نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۵، ص. ۱۵۱۴-۱۵۰۲

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 5, Nov.-Dec. 2016, p. 1502-1514

اثر قارچ‌های مایکوریزا- آربسکولار و فسفر بر جذب آرسنیک از خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات به‌وسیله گیاه آفتابگردان

سعید باقریفام[1*]- امیر لکزیان[2]- امیر فتوت[3]- رضا خراسانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۳۰

چکیده

در سال‌های اخیر آلودگی خاک‌ها و آب به آرسنیک به دلیل کاربردهای صنعتی و فعالیت‌های معدن‌کاری منجر به نگرانی‌های جدی زیست محیطی شده است. روش‌های مختلفی برای مدیریت زیست محیطی و پالایش خاک‌های آلوده پیشنهاد شده که در بین این روش‌ها گیاه پالایی به عنوان گزینه‌ای موثر و سازگار با محیط زیست مطرح شده است. به منظور پی بردن به اثرات همزیستی مایکوریزایی و غلظت فسفر بر جذب آرسنیت و آرسنات بوسیله گیاه آفتابگردان، مطالعه‌ای گلخانه‌ای به صورت کاملا تصادفی در قالب فاکتوریل با سه سطح مایکوریزا (شاهد، *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae*)، دو سطح فسفر (۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دو گونه معدنی آرسنیک (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیت یا آرسنات) انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد همزیستی مایکوریزایی غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه را کاهش و افزایش سطح فسفر خاک غلظت آرسنیک را در بخش هوایی گیاه آفتابگردان افزایش می‌دهد. بنابراین همزیستی مایکوریزایی بوسیله گیاه آفتابگردان بازدهی تثبیت گیاهی و افزایش غلظت فسفر در خاک بازدهی جذب گیاهی آرسنیک را در خاک‌های آلوده به آرسنیک افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آرسنیت، آرسنات، تثبیت گیاهی، گیاه پالایی، مایکوریزا

مقدمه

آرسنیک شبه فلزی سمی و سرطانزا است که به طور طبیعی در پوسته زمین یافت می‌شود. این عنصر به طور گسترده در صنایع تولید حشره کش‌ها و علف کش‌ها، مواد محافظ چوب، شیشه‌سازی و تولید مواد انفجاری مورد استفاده قرار گرفته است (۲ و ۱۴). افزایش غلظت آرسنیک به دلیل فعالیت‌های انسانی خطراتی را برای محیط زیست به دنبال دارد. با در نظر گرفتن سمیت بالقوه این عنصر برای سلامتی بشر، سازمان بهداشت جهانی حد استاندارد این عنصر در آب آشامیدنی را معادل ۲۰ میکروگرم بر لیتر قرار داده است (۱۸). فرم‌های غالب آرسنیک در محیط زیست As(III) و As(V) هستند که به ترتیب آرسنیت و آرسنات نامیده می‌شوند. در منابع از آرسنیت به عنوان گونه سمی‌تر و با زیست فراهمی بالاتر از آرسنات یاد می‌شود (۱۹). با توجه به خطرات زیست محیطی و سمیت این عنصر اتخاذ روش‌های زیست محیطی برای مدیریت خاک و آب آلوده به آرسنیک ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های مختلفی برای مدیریت و پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده به آرسنیک بوسیله محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها شامل روش‌های فیزیکی و برداشت خاک آلوده، تثبیت شیمیایی و استفاده از جاذب‌های مختلف برای تثبیت عنصر آلاینده از خاک و یا حذف عنصرآلاینده از آب، در آمیختن خاک آلوده با آسفالت و زیست پالایی (bioremediation) با استفاده از میکروارگانیزم‌های مختلف برای پالایش خاک و آب آلوده می‌باشند (۱۵). این روش‌ها معمولا گران بوده و نیاز به تجهیزات و ادوات خاصی دارند. در این میان روش‌های گیاه پالایی (phytoremediation) به دلیل ارزان بودن و عدم تخریب محیط زیست، مورد توجه محققین قرار گرفته است (۴، ۱، ۱۷، ۱۰ و ۸). بنابراین شناخت فاکتورهای موثر در استفاده موثر از این تکنیک شامل نقش عوامل گیاهی، سطح حاصلخیزی و مقدار عناصر غذایی خاک و نقش میکروارگانیزم‌های مختلف در جذب آرسنیک بوسیله گیاه اهمیت می‌یابد. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص همزیستی مایکوریزایی با گیاهان مختلف برای افزایش جذب مواد مفید و همین طور فلزات سمی بوسیله محققین مختلف صورت پذیرفته است. فلزات سنگین و شبه فلزات ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مختلفی داشته و بنابراین رفتار

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانش آموخته دکتری، استادان و دانشیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: saeed_bagherifam@yahoo.com)

آنها در محیط خاک متفاوت است. از طرفی نوع قارچ همزیست شده و نوع گیاه میزبان به لحاظ فیزیولوژی گیاهی، سیستم ریشه‌ای و در نهایت پاسخ گیاه به این همزیستی متفاوت است. بنابراین نتیجه حاصل شده از این همزیستی می‌تواند متفاوت باشد. چنانچه در بسیاری موارد پاسخ گیاه به این همزیستی باعث افزایش جذب ماده سمی در بخش هوایی و در نهایت افزایش بازدهی گیاه‌پالایی و ریشه‌پالایی (phytoextarction) و گاهی باعث افزایش جذب در ریشه و کاهش انتقال آلاینده از ریشه به بخش هوایی می‌شود که در این موارد بازدهی تثبیت گیاهی یا (phytostabilization) افزایش می‌یابد. در مورد عناصر مختلف نتایج متفاوت بوده به عنوان مثال در مورد عناصر سرب و کادمیوم این همزیستی باعث افزایش جذب در بخش هوایی و ریشه گیاه می‌شود (۱). در مورد اثرات همزیستی مایکوریزایی با گیاهان مختلف بر جذب آرسنیک نتایج متضادی گزارش شده است. الترا و همکاران (۱۷) با بررسی اثر همزیستی *Glomus aggregatum* با گیاه آفتابگردان گزارش کردند مایکوریزایی شدن غلظت آرسنیک را در بخش هوایی گیاه کاهش داده و با افزایش مقاومت گیاه در برابر سمیت آرسنیک بیومس و غلظت فسفر را در گیاه افزایش می‌دهد. چن و همکاران (۴) گزارش کردند همزیستی یونجه با قارچ *Glomus mosseae* غلظت آرسنیک را در بخش هوایی و ریشه گیاه یونجه کاهش و غلظت فسفر را افزایش می‌دهد. دانگ و همکاران (۸) گزارش کردند مایکوریزایی شدن شبدر باعث کاهش شدید غلظت آرسنیک در بخش هوایی این گیاهان می‌شود. در حالیکه کوزولینو و همکاران (۷) گزارش کردند تلقیح شدن کلم با انواع مایکوریزای تجاری باعث افزایش غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه گیاه می‌شود. فسفر نیز نقش بسیار مهمی در همزیستی مایکوریزایی ایفا می‌کند و همچنین به عنوان یک عنصر همگروه با آرسنیک می‌تواند در جذب این عنصر توسط گیاهان موثر باشد. تاکنون مطالعه‌ای درمورد اثر همزیستی مایکوریزایی و فسفر بر جذب آرسنیت و آرسنات به عنوان گونه‌های معدنی آرسنیک در خاک بوسیله گیاه آفتابگردان صورت نپذیرفته است. همینطور در ارتباط با اثر نوع مایکوریزای همزیست شده در افزایش یا کاهش جذب در بخش هوایی یا ریشه گیاه پژوهشی انجام نپذیرفته است. بنابراین مطالعه اخیر برای اولین بار و با هدف پی بردن به اثر همزیستی دو نوع قارچ *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* با گیاه آفتابگردان و اثر غلظت فسفر خاک بر جذب آرسنیت و آرسنات از خاک صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این آزمایش (Typic haplo orthed) از محل پردیس دانشگاه فردوسی مشهد جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. به منظور حذف اسپورهای مایکوریزای موجود، خاک مورد استفاده در دو نوبت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. بذر آفتابگردان (رقم‌های سان) از مرکز تحقیقات کشاورزی گرگان بخش دانه‌های روغنی تهیه شد. این آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر تیمار در قالب فاکتوریل با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آرسنیک به دو شکل آرسنیت و آرسنات، دو سطح فسفر (۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و سه سطح مایکوریزا (شاهد، *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae*) انجام شد. به منظور آلوده کردن نمونه خاک با آرسنیت و آرسنات (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فسفر مقادیر مناسب از نمک‌های $NaAsO_2$, $Na_2HAsO_4.7H_2O$ و $Ca(H_2PO_4)_2$ محاسبه و در آب مقطر لازم حل شد، و سپس به نمونه‌های خاک اضافه گردید. هر یک از گلدان‌ها به کمک ۱۰۰ گرم اینوکولوم قارچی حاوی ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ اسپور مخلوط با خاک با یکی از قارچ‌های *Glomus intraradices* یا *Glomus mosseae* که از شرکت زیست فناور توران تهیه شده بود، تیمار شد. سطوح شاهد هر کدام با مقدار ۱۰۰ گرم خاک استریل شده تیمار شدند. پس از اضافه کردن هر یک از غلظت های فوق و تیمارهای قارچی مقدار رطوبت نمونه‌های خاک به روش وزنی در ۷۰درصد ظرفیت زراعی تنظیم شد. گلدان‌های پلاستیکی با مقدار ۳ کیلوگرم از نمونه‌های خاک آلوده پر شد و سپس به مدت ۴ هفته درشرایط گلخانه‌ای انکوباتورگذاری شدند. سپس در هر گلدان تعداد ۵ عدد از بذور ضدعفونی شده قرار داده شد. گلدان‌ها روزانه وزن شده و رطوبت آن‌ها در طول آزمایش در ۷۰٪ ظرفیت زراعی به طور ثابت نگهداری شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها تعداد آن‌ها در هر گلدان به ۲ عدد تقلیل یافت. گیاهان پس از ۶۰ روز از سطح خاک برداشت شدند. ریشه‌ها و ساقه‌های جداشده بطور کامل به وسیله آب مقطر شستشو داده شد. ساقه و ریشه گیاهان فوق برای تعیین وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته شدند. نمونه ها پس از تعیین وزن خشک آسیاب و الک شده و ۰/۵ گرم از مواد گیاهی ریشه و ساقه بوسیله مخلوط حاوی ۸۰ درصد اسید نیتریک غلیظ و۲۰ درصد اسید پرکلریک غلیظ هضم شد. سپس نمونه‌ها به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شده و مقدار آرسنیک در نمونه‌ها به وسیله دستگاه جذب اتمی تولید کننده هیدرید (HG-AAS) اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در نمونه‌ها بوسیله روش واندومولیبدات و دستگاه اسپکتروفتومتر محاسبه شد (۹). به منظور بررسی پاسخ گیاه به همزیستی مایکوریزایی بخشی از ریشه تازه با استفاده از تریپن بلو رنگ آمیزی و با تهیه اسلاید از ریشه رنگ آمیزی شده به طور کیفی مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفت (۱۳). نتایج حاصل از این آزمایش بوسیله نرم افزار GenStat ۱۲ مورد آنالیز و جدول و گراف‌ها توسط نرم افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایشات خاک نشان داد که بافت خاک مورد مطالعه لومی و مقادیر پتاسیم و فسفر به ترتیب ۲۷۰ و ۹ میلی گرم بر کیلوگرم و نیتروژن ۰/۰۵۴ درصد خاک را تشکیل می‌دهد (جدول ۱). مقدار ماده آلی در خاک مورد مطالعه ۰/۵ درصد بود. نتایج حاصل از مطلعات میکروسکوپی و رنگ آمیزی ریشه نشان داد در گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا اندام‌های قارچی تشکیل شده‌اند که حاکی از موفق بودن پاسخ گیاه به همزیستی می‌باشد، در حالیکه در تیمارهای شاهد هیچ اندام مایکوریزایی مشاهده نشد.

اثرات مایکوریزا و فسفر بر زیست توده گیاه آفتابگردان

نتایج حاصل از مقایسه میانگین تیمارهای مختلف نشان داد همزیستی مایکوریزایی با هر دو تیمار *Glomus intraradices* (GI) و *Glomus mosseae* (GM) زیست توده تولیدی گیاه آفتابگردان را افزایش داد چنانچه که میانگین زیست توده تولیدی از ۱/۲۴ گرم در هر گلدان در تیمار شاهد تا ۱/۶۶ و ۱/۵۴ گرم در هر گلدان در تیمار های GI و GM افزایش یافت (جدول ۲). این تغییرات در هر دو تیمار GI و GM نسبت به سطح شاهد به لحاظ آماری در سطح ($P<0.05$) معنی‌دار بودند در حالی که بین خود تیمارها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اثرات متقابل آرسنیت و آرسنات و همزیستی با تیمارهای GI و GM در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه میانگین تیمارها در سطح شاهد نشان داد بین زیست توده تولیدی گیاه آفتابگردان در خاک آلوده شده با آرسنیت یا آرسنات اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) وجود ندارد. میانگین زیست توده تولیدی در خاک‌های تلقیح شده با تیمار GI و آلوده شده با آرسنیت و آرسنات به ترتیب ۱/۶۶ و ۱/۶۵ گرم در هر گلدان بود که نسبت به میانگین زیست توده تولیدی در سطح شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داد در حالی‌که میانگین زیست توده تولیدی در تیمار GM در خاک‌های آلوده با آرسنیت و آرسنات تفاوت معنی‌داری ($P<0.05$) را با سطح شاهد و تیمار GI نشان نداد (جدول ۳). اثرات متقابل سطوح مختلف فسفر و آرسنیت و آرسنات در جدول ۴ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد میانگین زیست توده تولیدی با افزایش مقدار فسفر از سطح کنترل (P1) تا سطح ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر (P2) در خاکهای آلوده شده با آرسنیت و آرسنات افزایش یافت که این افزایش به لحاظ آماری در سطح ($P<0.05$) معنی‌دار بود. اثرات متقابل سطوح مختلف فسفر، و گونه‌های مختلف معدنی آرسنیک در خاک در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود افزایش مقدار فسفر خاک و تلقیح مایکوریزایی با تیمارهای GI و GM مقدار زیست توده تولیدی گیاه آفتابگردان را افزایش می‌دهد. بالاترین مقادیر زیست توده تولیدی در تیمار GI و سطح ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر مشاهده شد که زیست توده تولیدی در خاک آلوده با آرسنیت و آرسنات به ترتیب ۱/۷۲ و ۱/۷۳ (گرم در هر گلدان) بود که نسبت به تیمار شاهد در سطح آماری ($P<0.05$) معنی‌دار بود. اختلافات مشاهده شده در زیست توده تولیدی بین تیمارهای تلقیح شده با GI یا GM به لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱). الترا و همکاران (۱۷) در مطالعه اثر همزیستی *Glomus aggregatum* و گیاه آفتابگردان گزارش کردند مایکوریزایی شدن گیاه آفتابگردان وزن خشک اندام هوایی را افزایش می‌دهد. در مطالعه الترا و همکاران با افزایش فسفر در خاک و تلقیح مایکوریزایی وزن خشک اندام هوایی از ۱/۶۸ گرم در سطح شاهد به ۴/۱۰ گرم در هر گلدان افزایش یافت که به لحاظ آماری در سطح ($P<0.05$)معنی‌دار بود.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Soil physical and chemical properties

پارامتر	واحد اندازه گیری	مقدار
Soil texture بافت	-	لوم
(pH) اسیدیته	-	8.1
(EC) هدایت الکتریکی	($dS\ m^{-1}$)	2
(OM) ماده آلی	(%)	0.5
Total N نیتروژن کل	(%)	0.054
Available P فسفر قابل استفاده	($mg\ kg^{-1}$)	9
Available K پتاسیم قابل استفاده	($mg\ kg^{-1}$)	270
CEC	(meq/100 g soil)	14.8
ESP	-	1.91

جدول ۲- جدول مقایسه میانگین اثر مایکوریزا بر پارامترهای آزمایشی

Table 2-The effects of mycorrhizae fungi on compare mean test of experimental factors

اثرات متقابل	آرسنیک در ریشه As in root (mg Kg^{-1})	آرسنیک در بخش هوایی As in shoot (mg Kg^{-1})	فسفر در ریشه P in root (mg g^{-1})	فسفر در بخش هوایی P in shoot (mg g^{-1})	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight (g pot^{-1})
Control	298.5 a	14.41 a	0.91 b	1.435 b	1.245 b
GI	276.8 b	11.58 b	1.271 a	1.653 a	1.66 a
GM	281.2 b	12.41 b	1.238 a	1.638 a	1.547 a

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI وGM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)

جدول ۳- جدول مقایسه میانگین اثرات متقابل مایکوریزا و خاک‌های آلوده به آرسنیت یا آرسنات بر پارامترهای آزمایشی

Table3-The effects of interaction of mycorrhizae fungi and arsenite and arsenate contaminated soils on compare mean test of experimental factors

اثرات متقابل	آرسنیک در ریشه As in root (mg Kg^{-1})	آرسنیک در بخش هوایی As in shoot (mg Kg^{-1})	فسفر در ریشه P in root (mg g^{-1})	فسفر در بخش هوایی P in shoot (mg g^{-1})	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight (g pot^{-1})
As(III)* C	299 a	14.83 a	1.435 b	0.91 b	1.255 b
As(V) * C	298 a	14 ab	1.435 b	0.91 b	1.235 b
As(V) * GI	279.5 b	12 bc	1.635 a	1.262 a	1.665 a
As(III)* GI	274 b	11.17 c	1.67 a	1.28 a	1.655 a
As(V) * GM	281 b	12.33 bc	1.65 a	1.225 a	1.55 a
As(III)* GM	281.5 b	12.50 bc	1.625 a	1.25 a	1.545 a

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI وGM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)

جدول ٤- جدول مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح مختلف فسفر و خاکهای آلوده به آرسنیت یا آرسنات بر پارامترهای آزمایشی

Table 4-The effects of interaction of P levels in soils and arsenite or arsenate contaminated soils on compare mean test of experimental factors

اثرات متقابل	آرسنیک در ریشه As in root (mg Kg^{-1})	آرسنیک در بخش هوایی As in shoot (mg Kg^{-1})	فسفر در ریشه P in root (mg g^{-1})	فسفر در بخش هوایی P in shoot (mg g^{-1})	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight (g pot^{-1})
As(III)* P_1	268.7 b	9.89b	1.07 b	1.443 b	1.427 b
As(III)* P_2	301 a	15.78 a	1.223 a	1.71 a	1.553 a
As(V) * P_1	269.7 b	8.89 b	1.04 b	1.473 b	1.453 b
As(V) * P_2	302.7 a	15.67 a	1.224 a	1.673 a	1.537 a

سطح ۰ و ۶۰ میلیگرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_2وP_1

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils)

چن و همکاران (۴) گزارش کردند مایکوریزایی شدن یونجه با Glomus mosseae باعث افزایش مقاومت گیاه به سمیت آرسنیک شده و وزن خشک گیاه را تا ۶ برابر افزایش می‌دهد. نتایج مطالعه اخیر با این نتایج همخوانی دارد. تفاوت‌های مشاهده شده در این مطالعه و مطالعات سایر محققین می‌تواند به عواملی همچون تفاوت نوع گیاهان و قارچ مایکوزریزایی همزیست شده، ویژگی‌های شیمیایی خاک مطالعه و استفاده از خاک مصنوعا آلوده شده به آرسنیک در مطالعه اخیر مربوط باشد.

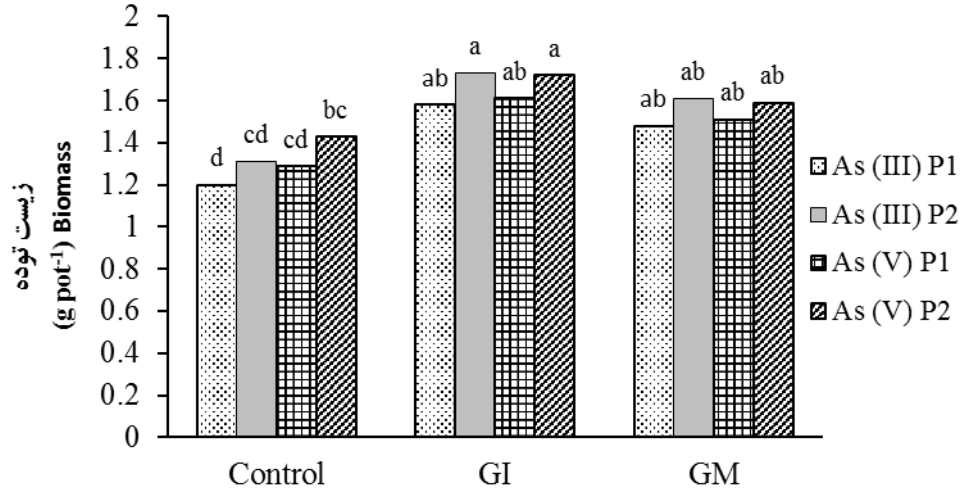
اثرات مایکوریزا و فسفر برغلظت فسفر در بخش هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان

میانگین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان با تلقیح مایکوریزایی با تیمارهای GI و GM به طور معنی‌داری افزایش یافت. چنانچه غلظت فسفر از ۱/۴۳ میلی‌گرم بر گرم در سطح شاهد (تلقیح

نشده) تا ۱/۶۵ در تیمار GIو ۱/۶۳ در تیمار GMافزایش یافت که اختلاف مشاهده شده بین تیمارهای GI و GM معنی‌دار نبود در حالیکه اختلاف هر دو تیمار با سطح شاهد در سطح آماری (P<0.05) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج حاصل از مطالعه اثرات متقابل بین تیمارهای GI و GM و گونه‌های آرسنیت و آرسنات نشان داد تلقیح مایکوریزایی غلظت فسفر را در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در خاک‌های آلوده شده با آرسنیت و آرسنات افزایش می‌دهد. میانگین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در سطح شاهد (تلقیح نشده) اختلاف معنی‌داری را بین خاک‌های آلوده شده با آرسنیت یا آرسنات نشان نداد. همچنین بین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در تیمارهای GI و GM و خاک‌های آلوده شده با آرسنیت یا آرسنات اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد در حالیکه افزایش مشاهده شده در غلظت فسفر در تیمارهای GI و GM نسبت به سطح شاهد به طور معنی‌داری (P<0.05) افزایش یافت (جدول ۳). نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش مقدار فسفر در خاک غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در هر دو نوع خاک آلوده با آرسنیت و آرسنات افزایش می‌یابد. میانگین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در سطح شاهد (بدون اضافه کردن فسفر به خاک) در خاک‌های آلوده به آرسنیت ۱/۴۴ میلی‌گرم در گرم بود که با افزایش مقدار فسفر خاک به ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (P2) این مقدار به ۱/۷۱ میلی‌گرم در گرم افزایش یافت که این افزایش به لحاظ آماری در سطح (P<0.05) معنی‌دار بود. همچنین افزایش مقدار فسفر خاک در تیمارهای P1 و P2 در خاک‌های آلوده شده با آرسنات میانگین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان را از ۱/۴۷ به ۱/۶۷ افزایش داد که این تغیرات به لحاظ آماری معنی‌دار بود در حالیکه اختلاف مشاهده شده بین خاک‌های آلوده شده به آرسنیت یا آرسنات به لحاظ آماری (P<0.05) معنی‌دار نبود (جدول ۴). غلظت فسفر در تیمارهای مختلف در خاک‌های آلوده شده با آرسنیت و آرسنات در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار فسفر در خاک و تلقیح مایکوریزایی غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان افزایش یافت. همینطور در سطح شاهد (تلقیح نشده) با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه افزایش یافت که بیشتر این تغییرات در سطح (P<0.05) معنی‌دار بودند. بالاترین غلظت فسفر در تیمار تلقیح شده با تیمار GI و سطح ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک (P2) مشاهده شد که این اختلافات نسبت به سطح شاهد معنی‌دار بودند در حالیکه نسبت به سطح P2 در تیمار GM اختلاف معنی‌داری را در سطح آماری(P<0.05) معنی‌دار نبود.

نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان داد میانگین غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان با تلقیح گیاه با قارچ‌های مایکوریزی افزایش می‌یابد. میانگین غلظت فسفر در ریشه آفتابگردان از ۰/۹۱ در سطح شاهد (تلقیح نشده) تا ۱/۲۷ و ۱/۲۳ میلیگرم بر گرم در تیمارهای GI و GM افزایش یافت که این تغییرات نسبت به سطح شاهد معنی‌دار بودند در حالی‌که بین تیمارهای GI و GM اختلاف معنی‌داری در سطح (P<0.05) مشاهده نشد (جدول ۲). همچنین نتایج حاصل از بررسی اثرات متقابل مایکوریزا و خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات بر غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین اثر خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات بر غلظت فسفر ریشه وجود ندارد در صورتی‌که با تلقیح مایکوریزی غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان در هر دو نوع خاک آلوده به آرسنیت و آرسنات افزایش معنی‌داری را در سطح (P<0.05) نشان داد (جدول ۳). نتایج حاصل از مطالعه اثرات متقابل غلظت‌های مختلف فسفر در خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات نشان داد با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان در خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت فسفر در ریشه آفتابگردان در خاک‌های آلوده به آرسنیت از ۱/۰۷ به ۱/۲۲ و در خاک‌های آلوده به آرسنات از ۱/۰۴ به ۱/۲۲ میلیگرم بر گرم افزایش یافت که این تغییرات به لحاظ آماری در سطح (P<0.05) معنی‌دار بودند در حالی‌که نوع خاک آلوده بر غلظت فسفر در ریشه آفتابگردان اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۴). اثرات تیمارهای مختلف بر غلظت فسفر در ریشه آفتابگردان در شکل ۳ نمایش داده شده است. با روندی مشابه با بخش هوایی، غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان با افزایش غلظت فسفر در خاک و همچنین با تلقیح مایکوریزایی در هر دو تیمار GI و GM نسبت به سطح شاهد به طور معنی‌داری (P<0.05) افزایش می‌یابد. بالاترین مقدار فسفر در ریشه در تیمار GI و سطح فسفر ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر (P2) در خاک‌های آلوده به آرسنیت با ۱/۳۶ میلی گرم بر گرم فسفر مشاهده شد که این تغییر نسبت به سطح شاهد (تلقیح نشده) معنی‌دار و نسبت به تیمار GM در سطح (P<0.05) به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. الترا و همکاران (۱۷) اثر همزیستی آفتابگردان با مایکوریزای *Glomus aggregatum* و دو سطح فسفر ۰ و ۳۰ میلیگرم بر کیلوگرم را بررسی کردند و گزارش کردند مایکوریزایی شدن غلظت آرسنیک را کاهش و غلظت فسفر را در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان افزایش می‌دهد. در مطالعه تو و همکاران با افزایش غلظت فسفر در تیمار تلقیح شده، غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه از ۱/۱۳ به ۱/۹۴ گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. چن و همکاران (۴) گزارش کردن همزیستی یونجه و *Glomus mosseae* غلظت آرسنیک را در بخش هوایی گیاه کاهش و غلظت فسفر را افزایش می‌دهد. کوزولینو و همکاران (۷) اثر استفاده از تلقیح گیاه کاهو با انواع تجاری مایکوریزا و دو سطح فسفر ۰ و ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم را بر جذب آرسنیک و فسفر و مقایسه آن با اثر مایکوریزاهای بومی خاک در شرایط غیر

استریل بررسی کردند. نتایج حاصل از مطالعات کوزولینو نشان داد با افزایش سطح فسفر خاک و تلقیح کاهو، غلظت فسفر در بخش هوایی و ریشه گیاه افزایش می‌یابد. با وجود تفاوت نوع گیاه، نوع میاکوریزای مورد استفاده و سایر شرایط آزمایشی، نتایج مطالعات اخیر با نتایج مطالعات ذکر شده همخوانی دارد.



شکل ۱- اثر تیمارهای آزمایشی بر زیست توده گیاه آفتابگردان

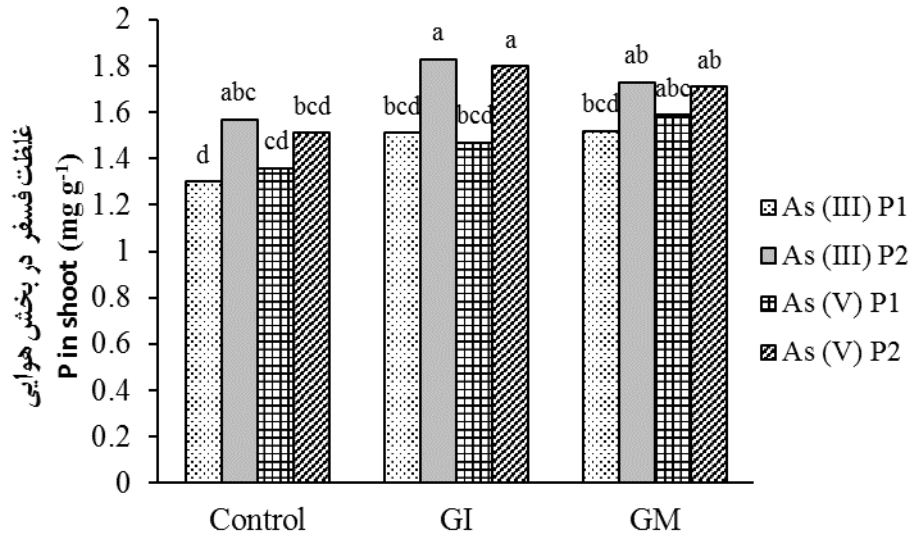
سطح ۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_1وP_2

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI وGM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

Fig 1- The effects of treatments on biomass production by sunflower.

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils), GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)



شکل ۲- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه آفتابگردان

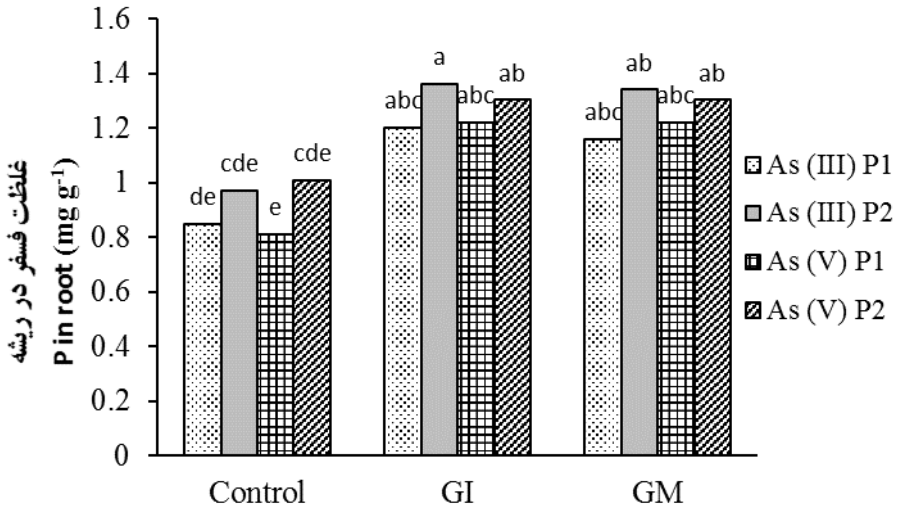
سطح ۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_1وP_2

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI وGM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در س‌طح ($P<0.05$) ندارند

Fig 2- The effects of treatments on P concentration in shoot of sunflower

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils), GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)



شکل ۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت فسفر در ریشه گیاه آفتابگردان

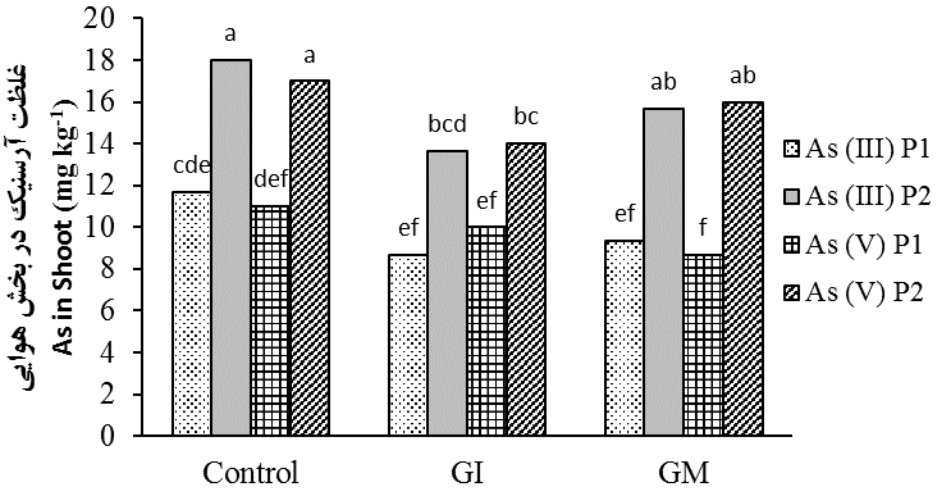
سطح ۰ و ۶۰ میلیگرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_1وP_2

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI و GM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

Fig 3– The effects of treatments on P concentration in root of sunflower

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils), GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)



شکل ٤- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان

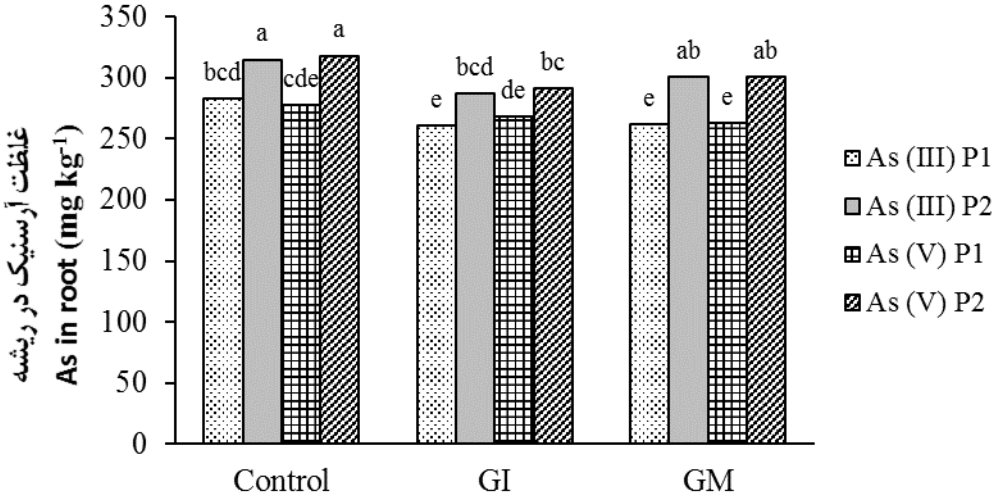
سطح ۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_1وP_2

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI و GM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

Fig 4– The effects of treatments on arsenic concentration in shoot of sunflower

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils), GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)



شکل ۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت آرسنیک در ریشه گیاه آفتابگردان

سطح ۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک به ترتیب P_1وP_2

Glomus intraradices و Glomus mosseae به ترتیب GI وGM

ستون‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری در سطح ($P<0.05$) ندارند

Fig 5- The effects of treatments on arsenic concentration in root of sunflower

P_1 and P_2 (0 and 60 mg kg^{-1} P in soils), GI and GM (*Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*)

اثرات مایکوریزا و فسفر برغلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان

نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که غلظت آرسنیک در ریشه گیاه آفتابگردان ۷-۶ برابر مقدار آن در بخش هوایی گیاه بود. همچنین مقدار آرسنیک موجود در بخش هوایی و ریشه آفتابگردان با تلقیح بوسیله هر دو تیمار GI و GM کاهش یافت. میانگین غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان از ۱۱/۴۱ در سطح شاهد (تلقیح نشده) به ۱۱/۵۸ و ۱۲/۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه در تیمارهای GI و GM کاهش یافت که هر دو این تغییرات نسبت به سطح شاهد معنی‌دار بودند در حالیکه بین اثر تیمارهای GI وGM تفاوت معنی‌داری ($P<0.05$) مشاهده نشد. میانگین غلظت آرسنیک در ریشه گیاه آفتابگردان از ۲۹۸ به ۲۷۶ در تیمارGI و ۲۸۱ میلیگرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار GM کاهش یافت که تغییرات مشاهده شده نسبت به سطح شاهد معنی‌دار بودند در حالی‌که اختلاف معنی‌داری به لحاظ آماری در سطح احتمال ($P<0.05$) بین تیمارهای GI و GM مشاهده نشد (جدول ۲). نتایج حاصل از مطالعه اثرات متقابل تیمارهای GI و GM و نوع آلودگی خاک (خاک‌های آلوده به آرسنیت یا آرسنات) در سطح شاهد (تلقیح نشده) نشان داد بین غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان و نوع آلودگی خاک اختلاف آماری معنی‌داری وجود ندارد. همچنین بین اثر تیمارهای GI و GM بر غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد در حالیکه اختلافات مشاهده شده نسبت به سطح شاهد در سطح آماری ($P<0.05$) معنی‌دار بودند (جدول ۳). بررسی اثرات متقابل نوع آلودگی آرسنیک خاک و سطوح مختلف فسفر در خاک نشان داد با افزایش مقدار فسفر در خاک غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در خاک‌های آلوده به آرسنیت از ۹/۸۹ در سطح P1 به ۱۵/۷۸ در تیمار خاک آلوده به آرسنیت و ۱۵/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار خاک آلوده به آرسنات افزایش یافت که هر دو این تغییرات نسبت به سطح شاهد (P1) به لحاظ آماری در سطح ($P<0.05$) معنی‌دار بودند (جدول ۴). با روندی مشابه غلظت آرسنیک در ریشه گیاه آفتابگردان با افزایش غلظت فسفر در خاک (P2) از ۲۶۸ به ۳۰۱ در خاک‌های آلوده به آرسنیت و ۳۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در خاک‌های آلوده به آرسنات افزایش یافت که هر دو این تغییرات نسبت به تیمار (P1) در سطح آماری ($P<0.05$) معنی‌دار بودند. اثر تیمارهای مختلف بر غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه در تیمارهای GI و GM نسبت به سطح شاهد کاهش می‌یابد و در هر سه تیمار شاهد، GI و GM با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان افزایش می‌یابد که این تغییرات در هر سه تیمار نسبت به

سطح P1 معنی‌دار بودند. بالاترین مقدار آرسنیک در بخش هوایی گیاه آفتابگردان در تیمار شاهد (تلقیح نشده) و غلظت فسفر ۶۰ میلیگرم بر کیلوگرم مشاهده شد. تغییرات مشاهده شده در غلظت آرسنیک بخش هوایی در هیچ یک از تیمارهای مایکوریزایی و هیچ یک از سطوح فسفر در خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات در سطح آماری ($P<0.05$) معنی‌دار نبود. همین‌طور غلظت آرسنیک در ریشه گیاه آفتابگردان در تیمارهای تلقیح شده با قارچ‌های مایکوریزا کاهش و با افزایش مقدار فسفر در خاک افزایش یافت که این امر می‌تواند به افزایش مقاومت گیاه در برابر سمیت آرسنیک و در نتیجه افزایش زیست توده گیاه مربوط باشد (۱۷) و همچنین افزایش غلظت آرسنیک در اثر افزایش غلظت فسفر در خاک می‌تواند به رقابت آنتاگونیستی فسفر و آرسنیک و افزایش گروه های تیولی حمل کننده آرسنیک در گیاه مربوط باشد (۱۱و ۱۶). با روندی مشابه با بخش هوایی بالاترین غلظت آرسنیک در تیمار شاهد (تلقیح نشده) و غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک (P2) با غلظت آرسنیک ۳۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاهی مشاهده شد. نتایج متناقضی در مورد پاسخ همزیستی مایکوریزی و فسفر بر جذب آرسنیک توسط محققان مختلف گزارش شده است. کوزولینو و همکاران (۷) اثر تلقیح گیاه کاهو با انواع تجاری مایکوریزا و مایکوریزاهای بومی خاک در شرایط غیر استریل را در سطوح مختلف فسفر بر جذب آرسنیک در گیاه کاهو بررسی کردند و گزارش کردند تلقیح کاهو با انواع تجاری غلظت آرسنیک را در بخش هوایی گیاه افزایش می‌دهد و فسفر با افزایش بیومس گیاه غلظت آرسنیک را در بخش هوایی و ریشه گیاه کاهش می‌دهد. التـــرا و همکاران (۱۷) اثر تلقیـــح با مایـــکوریزا *Glomus aggregatum* و دو سطح فسفر (۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک) را بر جذب و گونه‌بندی آرسنیک در رایزوسفر گیاه آفتابگردان بررسی کردند و گزارش کردند تلقیح مایکوریزایی غلظت آرسنیک را در بخش هوایی و ریشه آفتابگردان کاهش می‌دهد. در آزمایشات التر‌ا و همکاران (۱۷) غلظت آرسنیک در بخش هوایی و آفتابگردان از ۱/۵۴ به ۱/۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار مایکوریزایی کاهش یافت. همچنین غلظت آرسنیک در ریشه از ۷۱/۸ به ۵۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار مایکوریزایی کاهش یافت. همچنین گزارش کردند با افزایش غلظت فسفر در خاک غلظت آرسنیک در بخش هوایی و ریشه آفتابگردان افزایش یافت. چن و همکاران (۴) اثر *Glomus mosseae* بر جذب آرسنیک و فسفر بوسیله گیاه یونجه را بررسی و گزارش کردند مایکوریزایی شدن غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه را کاهش می‌دهد. دانگ و همکاران (۸) گزارش کردند مایکـــــوریزایی شدن شبدر (*Trifoliumrepens* Linn) و *Lolium perenne* باعث کاهش شدید غلظت آرسنیک در بخش هوایی این گیاهان می‌شود. با توجه به نتایج این آزمایش، مایکوریزایی شدن انتقال آرسنیک به بخش هوایی را کاهش و مقدار فسفر در بخش هوایی و ریشه را زیاد می‌کند. البته با توجه به نتایج متناقض گزارش شده توسط محققین مختلف، نوع مایکوریزای همزیست و گیاه مورد مطالعه قطعاً در پاسخ همزیستی به جذب آرسنیک موثر است. بنابراین نتایج، کاهش غلظت آرسنیک در بخش هوایی گیاه در آزمایش اخیر می‌تواند به اثر رقت در اندامهای هوایی مربوط باشد. علاوه بر این گزارش شده فسفر و آرسنیک به عنوان دو عنصر همگروه دارای روابط آنتاگونیستی هستند و همچنین از طریق یک سیستم انتقالی-جذبی در غشا توسط ریشه گیاهان جذب می‌شوند (۱۱). بنابراین مجموعه عوامل افزایش مقدار فسفر در بخش هوایی گیاه در اثر مایکوریزایی شدن و افزایش مقاومت گیاه به سمیت آرسنیت و آرسنات، رقابت آنتاگونیستی فسفر و آرسنیک، مختل شدن سیستم انتقال آرسنیک توسط غشا در اثر افزایش فسفر و مایکوریزایی شدن و همچنین اثر رقت می‌توانند در کاهش غلظت آرسنیک در ریشه و بخش هوایی گیاه آفتابگردان در آزمایش اخیر موثر باشند. اما اگرچه در آزمایش اخیر در تمامی تیمارهای آزمایشی با مایکوریزایی شدن گیاه غلظت آرسنیک در گیاه کاهش یافت، افزایش غلظت فسفر در خاک از سطح شاهد به ۶۰ میلیگرم بر کیلوگرم فسفر در خاک باعث افزایش غلظت آرسنیک در گیاه شد. بنابراین نقش فسفر در جذب آرسنیک به تنهایی می‌تواند از اهمیت بسیار بالایی برخوردار باشد. تو و همکاران (۱۶) در مطالعه‌ای در دانشگاه فلوریدا اثر گونه های مختلف آرسنیک و فسفر بر جذب آرسنیک توسط یگ گیاه سرخس (*Pteris vittata*) با قابلیت بسیار بالای جذب (*Hyperaccumulator*) آرسنیک را بررسی کردند. نتایج این مطالعات نشان داد این گیاه در جذب گونه‌های مختلف آرسنیک به صورت انتخابی عمل می‌کند. همچنین مشخص شد سرخس مورد مطالعه در ریشه خود آرسنات را به آرسنیت کاهش می‌دهد و سپس از طریق تشکیل گروه‌های تیولی آرسنیت را به اندام‌های هوایی گیاه منتقل می‌کند. نکته برجسته در مطالعات تو و همکاران کشف نقش فسفر در افزایش مقدار آرسنیک است که بنابر نتایج این مطالعات از طریق مکانیسم افزایش تولید گروه‌های تیولی افزایش دهنده جذب آرسنیک می‌باشد. بنابراین افزایش جذب آرسنیک در اثر افزایش غلظت فسفر در مطالعه اخیر می‌تواند به افزایش تولید گروه‌های تیولی انتقال دهنده آرسنیک در گیاه مربوط باشد. تفاوت اصلی در مطالعه اخیر و مطالعه تو و همکاران استفاده از محیط کشت محلول هوگلند در مطالعه تو و استفاده از خاک در این مطالعه می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد تفاوت معنی‌داری بین گونه‌های معدنی آرسنیک در خاک بر جذب فسفر، آرسنیک و زیست توده گیاه وجود ندارد. این امر می‌تواند به تفاوت شرایط اکسیداسیونی و Eh و pH خاک بر اکسیداسیون آرسنیت در خاک مربوط باشد. نگار و همکاران (۱۲) گزارش کردند حدود ۹۵٪ از آرسنیک در خاکی که به وسیله دی‌متیل آرسنیک که یکی از فرم‌های غالب آلی آرسنیک در محیط

زیست می‌باشد آلوده شده بود، در پایان دوره آزمایش به فرم اکسیده شده آرسنات در محلول خاک تبدیل شد. همچنین کانزاس و همکاران (۳) در آزمایشات تفصیلی خود بر گونه‌بندی آرسنیک در خاک گزارش کردند کمتر از ۵٪ آرسنیک در خاک به شکل آرسنیت باقی می‌ماند. بنابراین عدم تغییر در جذب آرسنیک و فسفر در خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات می‌تواند به تغییر سطح اکسیداسیون آرسنیت و آرسنات و تبدیل این گونه‌های معدنی آرسنیک به یکدیگر در خاک مربوط باشد. مطالعات تفصیلی بیشتری توسط سایر محققین در ارتباط با کینتیک اکسیداسیون آرسنیک در خاک‌هایی با ویژگی‌های شیمیایی مختلف، مطالعات مولکولی در ارتباط با پاسخ گیاهان به این سمیت و مکانیزم‌های مقاومت گیاهان، مطالعات گونه‌بندی آرسنیک در محلول خاک و گیاه و بررسی پارامترهای بیوشیمیایی در گیاهان مختلف می‌تواند به درک بهتر از مکانیسم‌های پنهان در جذب آرسنیک و اثر مایکوریزا و فسفر بر این تغییرات منجر شود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد زیست توده و مقاومت گیاه آفتابگردان در اثر همزیستی مایکوریزایی با گیاه آفتابگردان افزایش می‌یابد. جذب آرسنیک از خاک‌های آلوده به آرسنیت و آرسنات تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. مایکوریزایی شدن آفتابگردان با هر دو گونه *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* جذب آرسنیک توسط گیاه را نسبتا کاهش داد که این تغییرات در برخی موارد معنی دار بودند و مقدار فسفر در گیاه را به طور معنی داری افزایش داد. بنابراین استفاده از آفتابگردان و همزیستی مایکوریزایی می‌تواند به افزایش تثبیت گیاهی آرسنیک و افزایش فسفر در خاک می‌تواند به افزایش توانایی جذب آرسنیک و گیاه پالایی آرسنیک در خاک‌های آلوده کمک کند. به نظر می‌رسد پاسخ به این همزیستی به شدت از نوع گیاه، شیمی خاک، مایکوریزای همزیست شده و سایر عوامل محیطی اثر می‌پذیرد؛ بنابراین مطالعات بیشتری با استفاده از گیاهان و قارچ های مختلف برای بررسی دقیق تر این عوامل ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

1- Adewole M.B., Awotoye O.O., Ohiembor M.O., and Salami A.O.2010. Influence of mycorrhizal fungi on phytoremediating potential and yield of sunflower in Cd and Pb polluted soils, Journal of Agricultural Sciences 55: 17-28.

2- Azcue J.M., Nriagu J.O., 1994. Arsenic: historical perspectives. In: Nriagu, J.O. (Ed.), Arsenic in the Environment Part 1: Cycling and Characterization. John Wiley and Sons, Toronto.

3- Cancesa B., Juillota F., Morina G., Laperchec V., Polyad D., Vaughand D.J., Hazemanne J.L., Prouxe O., Brown G.E., and Calasa G. 2008. Changes in arsenic speciation through a contaminated soil profile: A XAS based study, Science of the Total environment. 397:178-189.

4- Chen B., Xiao X., Zhu G., Smith F. A., Xie Z.M., and Smith S.E. 2007. The arbuscularmycorrhizal fungus Glomusmosseae gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by Medicago sativa Linn, Science of the Total Environment 379: 226–234.

5- Chen B., Zhu Y., Zhang G., and Jakobsen X. I. 2005.The influence of mycorrhiza on uranium and phosphorus uptake by barley plants from field contaminated soil. Environmental Science & Pollution Restoration 12, 325-331.

6- Chen B., Zhu Y., Zhang GX., and Jakobsen X. I. 2005. Effects of mycorrihizal fungus Glomusintradices on uranium uptake and accumulation by Medicagotruncatula L. from uranium-contaminated soil, Plant and Soil 275: 349-359.

7- Cozzolino V., Pigna M., Meo V. D, Caporale A.G., and Violante A. 2010. Effects of arbuscularmycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth of Lactuca sativa L. and arsenic and phosphorus availability in an arsenic polluted soil under non-sterile conditions, Applied Soil Ecology 45:262–268.

8- Dong Y., Zhu Y.G., Smith F. A., Wang Y., and Chen B.2008. Arbuscularmycorrhiza enhanced arsenic resistance of both white clover (*Trifoliumrepens* Linn.) and ryegrass (*Loliumperenne* L.) plants in an arsenic-contaminated soil, Environmental Pollution 155: 174-181.

9- Hanson W.C., 1950. The photometric determination of phosphorus in fertilizers using the phosphovanado-molybdate complex. J Sci Food Agr 1:172–173.

10- Mangkoedihardjo S., Ratnawati R., Alfianti N. 2008. Phytoremediation of Hexavalent Chromium Polluted Soil Using Pterocarpusindicus and Jatrophacurcas L., World Applied Sciences Journal 4: 338-342.

11- Meharg A.A., and Macnair M.R. 1992. Suppression of the high-affinity phosphate uptake system - a mechanism of arsenate tolerance in Holcuslanatus L. Journal of Environmental and Experimental Botany. 43:519-24.

12- Nagar R., Sarkar D., Makris C.K., and Datta R. 2012.Arsenic bioaccessibility and speciation in the soils amended with organoarsenicals and drinking-water treatment residuals based on a long-term greenhouse study, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.2013, J. Hydrol.xxx:xxx-xxx.

13- Phillips J.M., and Hayman D. S. 1970.Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular–

arbuscularmycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Trans Br MycolSoc 55:158–161.
14- Smith E., Naidu R.,and Alston A.M. 1998. Arsenic in the soil environment; a review. In: Sparks, D.L. (Ed.), Advances in Agronomy. Academic Press, San Diego.
15- Sparks D. L., 1995. Environmental Soil Chemistry, CRC Boca Raton USA.
16- Tu S., Maa L.Q., MacDonald G.E., and Bondada B., 2004. Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of Pterisvittata L., Environmental and Experimental Botany. 51:121-131.
17- Ultra V.U.J.,Tanaka S., Sakurai K., and Iwasaki K. 2007. Effects of arbuscularmycorrhiza and phosphorus application on arsenic toxicity in sunflower (*Helianthus annuus L.*) and on the transformation of arsenic in the rhizosphere, Plant and Soil 290:29–41.
18- WHO, 1989. Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants. Thirty Third Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organization, Geneva.
19- Wilson S.C., Lockwood P.V., Ashley P.M., and Tighe M. 2010.The chemistry and behavior of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: A critical review, Environmental Pollution, 158: 1169-1181.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 5, Nov.-Dec. 2016, p. 1502-1514

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۵، ص. ۱۵۱۴-۱۵۰۲

The Effects of Arbuscular-Mycorrhizal Fungi and Phosphorous on Arsenic Uptake by Sunflower Plant in Soils Spiked with Arsenite and Arsenate

S. Bagherifam[1*]- A. Lakzian[2]- A. Fotovat[3]- R. Khorasani[4]

Received: 25-12-2013
Accepted: 18-4-2016

Introduction: Arsenic is a highly toxic metalloid in group 15 of periodic table. The information on environmental behaviour of arsenic, however, is still scarce. Contamination of soils and water with arsenic and antimony due to their widespread industrial application and mining activities has raised serious environmental concerns. Nearly all Arsenic-contaminated soils results from human activities and it has different environmental and sociological impacts. Various strategies and methods have been proposed for environmental management and remediation of contaminated soils. Among all methods, the phytoremediation is receiving more attention due to its cost effective and environmental friendly characteristics. In the case of arsenic contaminated soils, there are effective factors such as soil fertility, nutrients content and microorganisms function, which can improve the uptake of As by plants. Up to now, several studies have been evaluated the effects of symbiotic fungal association in plants on increasing nutrients and toxic elements uptake. Many of authors reported that the mycorrhizal symbiosis increases the uptake of toxic elements in root and shoot of plants and consequently improve the efficacy of phytostabilization and phytoextraction processes. There are conflicting results about the effect of arbuscular- mycorrhizal fungi (AMF) on As uptake by various plants. Chen et al. (4) found that *Glomus mosseae* symbiosis with plant reduces As concentration and enhance phosphorus content in shoot and root of plant. Whilst Cozzolino et al. (7) reported that the AMF increases as concentration in shoot and root of cabbage. Phosphorus has important role on mycorrhizal symbiosis and also As uptake by plants. Therefore, current study was conducted to evaluated effect of *Glomus intraradices* and *Glomus mosseae* symbiosis with sunflower and also soil phosphorus concentration on uptake of arsenic from arsenite and arsenate contaminated soils.

Materials and Methods: The soil sample (*Typic Haplorthids*) was collected, air dried and passed through 2 mm sieve and then were heated in 80 centigrade degree temperature for two times. A pot experiment was conducted in a completely randomized design with factorial arrangement and three replications in greenhouse condition. The experimental factors included two *species* spices of inorganic As (50 mg kg^{-1} of Arsenite and Arsenate), two levels of phosphorus (0 and 60 mg Kg^{-1}) and three spices of arbuscular mycorrhizae (control, *Glomus intraradices* and *Glomus mosseae*). Soil samples spiked with $Na_2HAsO_4.7H_2O$, $NaAsO_2$ (Arsenite and Arsenate) and Ca $(H_2PO_4)_2$ (phosphorus) and incubated in greenhouse condition for 4 week. Sunflower seeds were planted and seedlings harvested after 60 day of sowing and then dry weight of sunflower, concentration of As and phosphorus in shoot and root of plant and root colonization percentage determined using standard methods.

Results and Discussion: The results revealed that *Glomus intraradices* (GI) and *Glomus mosseae* (GM) symbiosis significantly (P<0.05) increased the biomass production of sunflower compared with controls. There was no significant difference (P<0.05) between Arsenite and Arsenate treatments in biomass production. Also the dry weight of sunflower in Arsenite and Arsenate contaminated soil samples elevated when phosphorus concentration increased from 0 mg Kg^{-1}(P_1) to 60 mg Kg^{-1} soil (P_2). The highest amount of biomass production observed in GI and P_2 treatments that were 1.72 and 1.73 (g pot^{-1}) in Arsenite and Arsenate contaminated soil, respectively. The results showed that the GI and GM symbiosis and phosphorus concentration significantly (P<0.05) increased phosphorus content of shoot and root of sunflower as compared to the control treatments while there was no significant difference (P<0.05) between Arsenite and Arsenate treatments. The greatest amount of phosphorus in shoot and root of sunflower achieved by GI and P_2 treatments that was significantly (P<0.05) higher that control treatments but there was no significant difference (P<0.05) between GI and P_2 treatments and GM and P_2 treatments. The results of current study revealed that the concentration of As in root was significantly (P<0.05) higher than that in shoot of sunflower. The GI and GM symbiosis significantly (P<0.05) reduced concentration of As in root and shoot of sunflower in comparison to control treatments. The data showed that the increasing of soil phosphorus level followed by a significant (P<0.05) increase of As

1, 2, 3 and 4- PhD, Professors and Associated Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*-Corresponding Author Email: saeed_bagherifam@yahoo.com)

concentration in root and shoot of sunflower. The highest amount of As concentration in root and shoot of sunflower obtained by control and P_2 treatments.

Conclusion: The results of present study revealed that *Glomus intraradices* (GI) and *Glomus mosseae* (GM) symbiosis with sunflower plant can increase the phytostabilization efficacy while increasing phosphorous concentration in soils enhance plant uptake of arsenic in As contaminated soils.

Keywords: Arsenite, Arsenate, Phytostabilization, Phytoremediation, Mycorrhizae fungi