و بنابراین باعث افزایش محتوی کادمیوم در گیاه شد. در پژوهشی با کشت گیاه *Salix alba* L. و هم‌زیستی میکوریز (*Rhizophagus irregularis*) بر جذب عناصر سنگین سرب، کادمیوم و مس به این نتیجه رسیدند که مایه‌زنی میکوریز باعث بهبود وزن ماده خشک اندام هوایی و ریشه و همچنین خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، افزایش فاکتور تغلیظ زیستی سرب، مس و کادمیوم در اندام هوایی شد (۲۳).

خداویسی و همکاران (۱۹) در بررسی اثر استفاده از نفت

سفید به‌عنوان علف‌کش بر جذب فلزات سنگین، رشد و شاخص‌های فیزیولوژیکی جعفری، هویج و گشنیز گزارش داده‌اند که مقدار عملکرد وزن تر و خشک، کلروفیل سبزی‌ها، همچنین مقادیر پرولین و آنتوسیانین با افزایش میزان نفت سفید کاهش یافت. اما با افزایش غلظت نفت سفید، غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی هر سه نوع سبزی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

خداویسی و همکاران (۱۹) گزارش داده‌اند که در مزارع سبزی آلوده به نفت سفید، گیاهان هویج، جعفری و گشنیز کاشته می‌شود که به‌طور معمول در طی چند سال گذشته از نفت سفید با غلظت‌هایی تا ۸ میلی‌لیتر بر کیلوگرم خاک برای کنترل علف‌های هرز این نوع سبزی‌ها استفاده می‌شود. سرخه و خلیلی‌مقدم (۲۹) نیز گزارش داده‌اند که کاربرد نفت سفید در مزارع سبزی باعث افزایش جذب کادمیم، سرب و مس بیش از حد مجاز در سبزی‌ها شده است و خطر انتقال آلاینده‌های یادشده به زنجیره غذایی را در پی دارد. باتوجه‌به اینکه سبزی یکی از منابع مهم غذایی است و حضور این عناصر سنگین در محیط‌زیست و جذب آن‌ها به‌وسیله سبزی‌ها سلامت انسان را به مخاطره می‌اندازد، پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اثر مایه‌زنی قارچ میکوریز بر وضعیت جذب عناصر سرب و کادمیوم به‌وسیله جعفری در یک خاک آلوده به نفت سفید انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش گلدانی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با دو فاکتور ۱- قارچ میکوریز (مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus irregularis* (نام سابق: *Glomas intraradices*) و عدم مایه‌زنی) و ۲- غلظت‌های مختلف نفت سفید در چهار سطح (صفر، ۴، ۸ و ۱۲ میلی‌لیتر بر کیلوگرم خاک) با گیاه جعفری در چهار تکرار در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. به‌منظور انجام این پژوهش نمونه‌برداری خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری مزارع آلوده انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک

پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک تهیه شده، بافت خاک به روش هیدرومتری (۹) اندازه‌گیری شد. سپس ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره گِل اشباع (۳۰) اندازه‌گیری شد. همچنین ماده آلی خاک به‌روش اکسیداسیون تر و سپس تیتراسیون با فروآمونیوم سولفات (۲۴) اندازه‌گیری شد. فسفر قابل‌دسترس با استفاده از بی‌کربنات سدیم، ۰/۵ مولار (۲۵) عصاره‌گیری شد. سپس غلظت فسفر در عصاره‌ها به‌روش رنگ‌سنجی و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. پتاسیم قابل‌دسترس خاک با استفاده از استات آمونیوم یک مولار عصاره‌گیری شد و غلظت پتاسیم در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت قابل جذب عناصر مس، روی، سرب و کادمیم نیز با محلول DTPA اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

کشت گلخانه‌ای و آنالیز گیاه

برای کشت گیاه، گلدان‌ها با ۷۵ درصد خاک استریل و ۲۵ درصد ماسه استریل (نمونه‌های خاک و ماسه در اتوکلاو به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۲۱ درجهٔ سانتی‌گراد و فشار ۱۵ پاسکال استریل شدند) به‌صورت یکنواخت مخلوط، سپس پر شدند. سپس بذرها در ژرمیناتور قرار داده شد. پس از اینکه طول ریشه‌ها به ۱ تا ۱/۵ سانتی‌متر رسید، گیاهچه‌ها به گلدان‌های حاوی میزان ۳ کیلوگرم خاک انتقال داده شد؛ به این ترتیب که ابتدا درون هر گلدان ۵ حفره به عمق ۳ سانتی‌متر و به فاصله ۵ سانتی‌متر از یکدیگر توسط میله شیشه‌ای تمیز ایجاد شد. سپس در تیمارهای میکوریزی ۳۰ گرم مایه تلقیح قارچ میکوریز (*Rhizophagus irregularis*) شامل اسپور (۱۰ اسپور در هر گرم بستر)، هیف و قطعات کلونیزه شده (۸۵ تا ۹۰ درصد) به خاک اضافه شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه نگهداری شدند. در طول دوره رشد رطوبت گلدان‌ها به‌روش وزنی در حد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. محلول غذایی نیز بر اساس

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی	pH	مواد آلی (٪)	هدایت الکتریکی $dS\ m^{-1}$	فسفر $mg\ kg^{-1}$	پتاسیم $mg\ kg^{-1}$	مس $mg\ kg^{-1}$	روی $mg\ kg^{-1}$	سرب $mg\ kg^{-1}$	کادمیوم $mg\ kg^{-1}$	بافت خاک
مقدار	۷/۵	۰/۵۴	۲/۳	۴/۳	۱۵۲	۲/۴۲	۱/۶۲	۱۲/۶۸	۱۷/۴۸	رسی

آزمون خاک به گلدان‌ها داده شد. پس از رشد و استقرار گیاه به مدت دو هفته، تیمارهای نفتی در غلظت‌های صفر، ۴، ۸ و ۱۲ میلی‌لیتر در کیلوگرم خاک (باتوجه‌به سطح آلودگی مزارع شمال خوزستان) به‌صورت اسپری روی سطح خاک اعمال شد. در انتهای هفتهٔ دوازدهم رشد، میزان پرولین اندام هوایی در برگ سبز جعفری به روش بیتس و همکاران (۵) اندازه‌گیری شد، وزن خشک ریشه و اندام هوایی (ساقه و برگ) گیاه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های گیاه به‌منظور آنالیزهای شیمیایی آسیاب شدند. میزان فسفر گیاه به روش رنگ‌سنجی وانادات مولیبدات توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۱۲). همچنین میزان کادمیوم، سرب، مس و روی هم به روش خاکسترگیری خشک و سپس با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی وضعیت عناصر سنگین سرب و کادمیوم در گیاه فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) و فاکتور انتقال گیاهی (TF) بر اساس روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (۱۴):

$$BCF = \frac{C_P}{C_S} \qquad (۱)$$

که در آن BCF فاکتور تغلیظ زیستی، C_P غلظت عنصر در ریشه یا اندام هوایی گیاه ($mg\ kg^{-1}$) و C_S غلظت کل عنصر در خاک ($mg\ kg^{-1}$) است.

$$TF = \frac{C_P^{shoot}}{C_P^{root}} \qquad (۲)$$

که در آن TF فاکتور انتقال عنصر از ریشه به اندام هوایی است. C_P^{shoot} و C_P^{root} به‌ترتیب غلظت عنصر در اندام هوایی و ریشه گیاه ($mg\ kg^{-1}$) است.

تجزیه‌وتحلیل آماری

پس از بررسی و نرمال‌سازی داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS v 9.2 و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد. همچنین از نرم‌افزار Excel برای رسم شکل‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

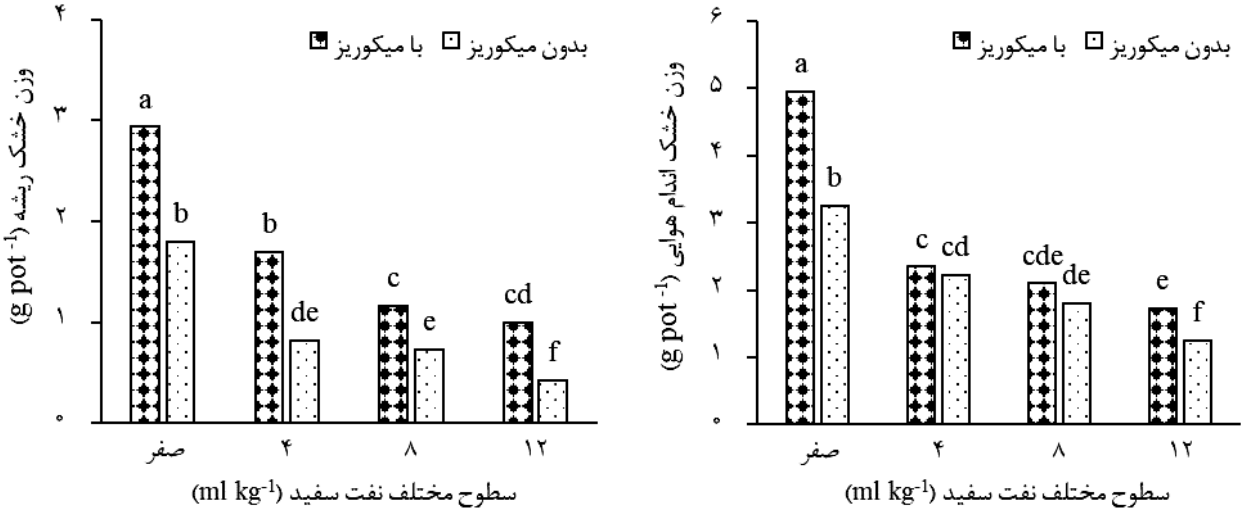
شاخص‌های رویشی گیاه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در بررسی اثر تیمارهای میکوریز، نفت سفید و برهمکنش آن‌ها بر وزن ماده خشک اندام هوایی و ریشه گیاه جعفری معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود (جدول ۲). بررسی وزن ماده خشک اندام هوایی و ریشه گیاه نشان داد که با افزایش غلظت نفت سفید در خاک، وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه در تیمارهای با و بدون هم‌زیستی میکوریز به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) کاهش یافت (شکل ۱). همچنین این ویژگی در تیمارهای میکوریز نسبت به تیمارهای بدون میکوریز به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. مقایسه تیمارهای با و بدون هم‌زیستی میکوریز نشان داد مایه‌زنی میکوریز به‌طور میانگین، ماده خشک اندام هوایی و ریشه گیاه را به‌ترتیب ۲۷/۱ و ۹۸/۷۵ درصد افزایش داد (شکل ۱). دلیل کاهش وزن ماده خشک گیاه با افزایش غلظت نفت سفید در خاک را می‌توان به کاهش سنتز پروتئین‌ها، ایجاد ناهنجاری در تنفس سلولی، فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های ضروری در متابولیسم طبیعی گیاه در پی تنش عناصر سنگین سرب و کادمیوم نسبت داد (۱۵، ۱۶ و ۳۱). سایر پژوهشگران نیز به این نتیجه رسیده‌اند که در گیاهان، تنش عناصر سنگین متابولیسم گیاه را برهم زده و با کاهش جذب

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر وزن ماده خشک اندام هوایی و ریشه گیاه

منابع تغییر	درجه آزادی (df)	وزن ماده خشک اندام هوایی	وزن ماده خشک ریشه
میکوریز	۱	۳/۳۶**	۴/۵۴**
نفت سفید	۳	۱۰/۴۵**	۴ /۲۸**
میکوریز × نفت سفید	۳	۱/۰۲**	۰/۱۹**
خطا	۲۴	۰/۰۸	۰/۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۱۱/۸۴	۹/۱۷

** : تفاوت در سطح ۱ درصد است



(میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P <۰/۰۵) ندارند.)

شکل ۱. مقایسه میانگین وزن ماده خشک اندام هوایی (الف) و ریشه (ب) گیاه در تیمارهای مختلف

عناصر ضروری پرمصرف و کم‌مصرف، رشد گیاه را کاهش می‌دهد (۲۷ و ۲۸). سرب از تقسیم سلول‌های مریستمی و سلول‌های ریشه جلوگیری کرده و وزن خشک ریشه گیاهان را می‌کاهد (۶). سرب می‌تواند جایگزین منیزیم در ساختار کلروفیل شده و با جلوگیری از دریافت نور، فتوسنتز در گیاه را مختل کرده و در نتیجه باعث کاهش عملکرد گیاه شود (۱۶). افزون بر این تنش، اکسیداتیو و رادیکال‌های آزاد اکسیژن ایجاد شده در پی سمیت سرب در گیاه یک عامل بازدارنده برای فتوسنتز است (۲۱). افزایش رشد گیاه در تیمارهای میکوریز نسبت به تیمار شاهد نیز می‌تواند به‌دلیل افزایش جذب عناصر غذایی ضروری توسط گیاه و بهبود شرایط تغذیه‌ای در پی هم‌زیستی گیاه با میکوریز باشد (۱۶).

غلظت فسفر، روی و مس اندام هوایی

در بررسی آماری داده‌ها اثر تیمارهای میکوریز، نفت سفید و برهمکنش آن‌ها بر غلظت عناصر غذایی فسفر، روی و مس اندام هوایی گیاه جعفری معنی‌دار (p<۰/۰۱) بود (جدول ۳). با افزایش سطح آلودگی نفت سفید در خاک، غلظت این عناصر غذایی در اندام هوایی گیاه در مقایسه با تیمار شاهد (خاک غیرآلوده)

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر میزان پرولین، فسفر، روی و مس اندام هوایی گیاه

منابع تغییر	درجه آزادی (df)	پرولین	فسفر اندام هوایی	روی اندام هوایی	مس اندام هوایی
میکوریز	۱	۷۸/۷۵**	۸/۵۷**	۲۷/۹۳**	۴۷/۲۸**
نفت سفید	۳	۲۲۷/۲۲**	۳/۴۵**	۲۴۱/۴۸**	۱۹۱ /۴۳**
میکوریز × نفت سفید	۳	۱/۳۸*	۰/۱۸**	۰/۵۱**	۲/۸۶**
خطا	۲۴	۰/۳۱	۰/۰۰۱	۰/۰۵	۰/۰۶
ضریب تغییرات (٪)		۵/۱۲	۲/۳۱	۱/۶۶	۳/۸۸

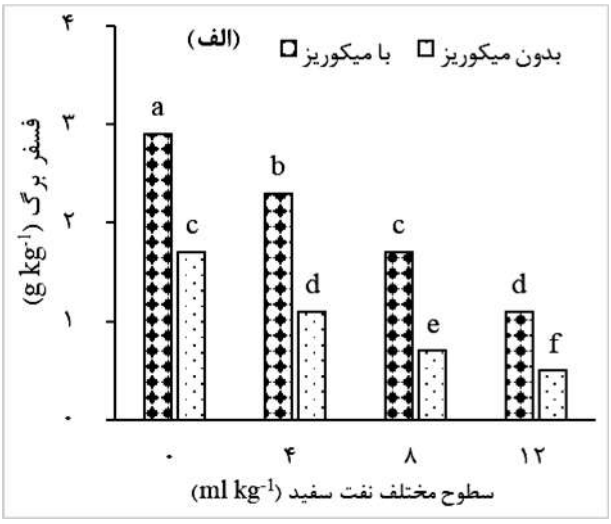
* و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و تفاوت در سطح ۵ و ۱ درصد است

به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. غلظت این عناصر در تیمارهای با مایه‌زنی میکوریز نسبت به تیمار غیرمیکوریز به‌طور معنی‌داری ($p<0/01$) بیشتر بود (شکل ۲). در این پژوهش کاهش وزن خشک ریشه (شکل ۱- ب) و کاهش سیستم توسعه ریشه، ممکن است سبب کاهش سطح جذب ریشه و در نتیجه کاهش جذب این عناصر غذایی توسط گیاه با افزایش سطح آلودگی در خاک، می‌تواند منتج به کاهش وزن ماده خشک اندام هوایی گیاه جعفری (شکل ۱- الف) شده باشد. در نتایج سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده که کاهش جذب عناصر غذایی می‌تواند به‌دلیل کاهش غلظت و فراهمی عناصر غذایی در خاک به علت سمیت ناشی از عناصر آلاینده باشد (۷). به‌طور میانگین جذب عناصر غذایی فسفر، مس و روی در تیمارهای میکوریز نسبت به تیمارهای غیرمیکوریز در گیاه جعفری به‌ترتیب ۱۱۰/۶۳، ۶۷/۲۴ و ۱۵/۶۱ درصد افزایش یافت، قارچ‌ریشه‌های میکوریز به‌دلیل سیستم هیفی گسترده و همچنین افزایش چشمگیر توسعه ریشه گیاه منجر به افزایش فراهمی عناصر غذایی مختلف از جمله فسفر و روی می‌شوند (۲۰).

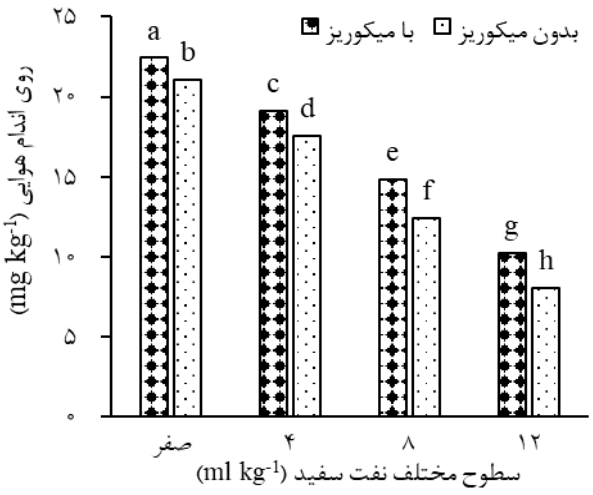
غلظت سرب و کادمیوم اندام هوایی و ریشه

در بررسی آماری داده‌ها اثر تیمارهای میکوریز، نفت سفید و برهمکنش آن‌ها بر غلظت عناصر سنگین سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی گیاه جعفری معنی‌دار ($p<0/05$) بود (جدول ۴). با افزایش سطح نفت سفید در خاک غلظت این عناصر در ریشه و اندام هوایی گیاه در مقایسه با تیمار شاهد (خاک غیرآلوده) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. غلظت سرب و کادمیوم در تیمارهای با مایه‌زنی میکوریز نسبت به تیمار غیرمیکوریز به‌طور معنی‌داری در اندام هوایی کمتر و در ریشه بیشتر بود (جدول ۵). انباشت سرب و کادمیوم در ریشه (Phyto-stabilization) گیاه جعفری هم‌زیست شده با قارچ میکوریز سبب کاهش معنی‌دار ($p<0/05$) غلظت این عناصر در اندام هوایی این سبزی شده است (جدول ۵). مایه‌زنی میکوریز به‌طور میانگین، غلظت سرب و کادمیوم را به‌ترتیب ۶۴/۴ و ۴۹/۴۲ درصد در ریشه گیاه افزایش و به‌ترتیب ۱۸/۵۱ و ۴۱/۹۵ درصد در اندام هوایی نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی میکوریز کاهش داد.

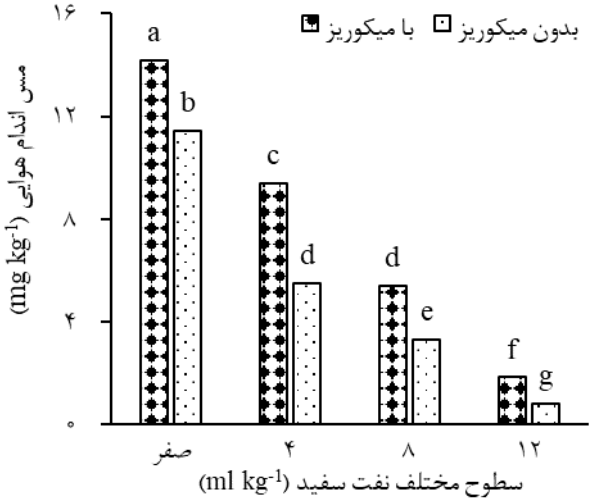
بررسی فاکتور انتقال عناصر سرب و کادمیوم (جدول ۶) نشان می‌دهد، ممکن است مایه‌زنی میکوریز با توسعه ریشه و میسیلیوم‌ها علاوه بر افزایش جذب عناصر غذایی، سبب غیر متحرک سازی عناصر سنگین در ریشه نسبت به اندام هوایی نیز شده است (۳۲) کاهش غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه (*Lonicera japonica*) با تثبیت سبز این عنصر در ریشه به‌وسیله هم‌زیستی میکوریز گونه‌های (*Glomus versiforme*, *Rhizophagus intraradices*) نیز گزارش شده است (۱۳). تثبیت سبز کادمیوم در ریشه (Phyto-stabilization) گیاه (*Trigonella foenumgraecum*) هم‌زیست با قارچ میکوریز گونه‌های (*Glomus monosporum*, *Glomus clarum*, *Gigaspora nigra*) را گزارش کرده‌اند (۱).



(الف)



(ب)



(ج)

(میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P <۰/۰۵) ندارند.)

شکل ۲. مقایسه میانگین میزان فسفر (الف)، روی (ب) و مس (ج) اندام هوایی در تیمارهای مختلف

جدول ۴. تجزیه واریانس ویژگی‌های مورد مطالعه برای تیمارهای مورد بررسی

منابع تغییر	درجه آزادی (df)	سرب اندام هوایی	سرب ریشه	کادمیم اندام هوایی	کادمیم ریشه
میکوریز	۱	۰/۶۷**	۲۷/۴۷**	۳/۱۰**	۲۸/۱۸**
نفت سفید	۳	۴/۵۴**	۴۳ /۱۸**	۱۴/۵۸**	۱۶۰/۰۷**
میکوریز × نفت سفید	۳	۰/۱۵*	۳/۲۸**	۰/۱۱**	۳/۹۸**
خطا	۲۴	۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲
ضریب تغییرات (٪)		۴/۲۱۶	۴/۵۷۴	۶/۰۸	۲/۵۹

* و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و تفاوت در سطح ۵ و ۱ درصد است

جدول ۵. مقایسه میانگین غلظت سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی ($mg\ kg^{-1}$) در تیمارهای مورد مطالعه

سطوح مختلف نفت سفید $ml\ kg^{-1}$	غلظت سرب ریشه		غلظت سرب اندام هوایی	
	با میکوریز	بدون میکوریز	با میکوریز	بدون میکوریز
۰	۰/۷۶ g	۰/۶۴ g	۰/۲۸ f	۰/۳۶ f
۴	۳/۸۲ d	۱/۹۳ f	۱/۳۲ e	۱/۵۱ d
۸	۵/۲۵ b	۳/۰۵ e	۱/۶۱ c	۱/۷۹ b
۱۲	۷/۸۵ a	۴/۶۵ c	۱/۷۲ b	۲/۴۳ a
	غلظت کادمیوم ریشه		غلظت کادمیوم اندام هوایی	
	با میکوریز	بدون میکوریز	با میکوریز	بدون میکوریز
۰	۱/۴۷ g	۰/۷۴ h	۰/۱۲ g	۰/۴۳ f
۴	۶/۱ e	۴/۱۷ f	۰/۸۵ e	۱/۴۳ d
۸	۸/۵۲ c	۷/۵۲ d	۱/۵۴ d	۲/۳۹ c
۱۲	۱۳/۶ a	۹/۷۵ b	۳/۰۷ b	۳/۸۲ a

میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در هر ویژگی اختلاف معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) ندارند.

فاکتور انتقال گیاهی

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، در تمام غلظت‌های نفت سفید در خاک مقدار فاکتور انتقال گیاهی سرب و کادمیوم در تیمارهای میکوریز به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) کمتر از تیمارهای بدون میکوریز بود (جدول ۶). فاکتور انتقال کمتر از یک نشان می‌دهد که قارچ‌های میکوریزا سرب و کادمیوم را در ریشه غیر متحرک و از انتقال آن‌ها به اندام هوایی جلوگیری می‌کنند.

فاکتور تغلیظ زیستی

بررسی مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، مقدار فاکتور تغلیظ زیستی در ریشه به‌طور میانگین ۷/۷۴ درصد نسبت به اندام هوایی بیشتر بود. فاکتور تغلیظ زیستی سرب و کادمیوم در اندام هوایی گیاه جعفری هم‌زیست با میکوریز به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) کمتر از تیمارهای بدون میکوریز بود (جدول ۶).

بر اساس این نتایج مایه‌زنی میکوریز سبب تغلیظ سرب و کادمیوم در ریشه شده و از انتقال آن‌ها به اندام هوایی جلوگیری کرده است. نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد که میکوریز مانند فیلتر با رسوب دادن سرب در ریشه، از انتقال آن به اندام هوایی جلوگیری می‌کند (۱۴).

شاخص پرولین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای میکوریز، نفت سفید و برهمکنش آن‌ها بر مقدار پرولین در برگ تازه گیاه جعفری معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود (جدول ۳). با افزایش غلظت نفت سفید در خاک مقدار پرولین در غلظت‌های ۴ و ۸ میلی‌لیتر در کیلوگرم خاک در مقایسه با تیمار شاهد (خاک غیرآلوده) به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) افزایش یافت؛ درحالی‌که در غلظت ۱۲ میلی‌لیتر در کیلوگرم خاک این مقدار کاهش معنی‌داری یافت که ممکن است به‌دلیل کاهش عملکرد گیاه باشد (۱۹).

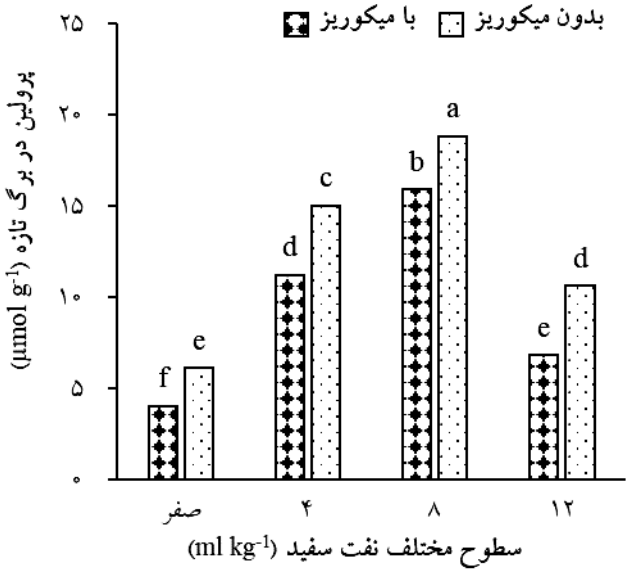
جدول ۶. فاکتور انتقال و تغلیظ زیستی عناصر سنگین سرب و کادمیوم در تیمارهای مورد مطالعه

سطوح مختلف نفت سفید ml kg $^{-1}$	فاکتور انتقال گیاهی (TF)			
	سرب		کادمیوم	
	با میکوریز	بدون میکوریز	با میکوریز	بدون میکوریز
۰	۰/۳۶ ^{d}	۰/۵۶ ^{b}	۰/۰۸ ^{h}	۰/۵۸ ^{a}
۴	۰/۳۴ ^{de}	۰/۷۸ ^{a}	۰/۱۳ ^{g}	۰/۳۴ ^{c}
۸	۰/۳۰ ^{e}	۰/۵۸ ^{b}	۰/۱۸ ^{f}	۰/۳۱ ^{d}
۱۲	۰/۲۲ ^{f}	۰/۵۲ ^{c}	۰/۲۲ ^{e}	۰/۳۹ ^{b}
سطوح مختلف نفت سفید ml kg $^{-1}$	فاکتور تغلیظ زیستی (BCF)			
	سرب ریشه		سرب اندام هوایی	
	با میکوریز	بدون میکوریز	با میکوریز	بدون میکوریز
۰	۰/۰۶ ^{d}	۰/۰۵ ^{d}	۰/۰۳ ^{d}	۰/۰۳ ^{d}
۴	۰/۳۰ ^{b}	۰/۱۵ ^{c}	۰/۱۰ ^{c}	۰/۱۲ ^{b}
۸	۰/۴۱ ^{b}	۰/۲۴ ^{b}	۰/۱۳ ^{b}	۰/۱۴ ^{b}
۱۲	۰/۶۲ ^{a}	۰/۳۷ ^{b}	۰/۱۴ ^{b}	۰/۲۰ ^{a}
سطوح مختلف نفت سفید ml kg $^{-1}$	فاکتور تغلیظ زیستی (BCF)			
	کادمیوم ریشه		کادمیوم اندام هوایی	
	با میکوریز	بدون میکوریز	با میکوریز	بدون میکوریز
۰	۰/۰۹ ^{d}	۰/۰۴ ^{d}	۰/۰۱ ^{d}	۰/۰۳ ^{d}
۴	۰/۳۵ ^{c}	۰/۲۴ ^{c}	۰/۰۵ ^{d}	۰/۰۹ ^{c}
۸	۰/۴۹ ^{b}	۰/۴۳ ^{b}	۰/۰۹ ^{c}	۰/۱۳ ^{b}
۱۲	۰/۷۸ ^{a}	۰/۵۶ ^{a}	۰/۱۸ ^{a}	۰/۲۲ ^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ویژگی بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) ندارند.

همچنین مقدار پرولین در تیمارهای با مایه‌زنی میکوریز نسبت به تیمار غیرمیکوریز به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) کمتر بود (شکل ۳). علت افزایش مقدار پرولین با افزایش غلظت نفت سفید می‌تواند یک راهکار محافظتی برای افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش نفتی و تنش اکسیداتیو ناشی از سمیت آن باشد (۴). دیگر پژوهشگران نیز افزایش محتوی پرولین در گیاهان را در شرایط تنش فلزهای سنگین گزارش کرده‌اند (۱۸).

در پژوهش بررسی اثر نفت سفید بر سه نوع سبزی هویج، جعفری و گشنیز دیده شد که نفت سفید باعث بروز سمیت، افزایش مقدار پرولین و کاهش عملکرد و کیفیت در هر سه گیاه شد (۱۹). در این پژوهش میکوریز با کاهش غلظت عناصر سنگین سرب و کادمیوم در اندام هوایی و انباشت این عناصر در ریشه می‌تواند سبب کاهش سمیت و در نتیجه کاهش مقدار پرولین در گیاه در تیمار با مایه‌زنی میکوریز نسبت به تیمار غیرمیکوریز شده باشد جدول (۵). همچنین ممکن است افزایش زیست‌توده گیاه در تیمار میکوریز سبب کاهش نسبت



شکل ۳. مقایسه میانگین میزان پرولین اندام هوایی در تیمارهای مختلف

میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) ندارند.

غلظت پرولین به وزن خشک گیاه (اثر رقت) سبب این روند کاهشی مقدار پرولین در تیمارهای میکوریز نسبت به تیمار غیرمیکوریز شده باشد (شکل ۱). برخلاف نتایج این پژوهش گزارش شده است که مایه‌زنی میکوریز (*Funneliformis mosseae*) سبب افزایش مقدار پرولین در گیاه (*Cajanus cajan*) در یک خاک آلوده به کادمیوم و سرب شد (۸). این تفاوت در نتایج می‌تواند به‌دلیل نوع گونه میکوریز، سطح آلودگی خاک و جذب عناصر سنگین توسط گیاه باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که با افزایش آلودگی نفت سفید در خاک، رشد گیاه، غلظت فسفر، مس و روی در اندام هوایی گیاه کاهش می‌یابد، اما مایه‌زنی میکوریز سبب بهبود رشد گیاه و افزایش غلظت این عناصر در گیاه می‌شود. مایه‌زنی میکوریز می‌تواند با تغلیظ زیستی عناصر سنگین سرب و کادمیوم در ریشه و کاهش انتقال آن‌ها از ریشه به اندام هوایی گیاه جعفری، از ورود این عناصر به اندام هوایی جعفری که مصرف تغذیه‌ای برای انسان دارد، جلوگیری کند. با توجه به نتایج این پژوهش میکوریز با بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و کاهش غلظت عناصر سنگین در گیاه، در کاهش آسیب‌های ناشی از آلودگی نفت سفید و عناصر سنگین مفید بوده است و و ازآنجایی‌که سبزی‌ها نقش مهمی در سبد تغذیه انسان دارند، کاهش غلظت این عناصر سنگین در گیاه جعفری از اهمیت زیادی برخوردار است.

منابع مورد استفاده

1. Abdelhameed, RE. and RA. Metwally. 2019. Alleviation of cadmium stress by arbuscular mycorrhizal symbiosis. *International Journal of Phytoremediation* 21(7):663-71.
2. Aboribo, RI. 2001. Oil politics and the niger delta development commission: The Tussle for Control and Domination.. *African Journal Environmental Study* 2:168-75.
3. Al-Arjani, AB., A. Hashem and E.F. Abd_Allah. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in Ephedra foliata Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 27(1):380-94.

4. Barbosa, B., S. Boléo, S. Sidella, J. Costa, M.P. Duarte, B. Mendes, S.L. Cosentino and A.L. Fernando. 2015. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils using the perennial energy crops Miscanthus spp. and Arundo donax L. *BioEnergy Research* 8:1500-11.
5. Bates, L.S., R.A. Waldren and ID. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39:205-7.
6. Cenkci, S., İ.H. Ciğerci, M. Yıldız, C. Özay, A. Bozdağ and H. Terzi. 2010. Lead contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in Brassica rapa L. *Environmental and Experimental Botany* 67(3):467-73.
7. Debeljak, M., JT. van.Elteren, A. Špruk, A. Izmer, F. Vanhaecke and K. Vogel-Mikuš. 2018. The role of arbuscular mycorrhiza in mercury and mineral nutrient uptake in maize. *Chemosphere* 212:1076-84.
8. Garg, N. and N. Aggarwal. 2012. Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of Cajanus cajan (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. *Plant Growth Regulation* 66:9-26.
9. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size Analysis. PP. 383-411. In: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis Part 1. Soil Science Society of America Book Series. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. America.
10. Gujre, N., A. Soni, L. Rangan, D.C. Tsang and S. Mitra. 2021. Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Environmental Pollution* 1(268):115549.
11. Huang, X., L. Wang, S. Zhu, SH. Ho, J. Wu, PK. Kalita and F. Ma. 2018. Unraveling the effects of arbuscular mycorrhizal fungus on uptake, translocation, and distribution of cadmium in Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 1;149:43-50.
12. Jaiswal PC. 2004. Chemistry analysis. PP. 365-366. Soil. Plant and Water Analysis. Kalyani Publishers, New Delhi.
13. Jiang, Q.Y., F. Zhuo, S.H. Long, H.D. Zhao, D.J. Yang, Z.H. Ye, S.S. Li and Y.X. Jing. 2016. Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of Lonicera japonica grown in Cd-added soils? Scientific Reports 6(1):21805.
14. Karimi, A., H. Khodaverdiloo and M.H. Rasouli Sadaghiani. 2017. Plant tolerance, accumulation and remediation of Pb by three rangeland plant species in a calcareous soil in west Azerbaijan province. Journal of Natural Environment 70(4):907-22.
15. Karimi, A., H. Khodaverdiloo and M.H. Rasouli-Sadaghiani. 2017. Influence of microbial inoculation on growth, Fe and Zn uptake and biochemical response of Hyoscyamus niger L. in lead (Pb) stress. Journal of Water and Soil. 31(5): 1340-1354 (in Farsi).
16. Karimi, A., H. Khodaverdiloo and M.H. Rasouli-Sadaghiani. 2018. Microbial-enhanced phytoremediation of lead contaminated calcareous soil by Centaurea cyanus L. Clean–Soil, Air, Water 46(2):1700665.
17. Khodaverdiloo, H., FX. Han, R. Hamzenejad Taghlidabad, A. Karimi, N. Moradi and J.A. Kazery. 2020. Potentially toxic element contamination of arid and semi-arid soils and its phytoremediation. Arid Land Research and Management 34(4):361-91.
18. Khodaverdiloo, H., M.H. Rasouli-Sadaghiani and A. Karimi. 2013. Influence of microbial inoculation of a Pb-contaminated soil on growth, some physiological properties, and uptake and translocation of Pb, Fe, and Zn by Centaurea (Centaurea cyanus). Iranian Journal of Soil Management and Sustainable Production 3(2):75-93 (in Farsi).
19. Khodavisi, V., B. Khalili Moghadam, H. Nadian and M. Soleimani. 2019. Effect of Kerosene Application as Herbicide on Heavy Metal Uptake, Growth and Physiological Indices of Parsley, Coriander and Carrot. Iranian Journal of Soil and Water Research 50(2):389-99 (in Farsi).
20. Kobae, Y. 2019. Dynamic phosphate uptake in arbuscular mycorrhizal roots under field conditions. Frontiers in Environmental Science 9(6):159.
21. Kumar. A. and M.N. Prasad. 2015. Lead-induced toxicity and interference in chlorophyll fluorescence in Talinum triangulare grown hydroponically. Photosynthetica 53(1):66-71.
22. Li, H., X. Li, L. Xiang, H.M. Zhao, Y.W. Li, Q.Y. Cai, L. Zhu, C.H. Mo and M.H. Wong. 2018. Phytoremediation of soil co-contaminated with Cd and BDE-209 using hyperaccumulator enhanced by AM fungi and surfactant. Science of the Total Environment 1;613:447-55.
23. Ma, L.Q., K.M. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai and E.D. Kennelley. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature 409(6820):579.
24. Mokarram-Kashtiban, S., S.M. Hosseini, M. Tabari Kouchaksaraei and H. Younesi. 2019. The impact of nanoparticles zero-valent iron (nZVI) and rhizosphere microorganisms on the phytoremediation ability of white willow and its response. Environmental Science and Pollution Research 1(26):10776-89.
25. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods 1(5):961-1010.

26. Olsen, S. R., L. E. Sommers. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus, ASA Monograph. 1(9):403-430.
27. Paz-Ferreiro, J., H. Lu, S. Fu, A. Méndez and G. Gascó. 2013. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. Solid Earth Discussions 5(2): 2155–2179.
28. Riaz, M., M. Kamran, Y. Fang, Q. Wang, H. Cao, G. Yang, L. Deng, Y. Wang, Y. Zhou, I. Anastopoulos and X. Wang. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. Journal of Hazardous Materials 15(402):123919.
29. Sorkheh, Z. and B. Khalili Moghaddam. 2018. The Effects of Kerosene Usage on Heavy Metals Uptake by some Vegetables in Khuzestan Province. JWSS-Isfahan University of Technology 22(1):405-17.
30. Thomas, G.W. Soil pH and soil acidity.1996. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods 1(5):475-90.
31. Wipf, D., F. Krajinski, D. van Tuinen, G. Recorbet and P.E. Courty. 2019. Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. New Phytologist 223(3):1127-42.
32. Wu, S., X. Zhang, L. Huang and B. Chen. 2019. Arbuscular mycorrhiza and plant chromium tolerance. Soil Ecology *Letters* 1:94-104.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 28, No. 2, Summer 2024, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effect of Mycorrhizal Inoculation on the Uptake of Some Heavy Metals by Parsley (Petroselinum sativum) in Contaminated Soil Treated with Kerosene

N. A. Zakavi[1*], H. A. Nadian[1], B. Khalilimoghadam[1], A. A. Moezzi[2]

(Received: April 26-2023 ; Accepted: January 29-2024)

Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi are highly important in improving plant growth and decreasing the negative effects of contaminants. The objective of this study was to evaluate the effect of inoculation of mycorrhizal fungus on the concentration of lead (Pb) and cadmium (Cd) by parsley (*Petroselinum sativum*) in heavy metal-contaminated soil in the presence of kerosene. This study was carried out as a factorial experiment based on the randomized complete design with four replications under greenhouse conditions. Experimental factors were included: 1- microbial inoculation in two levels with mycorrhizal fungus (*Rhizophagus irregularis*) and control (without inoculation), and 2- kerosene in four levels of 0, 4, 8, and 12 mL kg^{-1} soil. The results showed that mycorrhizal inoculation led to a significant increase in root (61.1 to 150.1%) and shoot dry weight (9.1 to 51.5%), shoot P, Zn, and Cu concentration and root Pb (18.7 to 97.9%) and Cd (13.3 to 98.6%) concentration, while significantly decreased shoot Pb (10.0 to 29.2%) and Cd (19.6 to 72.1%) concentration. The root bio-concentration factor (BCF) (7.74%) was higher than compared to shoot BCF. The mycorrhizal inoculation decreased the translocation factor (TF) of Pb and Cd. The TF<1 shows that the mycorrhizal fungus immobilized Pb and Cd in the roots and prevented their translocation from the root to the shoot. Hence, mycorrhizal inoculation can be effective in contaminated soils through bioconcentration of Pb and Cd in the root and decrease their translocation to the parsley shoot.

Keywords: Soil contamination, Heavy metals, Mycorrhiza

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran.
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
*: Corresponding author, Email: zakavi1988@yahoo.com